

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 IX

Sistema Piloto II Región

Salares El Laco y Aguas Calientes 2, Laguna Tuyajto y Pampas Puntas Negras, Las Tecas y Colorada

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	471 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 Nº 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 Decument	

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 abordan el estudio de sistemas pilotos, hacen referencia 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 IX** del estudio, denominada "Sistema Piloto II Región: Salares El Laco y Aguas Calientes 2, Laguna Tuyajto y Pampas Puntas Negras, Las Tecas y Colorada".

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	3
	2.1	Propósitos y alcances	3
	2.2	Descripción general del área de estudio	3
3	REV	/ISIÓN DE ANTECEDENTES	9
	3.1	Estudios y Antecedentes Recopilados	9
	3.2	Síntesis de Estudios y Antecedentes Recopilados	12
	3.3	Trabajos de Terreno	42
4	CAF	RACTERIZACIÓN FISIOGRÁFICA	43
	4.1	Geomorfología Región de Antofagasta	44
	4.2	Cuencas Piloto Región de Antofagasta	55
5	CAF	RACTERIZACIÓN GEOLÓGICA	78
	5.1	Marco Geológico	78
	5.2	Unidades Geológicas	82
	5.3	Geología Estructural	98
6	CAF	RACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA	. 104
	6.1	Climatología de la zona	. 104
	6.2	Análisis de Precipitaciones	. 107
	6.3	Escurrimientos	. 146
	6.4	Análisis de Temperatura y Evaporación	. 147
7	CAF	RACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA E ISOTÓPICA	. 162
	7.1	Datos Disponibles y Tratamiento de la Información	. 163
	7.2	Química General de las Aguas	. 165
	7.3	Datos Isotópicos y Relación con la Química	. 219
8	CAF	RACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA	. 223
	8.1	Geometría Acuífera y Unidades Hidrogeológicas	. 225
	8.2	Piezometría de Acuíferos	. 251

	8.3	Constantes Elásticas
	8.4	Conexión con otras cuencas
	8.5	Estimación de la Recarga
	8.6	Descarga del Sistema
	8.7	Balance Hídrico
9	RES	UMEN Y CONCLUSIONES
10	SUG	ERENCIAS PARA TRABAJOS FUTUROS
	10.1	Necesidad de Estudios
	10.2	Mediciones de evaporación
	10.3	Toma de muestras y análisis químicos e isotópicos
	10.4	Fiscalización de usos y control de fuentes
	10.5	Instrumentación y recolección de datos
11	REF	ERENCIAS
ANE	XO I	ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS
	AI.1 Esta	Probabilidades Empíricas de Estar en un Estado (S=seco, P=Lluvia) y de Transición Entre dos para el Modelo de Markov Diario
	AI.2	Probabilidades de Permanencia en un Estado (S = seco, P = Lluvia) Durante k Días 361
	AI.3	Probabilidades de Lluvia a una Determinada Hora
ANE	XO I	I INTERPRETACIÓN PROPIEDADES HIDRÁULICAS DE LOS ACUÍFEROS
ANE ANT	XO I OFA	II NIVELES EN PUNTERAS Y CALICATAS DE CUENCAS PILOTO II REGIÓN DE GASTA
ANE REC	XO I ARG	V VALIDACIÓN DE LOS COEFICIENTES CE Y CI EN LA ESTIMACIÓN DE LA A 402
ANE PILC	XO V DTO	V DETALLE DEL CÁLCULO DE LA RECARGA EN LAS CUENCAS DEL SISTEMA 415
ANE LAG	XO V UNA	VI UBICACIÓN ESTACIONES DE AFORO EN VERTIENTES APORTANTES A S TUYAJTO Y AGUAS CALIENTES 2
ANE	XO V 440	VII CATASTRO DE POZOS, COBERTURAS SIG Y BASE DE DATOS HIDROQUÍMICA
ANE	XO V 443	VIII MAPAS TOPONÍMICOS CUENCAS PILOTO II REGIÓN DE ANTOFAGASTA

ANEXO IX MAPA GEOLÓGICO SECTOR PAMPA COLORADA 44	47
--	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1: Ubicación del sistema piloto del Sector Pampa Colorada
Figura 2.2 : Vías de acceso a las cuencas del Sector Pampa Colorada
Figura 3.1: Cuencas del Balance Hídrico de Chile y del presente estudio
Figura 3.2: Esquema de caudales salientes propuesto en el estudio
Figura 3.3: Límites hidrogeológicos del dominio de estudio
Figura 3.4: Esquema de circulación de las aguas subterráneas representando las salinidades (STD) de vertientes, afloramientos y pozos
Figura 3.5: Columna estratigráfica generalizada de la zona de estudio
Figura 3.6: Zonas de evaporación consideradas en el sistema Tuyajto
Figura 3.7: Ubicación del Sector Pampa Colorada y de subcuencas estudiadas en el EIA 29
Figura 3.8: Pozos de bombeo de Exploraciones Mundo S. A. y derechos otorgados
Figura 3.9: Columna estratigráfica de Pampa Puntas Negras
Figura 3.10: Niveles y direcciones del flujo del agua subterránea
Figura 3.11: Área de influencia en pruebas de bombeo de larga duración. Pozos con nombre (en azul) corresponden a los seleccionados para el bombeo en cada cuenca, desde las que se extrajeron 200 L/s (aprox.) en cada una
Figura 4.1: Región septentrional de las pampas desérticas y cordilleras prealtiplánicas
Figura 4.2: Perfil geomorfológico transversal Región de Antofagasta (23° S)
Figura 4.3: Perfil esquemático de un estrato-volcán típico, donde se observa la alternancia entre depósitos de lava y piroclastos en ambas imágenes
Figura 4.4: Mapa geomorfológico del sistema de cuencas piloto de la II Región de Chile
Figura 4.5: Toponimia de las cuencas piloto Región de Antofagasta para descripción fisiográfica 58
Figura 4.6: Proceso de erosión denominado deflación. Las flechas negras indican la dirección del viento
Figura 4.7: Proceso que describe la formación del pavimento del desierto por acción de la acción continua del viento
Figura 4.8: Red hidrográfica inferida en cuencas piloto de la Región de Antofagasta
Figura 4.9: Curva hipsográfica cuenca del Salar de Aguas Calientes 2
Figura 4.10: Subcuencas de cuencas del grupo norte, Salar de Aguas Calientes 2 y Puntas Negras 68

Figura 4.11: Curva hipsográfica cuenca Puntas Negras
Figura 4.12: Curva hipsográfica cuenca Laguna Tuyajto
Figura 4.13: Curva hipsográfica cuenca Salar El Laco
Figura 4.14: Subcuencas de cuencas del grupo sur, Laguna Tuyajto, Pampas Colorada, Las Tecas y Salar El Laco
Figura 4.15: Curva hipsográfica cuenca Pampa Colorada
Figura 4.16: Curva hipsográfica cuenca Pampa Las Tecas76
Figura 5.1: Perfil Esquemático entre las latitudes 23°-24°S
Figura 5.2: Mapa Geológico de la Puna de Atacama
Figura 5.3: Simbología del Mapa Geológico de la Puna de Atacama
Figura 5.4: Afloramiento de la Ignimbrita Atana según: izq.: Gardeweg y Ramírez, 1987; der., Lindsay et al., 2001a. La línea punteada representa la probable extensión de la Ignimbrita Atana bajo la Ignimbrita Tara. Bo.: Bolivia; Ar.: Argentina; Ch.: Chile
Figura 5.5 Distribución inferida de la Ignimbrita Toconao. Izq.: antes del 2001; der.: según Lindsay et al., 2001a. Los signos de interrogación indican que la Ignimbrita Toconao podría encontrarse bajo el relleno intra-caldera de Atana. Bo.: Bolivia; Ar.: Argentina; Ch.: Chile
Figura 5.6: Bosquejo que indica la distribución de volcanismo de arco y de tras-arco. En rojo, influencia de falla Calama – Olocapato – El Toro en estrato-volcanes y centro ignimbrítico de la Puna; en verde, área de estudio
Figura 5.7: Estructuras, lineamientos y geología superficial para sector de cuencas piloto de la II Región de Chile. Simbología de geología de superficie en Figura 5.3
Figura 6.1: Climas de las Regiones en que se encuentra el Altiplano – Puna de Chile
Figura 6.2: Estaciones pluviométricas seleccionadas para el sistema piloto de la II Región108
Figura 6.3: Disponibilidad de datos de precipitación de la serie original y rellenada para el año hidrológico en las estaciones seleccionadas para el sistema piloto de la II Región
Figura 6.4: Disponibilidad de datos de precipitación mensual en las estaciones PUC-DGA del sistema piloto de la II Región
Figura 6.5: Series de precipitación anual en las estaciones DGA seleccionadas para el sistema piloto de la II Región
Figura 6.6: Precipitación media anual en las estaciones seleccionadas. El valor presentado para las estaciones PUC-DGA corresponde al año hidrológico (2007-2008)
Figura 6.7: Series de precipitación mensual para el periodo Noviembre 2007 – Octubre 2008, ordenada de acuerdo al año hidrológico (Oct-Sep), en las estaciones PUC-DGA de la II Región

Figura 6.8: Series de precipitación media mensual y probabilidades de excedencia empíricas del 15% y 85% en las estaciones DGA de la II Región seleccionadas
Figura 6.9: Series de precipitación media mensual en las estaciones GeoAguas
Figura 6.10: Esquema del modelo de Markov para la precipitación diaria. El estado 1 corresponde a Seco (S) y el 2 a Lluvia (P)
Figura 6.11: Hietogramas en las estaciones seleccionadas de la II Región para el periodo Nov 2007 – Feb 2009
Figura 6.12: Registro simultáneo de la magnitud de precipitación diaria en las estaciones seleccionadas (ordenadas de norte a sur) para el periodo Nov 2007 – Feb 2009 122
Figura 6.13: Probabilidades de estar en estado seco (S) y lluvia (P), y probabilidades de transición entre estados para la estación Tuyajto
Figura 6.14: Probabilidades empíricas de estado seco (S) y lluvia (P), y de transición entre estados para la estación El Laco
Figura 6.15: Probabilidades empíricas de estado seco (S) y lluvia (P), y de transición entre estados para la estación Puntas Negras
Figura 6.16: Probabilidades empíricas de estado seco (S) y lluvia (P), y de transición entre estados para la estación Aguas Calientes 2
Figura 6.17: Probabilidades empíricas de estado seco (S) y lluvia (P), y de transición entre estados para la estación Laco Estación Meteorológica
Figura 6.18: Probabilidades empíricas de estado seco (S) y lluvia (P), y de transición entre estados para la estación Laco Camino Puntas Negras
Figura 6.19: Probabilidades empíricas de estado seco (S) y lluvia (P), y de transición entre estados para la estación Laguna Tuyajto
Figura 6.20: Probabilidades empíricas de estado seco (S) y lluvia (P), y de transición entre estados para la estación Pampa Las Tecas
Figura 6.21: Probabilidad de permanencia en un estado (S = seco y P = Lluvia) durante k días para la estación Tuyajto
Figura 6.22: Probabilidad de permanencia en un estado (S = seco y P = Lluvia) durante k días para la estación El Laco
Figura 6.23: Probabilidad de permanencia en un estado (S = seco y P = Lluvia) durante k días para la estación Puntas Negras
Figura 6.24: Probabilidad de permanencia en un estado (S = seco y P = Lluvia) durante k días para la estación Aguas Calientes 2
Figura 6.25: Probabilidad de permanencia en un estado (S = seco y P = Lluvia) durante k días para la estación Laco Estación Meteorológica

Figura 6.26: Probabilidad de permanencia en un estado (S = seco y P = Lluvia) durante k días para la estación Laco Camino Puntas Negras
Figura 6.27: Probabilidad de permanencia en un estado (S = seco y P = Lluvia) durante k días para la estación Laguna Tuyajto
Figura 6.28: Probabilidad de permanencia en un estado (S = seco y P = Lluvia) durante k días para la estación Pampa Las Tecas
Figura 6.29: Probabilidad de lluvia a una determinada hora en la estación Tuyajto
Figura 6.30: Probabilidad de lluvia a una determinada hora en la estación El Laco
Figura 6.31: Probabilidad de lluvia a una determinada hora en la estación Puntas Negras
Figura 6.32: Probabilidad de lluvia a una determinada hora en la estación Aguas Calientes 2
Figura 6.33: Comparación de la variación de la precipitación media anual con la altitud en las estaciones DGA de la II Región y en las estaciones seleccionadas para el sistema piloto
Figura 6.34: Mapa de isoyetas en la zona del sistema piloto de la II Región
Figura 6.35. Valores clasificados de q_{ij} para la precipitación anual en las estaciones DGA ordenadas de norte a sur
Figura 6.36: Estaciones meteorológicas con registros de temperatura seleccionada para el sistema piloto de la II Región
Figura 6.37: Disponibilidad de datos anuales de temperatura en las estaciones seleccionadas para el sistema piloto de la II Región
Figura 6.38: Disponibilidad de datos mensuales de temperatura en las estaciones PUC-DGA del sistema piloto de la II Región
Figura 6.39: Series anuales de temperatura mínima absoluta y promedio, máxima promedio y absoluta, en la estación Socaire (DGA)
Figura 6.40: Cuartiles (Q ₁ , Q ₂ y Q ₃) de la temperatura registrada cada 10 minutos en las estación Puntas Negras (PUC-DGA)
Figura 6.41: Series mensuales de temperatura mínima absoluta y promedio, media absoluta, máxima promedio y absoluta en la estación Puntas Negras (PUC-DGA)
Figura 6.42: Series mensuales de temperatura mínima absoluta y promedio, máxima promedio y absoluta en las estación Socaire (DGA)
Figura 6.43: Variación de la temperatura media absoluta con la latitud en las estaciones seleccionadas.
Figura 6.44: 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 II Región
Figura 6.45: Mapa de isotermas en la zona del sistema piloto de la II Región

Figura 6.46: Estaciones meteorológicas con registros de evaporación seleccionada para el sistema piloto de la II Región
Figura 6.47: Disponibilidad de información histórica de evaporación media (Año hidrológico) 158
Figura 6.48: Disponibilidad de información histórica de evaporación total (Año hidrológico) 158
Figura 6.49. Serie de evaporación anual (mm) en la estación Socaire (II Región)
Figura 6.50: Evaporación media mensual en las estaciones seleccionadas del sistema piloto de la II Región
Figura 6.51: Variación de la evaporación media anual con la latitud en las estaciones seleccionadas. 160
Figura 6.52: Gradiente de la evaporación media anual en las estaciones seleccionadas de la XV, I, II y III Región
Figura 7.1: Ubicación de muestras de agua de cuencas piloto Salar de Aguas Calientes 2 y Puntas Negras con registro de elementos mayoritarios completos y error de balance menor o igual a 10% 166
Figura 7.2: Ubicación de muestras de agua de cuenca piloto Laguna Tuyajto con registro de elementos mayoritarios completo y error de balance menor o igual al 10%
Figura 7.3: Ubicación de muestras de agua de cuencas piloto Pampa Colorada, Pampa Las Tecas y Salar El Laco con registro de elementos mayoritarios completo y error de balance menor o igual al 10%
Figura 7.4: Muestras Laguna Lejía y Salar de Aguas Calientes 3 con elementos mayoritarios completos y error de balance menor o igual a 10%
Figura 7.5: Muestras de cuencas piloto con datos isotópicos170
Figura 7.6: Imagen Landsat del sector norte del sistema de cuencas piloto. Se especifican (en círculos rosados) las zonas de afloramiento de agua y la ubicación de pozos en las cuencas Salar de Aguas Calientes 2 y Puntas Negras
Figura 7.7: Imagen Landsat del sector sur del sistema de cuencas piloto. Se especifican (en rosado, círculos) las zonas de afloramiento de agua y la ubicación de pozos en las cuencas Laguna Tuyajto, Pampa Colorada, Pampa Las Tecas y Salar El Laco
Figura 7.8: Relación entre el contenido total de sales disueltas y la conductividad eléctrica
Figura 7.9: Diagramas de Caja de pH, Conductividad y Temperatura 181
Figura 7.10 Diagramas de Piper que comparan muestras con registro anión/catión. A la izquierda: completo, con todos los datos incluidos aquellos con error de balance mayor a 10%. A la derecha: registro anión/catión de datos con error de balance menor a 10%
Figura 7.11: Gráficos de Piper para las muestras de estudio. Arriba: todas las muestras. Abajo: superficiales (izq.) y subterráneas (der.)

Figura 7.12 Muestras hidroquímicas que se han utilizado para el análisis químico de elementos mayoritarios mediante diagramas de Stiff
Figura 7.13: Diagramas de Piper para muestras de la cuenca Salar de Aguas Calientes 2. Arriba: todas las muestras. Abajo, izquierda: muestras superficiales. Abajo, centro: muestras por sector. Abajo, derecha: muestras subterráneas
Figura 7.14: Diagramas de Stiff para la cuenca Salar de Aguas Calientes 2. Izquierda: ubicación. Derecha: tipo de muestras
Figura 7.15: Diagramas de Piper con todas las muestras subterráneas de la cuenca Puntas Negras, manteniendo igual color y diferente distintivo. Izquieda: para indicar las diferentes profundidades de un mismo pozo. Derecha: muestras diferenciadas según su ubicación geográfica
Figura 7.16: Diagramas de Stiff correspondientes a la cuenca Puntas Negras. Izquierda: ubicación. Derecha: tipo de fuente muestreada
Figura 7.17 Diagramas de Piper para la cuenca Laguna Tuyajto. Arriba: todas las muestras. Abajo, izquierda: muestras superficiales. Abajo, centro: muestras por sector. Abajo, derecha: muestras subterráneas
Figura 7.18: Diagramas de Stiff correspondientes a la cuenca Laguna Tuyajto. Izquierda: ubicación de las muestras. Derecha: tipo de fuente
Figura 7.19: Diagrama de Piper para todas las muestras subterráneas de la cuenca Pampa Colorada manteniendo igual color y diferente distintivo para indicar las varias profundidades de un mismo pozo.
Figura 7.20: Diagrama de Piper para el total de muestras subterráneas de la cuenca Pampa Las Tecas manteniendo igual color y diferente distintivo para indicar las diferentes profundidades de un mismo pozo
Figura 7.21: Diagramas de Stiff correspondientes a la cuenca Pampa Colorada. Izquierda: ubicación de las muestras. Derecha: tipo de fuente
Figura 7.22: Diagramas de Stiff correspondientes a la cuenca Pampa Las Tecas. Izquierda: ubicación. Derecha: tipo de fuente
Figura 7.23: Diagramas de Piper para las muestras de la cuenca Salar El Laco. Arriba: todas las muestras. Abajo, izquierda: muestras superficiales. Abajo, centro: muestras por sector. Abajo, derecha: muestras subterráneas
Figura 7.24: Diagramas de Stiff correspondientes a la cuenca Salar El Laco. Izquierda: ubicación. Derecha: tipo de fuente
Figura 7.25: Diagramas de Stiff correspondientes a la cuenca Laguna Lejía. Izquierda: ubicación. Derecha: tipo de fuente
Figura 7.26: Diagramas de Stiff correspondientes a la cuenca Salar de Aguas Calientes 3. Izquierda: ubicación. Derecha: tipo de fuente

Figura 7.27: Geología superficial y diagramas de Stiff de las cuencas piloto de la II Región 208
Figura 7.28: Diagrama que muestra la tendencia del contenido de arsénico con la conductividad eléctrica del agua
Figura 7.29: Diagrama que muestra la tendencia del contenido de boro con la conductividad eléctrica del agua
Figura 7.30: Diagrama que muestra la tendencia del contenido de litio con la conductividad eléctrica del agua
Figura 7.31: Concentraciones de arsénico superficial (izquierda) y subterráneo (derecha) en el sistema de cuencas piloto de la II Región de Chile
Figura 7.32: Concentraciones de boro superficial (izquierda) y subterráneo (derecha) en el sistema de cuencas piloto de la II Región de Chile
Figura 7.33: Concentraciones de litio superficial (izquierda) y subterráneo (derecha) en el sistema de cuencas piloto de la II Región de Chile
Figura 7.34: Relación δ2H/ δ18O en muestras superficiales y subterráneas de las cuencas piloto de la II Región de Chile
Figura 7.35: Relación para un rango acotado de $\delta^2 H / \delta^{18} O$ en muestras superficiales y subterráneas de las cuencas piloto de la II Región de Chile
Figura 8.1: Ubicación de pozos con litoestratigrafía y mapa geológico de superficie de la Puna de Atacama, modificado de las Hojas Toconao (Ramírez y Gardeweg, 1982) y Río Zapaleri (Gardeweg y Ramírez, 1985), escala 1:250.000
Figura 8.2: Ubicación de perfiles geofísicos realizados en los antecedentes
Figura 8.3: Columnas estratigráficas generalizadas para el sistema de cuencas piloto sectores norte y sur
Figura 8.4: Ubicación de los perfiles geológicos en el sistema de cuencas piloto
Figura 8.5: Perfil esquemático de Puntas Negras y Loma Amarilla
Figura 8.6 Perfil esquemático de Pampa Amarilla
Figura 8.7: Perfil esquemático de Pampa Colorada
Figura 8.8: Perfil esquemático de Pampa Las Tecas
Figura 8.9: Perfil hidrogeológico del sector norte del sistema de cuencas piloto. Perfil Salar Aguas Calientes 2 – Puntas Negras en Figura 8.4
Figura 8.10: Perfil hidrogeológico del sector sur del sistema de cuencas piloto. Arriba: perfil E-W que cruza las cuencas Pampa Las Tecas, Laguna Tuyajto y Salar de Aguas Calientes 3. Abajo: perfil E-W que cruza las cuencas Pampa Colorada y Salar El Laco
Figura 8.11: Pozos y cota de la napa (msnm) en sector norte del área de estudio

Figura 8.12: Pozos y cota de la napa (msnm) en sector sur del área de estudio
Figura 8.13: Dirección flujos subterráneos en Sector Pampa Colorada de acuerdo a cotas y densidad.
Figura 8.14: Conexión entre cuencas del sistema piloto de la II Región
Figura 8.15: Sección de paso del agua subterránea usada para determinar caudal en Loma Amarilla. 268
Figura 8.16: Transecto longitudinal de lo mostrado en la sección transversal de la Figura 8.17, enseñando la conexión entre las cuencas Pampa Colorada y Salar El Laco
Figura 8.17: Perfil que muestra la continuidad litológica y de la napa en la sección de cuencas Pampa Colorada y Salar El Laco
Figura 8.18: Esquema conceptual del balance hídrico en las unidades litológicas para estimar la recarga en el sistema piloto (a) Recarga directa. (b) Recarga lateral
Figura 8.19: Unidades litológicas y características hidráulicas presentes en las cuencas del sistema piloto de la II Región
Figura 8.20: Zonas de medición de evaporación cuencas piloto Región de Antofagasta
Figura 8.21: Curva evaporación-profundidad de la napa ajustada en la Región de Antofagasta 290
Figura 8.22: Zonas de isoprofundidad de saturación en el Salar de Aguas Calientes 2. Izquierda: división en zonas para asignar niveles promedio de profundidad del nivel saturado en base a la gradación de respuesta a la humedad (negro: nivel más profundo \rightarrow azul: nivel más somero), calibrado con niveles de punteras en el presente estudio. Derecha: en azul y celeste cuerpos de agua dentro del salar utilizados para estimar descarga desde superficies libres
Figura 8.23: Áreas por bandas de isoprofundidad Laguna Tuyajto
Figura 8.24. Curvas de isoprofundidad de la napa en la Laguna Tuyajto
Figura 8.25: Esquema adoptado por GeoAguas Consultores (2007) para determinar el ancho de la sección de paso del agua subterránea para la descarga desde Tuyajto a sus vecinas
Figura 8.26: Zonas de aporte superficial y puntos de medición de caudal, niveles y precipitación en Laguna Tuyajto
Figura 8.27: Zonas de aporte superficial y puntos de medición de caudal, niveles y precipitación en Laguna Aguas Calientes 2
Figura 8.28: Unidades litológicas y características hidráulicas presentes en las cuencas del sistema piloto de la II Región
Figura 8.29: Patrones de flujo superficial y subterráneo en las cuencas del Grupo Norte del sistema piloto de la Región de Antofagasta
Figura 8.31: Patrones de flujo superficial y subterráneo en las cuencas del Grupo Sur y la cuenca Salar El Laco del sistema piloto de la Región de Antofagasta

Figura 11.1: Ajuste expediente ND-0202-2370 (PN-1A). $T = 617 \text{ m}^2/\text{d}$. 378
Figura 11.2: Ajuste expediente ND-0202-2370 (PN-1A). $T = 118 \text{ m}^2/\text{d}$. 378
Figura 11.3: Ajuste expediente ND-0202-2370 (PN-5). T = $203 \text{ m}^2/\text{d}$. 379
Figura 11.4: Ajuste corregido ND-0202-2370 (PN-5). T = $19,2 \text{ m}^2/d$. 379
Figura 11.5: Ajuste corregido ND-0202-2374 (PT-1). T = $322 \text{ m}^2/\text{d}$. 380
Figura 11.6: Ajuste corregido ND-0202-2374 (PC-2).	. 380
Figura 11.7: Ajuste expediente ND-0202-2398 (PN-8). T = 540 m^2/d	. 381
Figura 11.8: Ajuste corregido ND-0202-2398 (PN-8). $T = 82,7 \text{ m}^2/\text{d}$. 382
Figura 11.9: Ajuste expediente ND-0202-2400. T = $204 \text{ m}^2/\text{d}$. 382
Figura 11.10: Ajuste corregido ND-0202-2400. T = $35,6 \text{ m}^2/\text{d}$. 383
Figura 11.11: Ajuste expediente ND-0202-2401. T = $9.520 \text{ m}^2/\text{d}$. 383
Figura 11.12: Ajuste expediente ND-0202-2402. T = $122 \text{ m}^2/\text{d}$. 384
Figura 11.13: Ajuste expediente ND-0202-2404 (PC-4). T = $1.310 \text{ m}^2/\text{d}$. 385
Figura 11.14: Ajuste expediente ND-0202-2404 (PT-5). T = $1.200 \text{ m}^2/\text{d}$. 386
Figura 11.15: Ajuste expediente ND-0202-2412 (LA-1). T = $130 \text{ m}^2/\text{d}$. 387
Figura 11.16: Ajuste expediente ND-0202-2412 (LA-2).	. 388
Figura 11.17: Ajuste expediente ND-0202-2413.	. 389
Figura 11.18: Ajuste expediente ND-0202-2414. T = 908 m ² /d	. 390
Figura 11.19: Ajuste corregido ND-0202-2414. T = 437 m^2/d	. 390
Figura 11.20: Ajuste expediente ND-0202-2415. $T = 204 \text{ m}^2/\text{d}$. 391
Figura 11.21: Ajuste corregido ND-0202-2415. T = 47,8 m^2/d	. 391
Figura 11.22: Ajuste expediente ND-0202-2416. T = $604 \text{ m}^2/\text{d}$. 392
Figura 11.23: Ajuste corregido ND-0202-2416. T = $406 \text{ m}^2/\text{d}$. 392

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1: Componentes del balance hídrico de las cuencas según Balance Hídrico de Chile	14
Tabla 3.2: Tasas de evaporación y profundidades de extinción adoptadas	26
Tabla 3.3: Propiedades de la sección de transición entre la cuenca L. Tuyajto y sus vecinas	27
Tabla 3.4: Estimaciones de recarga realizados por WMC para el EIA Pampa Colorada	41

Tabla 4.1: Características morfométricas del Salar de Aguas Calientes 2 66
Tabla 4.2: Subcuencas Salar de Aguas Calientes 2
Tabla 4.3: Características morfométricas de Puntas Negras. 69
Tabla 4.4: Subcuencas Puntas Negras. 70
Tabla 4.5: Características morfométricas de Laguna Tuyajto
Tabla 4.6: Subcuencas Laguna Tuyajto. 72
Tabla 4.7: Características morfométricas de Salar El Laco
Tabla 4.8: Subcuencas Salar El Laco. 73
Tabla 4.9: Características morfométricas de cuencas Pampa Colorada y Pampa Las Tecas
Tabla 4.10: Subcuencas Pampa Colorada (229) y Pampa Las Tecas (228).76
Tabla 6.1: Estaciones pluviométricas seleccionadas para el sistema piloto de la II Región 107
Tabla 6.2: Vigencia y años de registro en las estaciones pluviométricas seleccionadas para el sistema piloto de la III Región. 109
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 II Región
Tabla 6.4: Precipitación estacional en las estaciones seleccionadas de la III Región 116
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 GeoAguas
Tabla 6.7: Estaciones meteorológicas con registros de temperatura seleccionadas para el sistema piloto de la II Región. 147
Tabla 6.8: Vigencia y años de registro en las estaciones meteorológicas con registros de temperatura seleccionadas para el sistema piloto de la I Región. 149
Tabla 6.9: Propiedades estadísticas de las series anuales de temperatura mínima absoluta y promedio, máxima promedio y absoluta, en la estación Socaire (DGA)
Tabla 6.10: Estaciones meteorológicas con registros de evaporación seleccionadas para el sistema piloto de la II Región
Tabla 6.11: Propiedades estadísticas de las series de evaporación anual (mm) en las estaciones seleccionadas. 159
Tabla 7.1: Detalle de muestras que corresponden a la base de datos filtrada para las cuencas piloto de laII Región de Chile.164
Tabla 7.2: Detalle de muestras que corresponden a la base de datos filtrada para las cuencas Laguna Lejía y Salar de Aguas Calientes 3

Tabla 7.3: Análisis Químico de Ignimbritas en la Puna de Atacama, II Región 206
Tabla 7.4: Análisis Químico de Lavas de los Conjuntos de Volcanes de la Puna de Atacama
Tabla 8.1: Pozos, niveles y cotas de la napa en el área de estudio. 252
Tabla 8.2: Gradientes calculados en y entre las cuencas de la zona de estudio. 257
Tabla 8.3: Valores del coeficiente de infiltración (C_l) en función de la permeabilidad cualitativa de lasunidades litológicas.275
Tabla 8.4: Comparación con otros estudios de la recarga anual de largo plazo en Río Piga er Collacagua
Tabla 8.5: Comparación con otros estudios de la recarga anual de largo plazo en Río Collacagua er Peñablanca
Tabla 8.6: Recarga anual de largo plazo en las cuencas del sistema piloto de la II Región
Tabla 8.7: Evaporación desde superficies libres en cuenca Salar de AC2 (L/s)
Tabla 8.8: Evaporación desde superficies libres en cuenca Laguna Tuyajto (L/s)
Tabla 8.9: Evaporación desde superficies libres en cuenca Salar El Laco (L/s)
Tabla 8.10: Evaporación desde vegas y bofedales cuenca Salar de Aguas Calientes 2. 287
Tabla 8.11: Evaporación desde vegas y bofedales cuenca Laguna Tuyajto
Tabla 8.12: Evaporación desde vegas y bofedales cuenca Salar El Laco. 288
Tabla 8.13: Descargas por evaporación desde suelos en cuenca Salar de Aguas Calientes 2
Tabla 8.14: Descargas por evaporación desde suelos en cuenca Laguna Tuyajto. 295
Tabla 8.15: Profundidad de saturación Salar El Laco. 295
Tabla 8.16: Descargas por evaporación desde suelos en cuenca Salar El Laco
Tabla 8.17: Descargas por evaporación Salar de Aguas Calientes 2. 297
Tabla 8.18: Descargas por evaporación Laguna Tuyajto. 298
Tabla 8.19: Descargas por evaporación Salar El Laco
Tabla 8.20: Datos utilizados por WMC en el EIA Pampa Colorada (2006) para estimar el flujo desde cuenca Laguna Tuyajto a sus vecinas. 299
Tabla 8.21: Datos utilizados por GeoAguas Consultores en el Proyecto Mundo (2007) para estimar elflujo desde cuenca Laguna Tuyajto a sus vecinas.299
Tabla 8.22: Datos utilizados en el presente estudio para estimar el flujo subterráneo desde la cuenca Laguna Tuyajto a sus vecinas
Tabla 8.23: Estimaciones del flujo subterráneo desde la cuenca Laguna Tuyajto a sus vecinas usando los enfoques de flujo lineal y no lineal propuesto en los antecedentes

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, se 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

Las cuencas de los salares El Laco y Aguas Calientes 2, la Laguna Tuyajto y las Pampas Puntas Negras, Las Tecas y Colorada se encuentran en la Región de Antofagasta, en la Provincia de El Loa, comuna de San Pedro de Atacama (Figura 2.1). Estas cuencas presentan un clima adverso para ser habitadas, como la mayoría de las unidades del Altiplano - Puna, sin embargo, en su vecindad existen poblados y actividades productivas como la minería, que utilizan sus recursos hídricos. 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 estas cuencas, 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 las cuencas piloto de la Región de Antofagasta, 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 las cuencas, además de los balances hídricos de recarga y descarga.

2.2 Descripción general del área de estudio

El área de estudio corresponde a las cuencas superficiales y subterráneas salares El Laco y Aguas Calientes 2, Laguna Tuyajto y Pampas Colorada, Las Tecas y Puntas Negras. Por simplificación, al grupo de cuencas se ha llamado **Sector Pampa Colorada**, siguiendo la nomenclatura usada por los antecedentes revisados. Estas unidades se encuentran en la franja del Altiplano – Puna de Chile, insertas en la Cordillera de Los Andes de la Región de Antofagasta, en el sur del bloque central del Altiplano de la II Región (Figura 2.1), como ha sido descrito en la Parte I de este estudio.

Los límites de la zona de estudio se encuentran entre las siguientes coordenadas UTM (Datum Provisional Sudamericano 56, PSAD 56):

Límite Norte	:	7.430.000
Límite Sur	:	7.340.000
Límite Oeste	:	628.000
Límite Este	:	670.000

En su parte superficial, la cuenca Laguna Tuyajto tiene un área de 249 km², la cuenca Pampa Colorada una área de 58 km², la cuenca Salar El Laco un área de 271 km², la cuenca Puntas Negras de 201 km², la cuenca Salar de Aguas Calientes 2 tiene un área de 975 km² y finalmente la cuenca Pampa Las Tecas un área superficial de 110 km². En total, el sistema piloto contempla superficialmente un área de 1.754 km².

2.2.1 Características generales de las cuencas

La cuenca Laguna Tuyajto tiene una forma similar a un riñón, al igual que la cuenca Salar El Laco ubicada más al oriente. En conjunto 'envuelven' a las cuencas menores de Pampa Colorada y Pampa Las Tecas. El Sector Pampa Colorada o sistema piloto de esta Región, colinda al poniente con las cuencas Salar de Aguas Calientes 3 o Salar de Talar, Laguna Miscanti, Salar de Atacama y Laguna Lejía; por el norte y noreste se encuentran otras cuencas altiplánicas: Salar de Pujsa y Salar de Loyoques o Quisquiro. En la vecindad del sistema, tanto por el sur como por el oriente se sitúan hoyas hidrográficas compartidas con Argentina. Las de menor superficie están al sur y son Salar de Incahuasi y Laguna Jeche, mientras que por el oriente se encuentran dos de las cuencas de mayor superficie con presencia en territorio chileno, éstas son Salar de Jama y Salar del Rincón.

La altura máxima de la cuenca Laguna Tuyajto es el Cerro Tuyajto de 5.480 msnm. La única alimentación visible a la laguna es un río en bofedal con varias ramas que drenan el sector norte (Quebrada Río Blanco) y oriente de la cuenca.

Pampa Colorada es una cuenca endorreica de un tamaño medio a bajo en comparación a las demás hoyas hidrográficas definidas en este estudio. Como se menciona en la descripción anterior, esta cuenca se encuentra rodeada por Laguna Tuyajto (oeste) y el Salar El Laco (este), condición que comparte con Pampa Las Tecas, una cuenca similar ubicada al sur de ésta. La cuenca de Pampa Colorada está sitiada por un anfiteatro de cerros, algunos de los cuales superan los 4.500 msnm, destacando en la dirección suroeste el Cerro Las Tecas con 4.747 m de altitud. Junto a Pampa Las Tecas, ambas cuencas tienen una red hidrográfica reducida debido a su pequeña superficie, compuesta por pequeñas quebradas que funcionan bajo condiciones de tormenta.



Figura 2.1: Ubicación del sistema piloto del Sector Pampa Colorada

Salar El Laco se encuentra en el rincón sureste del bloque central del Altiplano de la II Región. Su cota máxima está en los 5.852 msnm definiendo su límite norte (Volcán Puntas Negras). El salar ubicado en el centro es de tipo playa, con una laguna poco profunda, y es alimentado por la Quebrada del Hueso desde el norponiente y la Quebrada de la Astilla por el poniente.

Puntas Negras se caracteriza por ser una cuenca endorreica de tamaño considerable que no forma laguna ni salar. Al igual que otros casos en que ocurre esta situación, los estudios tienden a vincularla subterráneamente con alguna de sus vecinas y en este caso con la del norte (Aguas Calientes 2). La revisión de los antecedentes y las visitas a terreno efectuadas indican que a nivel superficial ambas cuencas están desconectadas. Una confusión que puede producirse es relacionarla con la cuenca de elevación intermedia del salar de Punta Negra, ubicado al sur del salar de Atacama. La hoya de Puntas Negras recibe su nombre por el cordón de cerros que la cruza, donde el Volcán Puntas Negras ubicado en el límite sur es el de mayor altura (5.852 msnm).

La unidad Salar de Aguas Calientes 2 tiene una altura media de 4.562 msnm, con su punto más alto en el Volcán Acamaranchi o Cerro Pili, ubicado en el límite norte (6.046 msnm). Al norte del salar se encuentra el aporte superficial más importante, el Río Pili, que baja por la ladera del cerro del mismo nombre. El salar es de tipo playa y representa casi un 12% del área de la cuenca, con varias lagunas de extensión variable, siendo la más importante la que se encuentra al surponiente, alimentada por vertientes que surgen al pie del Cerro Overo y que da vida a los bofedales aquí presentes.

2.2.2 Vías de acceso

El acceso al Sector Pampa Colorada se hace a través de la Ruta 23, que conecta la ciudad de Calama con el Paso Sico, ubicado en la frontera con Argentina. Este es un camino principal, que cruza el poblado de San Pedro de Atacama y luego bordea la depresión del Salar de Atacama, atravesando los poblados de Toconao y Socaire. Se encuentra pavimentada y en buenas condiciones hasta este último poblado (Figura 2.2).

Una alternativa para acceder al sistema piloto en estudio es a través del camino que conduce al Paso Huaytiquina (o Guaitiquina), cuyo inicio es por un desvío al oriente ubicado entre las localidades de Toconao y Socaire. Ésta es una ruta secundaria, de no muy buenas condiciones, que cruza el borde la laguna Lejía para llegar a Salar de Aguas Calientes 2.

Internamente, las cuencas se conectan a través de caminos hechos por particulares, probablemente con fines de exploración, y que no figuran en la red vial del IGM.
460625 COPIA



Figura 2.2 : Vías de acceso a las cuencas del Sector Pampa Colorada

Fuente: [Turistel]

1

COPIA

3 REVISIÓN DE ANTECEDENTES

Este capítulo presenta una revisión de los estudios realizados en las cuencas del Sector Pampa Colorada 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 (EIA) 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 Antofagasta.

- Ref. 1 Balance Hídrico de Chile, Dirección General de Aguas, 1987.
- Ref. 2 Balance Hidrológico Nacional, II Región, Dirección General de Aguas, 1986.
- Ref. 3 Modelos de Elevación Digital, (DEM), (http://seamless.usgs.gov).

- Ref. 4 Imágenes Satelitales Landsat ETM+, NASA (1999).
- Ref. 5 Cartografía de Chile, escala 1:250.000. Instituto Geográfico Militar, 1987.
- Ref. 6 Coberturas digitales SIG, Dirección General de Aguas, 2007.
- Ref. 7 Geografía de Chile, Tomo VIII, Hidrografía. Niemeyer y Cereceda, Instituto Geográfico Militar (IGM), 1984.
- Ref. 8 Mapa Hidrográfico de Chile, Departamento de Recursos Hidráulicos, CORFO, 1971.
- Ref. 9 Mapa Geológico del Norte Grande de Chile, Escala 1:1.000.000, del Servicio Nacional de Geología y Minería, 2003.
- Ref. 10 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. 11 Cartas Geológicas de Chile, escala 1:250.000, Hojas Toconao, 1982 y Río Zapaleri, 1985, de los autores Gardeweg y Ramírez, Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Ref. 12 Actas del II Simposio Internacional de Estudios Altiplánicos: El Altiplano, Ciencia y Conciencia en Los Andes, Biblioteca Digital Universidad de Chile, 19 al 21 de Octubre, Arica, Chile, 1993.
- Ref. 13 Disponibilidad de Recursos Subterráneos en el Sistema Tuyajto, II Región de Antofagasta. Preparado por GeoAguas Consultores para Exploraciones Mundo S. A., 2007.
- Ref. 14 Evaluación de Impactos Hidrológicos Producto de la Extracción de Agua Subterránea Proyecto Pampa Colorada. Preparado por Water Magement Consultants Ltda. para BHP Billiton – MEL, 2006.
- Ref. 15 El Clima del Altiplano y los Recursos de Agua Subterránea en el Norte Grande de Chile, S. Kampf, Dirección General de Aguas, 1999.

- Ref. 16 DGA, Geología de los depósitos andinos, provincia de Antofagasta, Chile. Universidad de Chile (2003).
- Ref. 17 DGA, Estudio de Disponibilidad Subterránea Cuencas Localizadas entre el Límite de la II Región y la Cuenca del Copiapó, DICTUC S.A. (2007).
- Ref. 18 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 las cuencas del sistema piloto de esta Región no se contó con estaciones fluviométricas ni pluviométricas en la zona, así como tampoco con registros de temperatura ni evaporación. Los valores entregados en mapas de isolíneas se determinaron interpolando o extrapolando los datos existentes a la fecha de su elaboración.

Por otra parte, las hoyas hidrográficas del Sector Pampa Colorada se encuentran insertas en el área de cuencas 'Endorreicas entre Cuencas Fronterizas y Salar de Atacama' o 'Puna de Atacama' (ROL 024). De acuerdo a la definición establecida en el presente estudio (ver Parte I: Hidrografía Regional del Altiplano), la comparación queda establecida como sigue (ver Figura 3.1).

Primero, las cuencas se encuentran mayoritariamente en el sector 'Puna de Atacama' (ROL 024), a excepción de la parte noroeste del Salar de Aguas Calientes 2 que está en el área del Salar de Atacama (DGA ROL 025).

En segundo lugar, la cuenca DGA 'Laguna de Tuyajto' (ROL 0246) coincide con la planteada en este estudio, mientras que la cuenca 'Laguna Tuyajto Chico y Salar de Laco' (ROL 0245) incluye las cuencas Salar El Laco, Pampa Colorada, Pampa Las Tecas y Sub Laguna Jeche del presente estudio (Figura 3.1).

La cuenca del BHCh (DGA, 1987) llamada 'Salar de Aguas Calientes y Alto del Lari' (ROL 0242) incluye a las cuencas altiplánicas Puntas Negras, Cerro Coquema y casi completo el Salar Aguas Calientes 2. Además de estas tres unidades, en sus límites se cuenta parte de la hoya Salar de Loyoques o Quisquiro.

En las cuencas de esta zona que no pertenecen al sistema piloto (Sector Pampa Colorada), también existen similitudes y diferencias como las presentadas en los párrafos anteriores, sin embargo, no son descritas aquí dado que no es el objeto de este documento.

La Figura 3.1 muestra la ubicación de las subcuencas de la DGA, así como las definidas en este estudio (Parte 1).

460625 COPIA



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

En el documento en revisión no se estableció valores de balance para las subcuencas, como en los demás sistemas piloto de las Regiones en estudio. En la Tabla 3.1 se muestran los componentes del balance hídrico para la cuenca 'Puna de Atacama' (ROL 024).

Cuenca	Área (Km²)	Precipitación (mm/año)	Evapotranspiración (mm/año)	Evaporación Lag Salares (mm/año)	Escorrentía (mm/año)
Puna de Atacama	5.050	192	137	53,3	0

Tabla 3.1: 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 fue obtenida restando a la precipitación la evapotranspiración y la evaporación desde lagunas y salares.

El estudio DGA (1987) 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 una fuente de información tanto para el estudio del comportamiento de los recursos hídricos como por las metodologías aplicadas en el análisis.

3.2.2 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.

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.

Laguna Tuyajto: Sus principales características morfométricas y climatológicas de la cuenca según el estudio son:

- Altura: 4.410 msnm
- Superficie de la cuenca: 245 km²
- Superficie de la laguna: 2,9 km²
- Precipitaciones: 180 mm/año
- Evaporación potencial: 1.500 mm/año (salar)
- Temperatura: 1° C

La única alimentación visible es un río en bofedal con varias ramas que drenan el sector oriental de la hoya de drenaje. El agua de este río tiene una salinidad elevada (66.000 g/L STD), probablemente por antiguas salmueras de origen desconocido, mientras que la laguna es una salmuera (131.000 mg/L STD) propiamente tal, lo que hace descartar su interés para cualquier uso doméstico y/o agrícola.

El volumen infiltrado, estimado mediante el balance hídrico usando el cloruro como elemento conservativo, entregó un valor de 5 L/s. Por su parte, el valor estimado de aporte superficial fue de 112 L/s, tasa que no fue observada en terreno, por lo que se cree corresponde a un flujo de las mismas características del río que ingresa a la laguna de forma subterránea.

Salar El Laco: Las principales características morfométricas y climatológicas señaladas en el estudio son:

- Altura: 4.250 msnm
- Superficie de la cuenca: 306 km²
- Superficie del salar: 16,2 km²
- Superficie de las lagunas: 2,2 km²
- Precipitaciones: 200 mm/año
- Evaporación potencial: 1.500 mm/año
- Temperatura: 1° C

El salar es de tipo playa, con lagunas poco profundas, y es descrito como parte de un megagrupo del tipo sulfatado. Las aguas de aporte que se caracterizaron es típica de aquellas que drenan rocas volcánicas con azufre (o mineralizaciones) o terrenos volcano-sedimentarios, lo que no contradice lo que se sabe de la litología de la cuenca. La calidad de sus recursos hídricos se consideró buena para su aprovechamiento.

Una aproximación al balance hídrico de la laguna principal del salar, considerando que su principal alimentación proviene del sector occidental y se desconocen las variaciones interanuales de su superficie se hizo usando el cloruro como elemento conservativo. De aquí que se estimó una infiltración de 1,5 L/s y los aportes son de 92 L/s. Estos últimos serían a través de napas que alimentan el salar, ya que no se encontraron afluentes superficiales.

Salar de Aguas Calientes 2: El principal aporte superficial es el Río Pili por el norte. Otro aporte importante es la Quebrada Chamaca, que del mismo modo que el Pili, forma unas vegas antes de desembocar en el salar. El salar es descrito del tipo playa, con varias lagunas en su interior, siendo la más importante la Aguas Calientes, en el sur. Las principales características morfométricas y climatológicas señaladas en el estudio son:

- Altura: 4.200 msnm
- Superficie de la cuenca: 1.168 km²
- Superficie del salar: 134 km²
- Superficie de las lagunas: 9 km²

- Precipitaciones: 150 mm/año
- Evaporación potencial: 1.500 mm/año
- Temperatura: 1° C

Las vertientes catastradas en este estudio se encontraron en las orillas del salar, y tienen un alto contenido de salinidad: 4 salobres (2.530 mg/L < SDT < 5.930 mg/L) y una salada (13.600 mg/L SDT). La única laguna muestreada es también salada (11.500 mg/L SDT). Las aguas de aporte no corresponderían a la litología superficial de la cuenca, ya que en su mayoría pertenecen a la vía evolutiva cálcica, lo que no se encuentra en los terrenos sedimentarios del mapa geológico. Las altas salinidades de los aportes se atribuyen a antiguas evaporitas (halita y yeso) que se encuentran cubiertas por otras unidades en superficie.

Considerando solamente la laguna muestreada, se estimaron los aportes por balance hídrico en 385 L/s.

El estudio revisado es importante por la cantidad de antecedentes que aporta en toda la zona del Altiplano, donde se desarrolla la mayoría de las cuencas endorreicas abordadas, sin embargo, es analizado desde una perspectiva geoquímica y no hidrogeológica, y las conclusiones que aquí se alcanzan debiesen ser utilizadas como referencias para otras interpretaciones.

3.2.3 Cartas Geológicas de Chile, escala 1:250.000, Hojas Toconao, 1982 y Río Zapaleri, 1985, de los autores Gardeweg y Ramírez, Servicio Nacional de Geología y Minería.

Las cartas geológicas mencionadas consisten en un levantamiento geológico de superficie para la zona de estudio, en la Puna de Atacama, donde se emplazan las cuencas piloto de la II Región de Chile. La información contenida en las cartas geológicas ha sido fundamental para el levantamiento hidrogeológico del sistema de cuencas piloto.

Ambos mapas geológicos han sido digitalizados mediante el método de trazado y unión de polígonos. Esto permite contar con un respaldo digital de la geología de superficie, que cuantifica las áreas de cada polígono. Además, se crean respaldos digitales extraídos del mapa geológico para estructuras geológicas, lineamientos y toponimia. El mapa digitalizado es una herramienta base que se utiliza constantemente y de forma específica para las descripciones geológicas, geomorfológicas y geoquímicas, así como también para el análisis de recarga del sistema de cuencas piloto.

Por otra parte, las cartas geológicas aportan antecedentes geológicos y geoquímicos relacionados con la estratigrafía, el ambiente de sedimentación y el régimen tectónico de los

afloramientos existentes en la zona. Se han diferenciado y descrito exhaustivamente las unidades estratigráficas y los depósitos no-consolidados, al igual que los escasos afloramientos de rocas intrusivas. La agrupación de información contenida en ambas cartas es la que permite definir y caracterizar a la geología superficial del sector de la Puna, que resulta fundamental para reconstruir la geología de sub-superficie, correlacionar el quimismo de las rocas con los análisis hidroquímicos recolectados de aguas y definir la hidrogeología del sector.

La carta geológica Hoja Toconao limita al sur (24° S) y al este con la Hoja Río Zapaleri (67° 30′ W). Como consecuencia, existe un cuadrante en el sector sur de la cuenca Laguna Tuyajto que no cuenta con una descripción geológica superficial oficial. Se ha recurrido a imágenes satelitales Landsat ETM+ (NASA, 1999) para completar la información requerida por el presente estudio.

3.2.4 Actas del II Simposio Internacional de Estudios Altiplánicos: El Altiplano, Ciencia y Conciencia en Los Andes, Biblioteca Digital Universidad de Chile, 19 al 21 de Octubre, Arica, Chile, 1993.

Los objetivos de este Simposio fueron evaluar el conocimiento adquirido hasta esa fecha sobre la región altiplánica, definir las áreas de investigación y desarrollo más importantes y fomentar la realización de proyectos de investigación cooperativos, interdisciplinarios e internacionales.

Las grandes áreas temáticas del conocimiento cubiertas por este Simposio fueron: Ciencias de la Tierra y Minería, Clima y Recursos Hídricos, Ecosistemas Acuáticos, Recursos Edáficos, Flora, Fauna, Antropología y Biomedicina y Fisiología de Altura. Las actas se estudian en las etapas iniciales del Proyecto, con el objetivo específico de tener una primera aproximación para abordar los objetivos del presente estudio.

- Ciencias de la Tierra y Recursos Mineros y Energéticos en el Altiplano Chileno, R. Charrier.
- Geología y Tectónica del Altiplano Chileno; R. Charrier y N. Muñoz: Presenta una descripción de la evolución geológica y tectónica del Altiplano chileno y discute el significado, para comprender su alzamiento, de un sistema de fallas inversas con vergencia al Oeste, detectado en el borde occidental de la zona. Sus contenidos se abordan y se citan en el apartado "Geología Estructural" del presente estudio.
- Aspectos Generales del Clima en el Altiplano Sudamericano; P. Aceituno: Se describen las principales características del clima en el Altiplano sudamericano, que asocia los efectos de la altura como la principal determinante de las condiciones climáticas de esta región.
- Geoquímica de aguas en el Altiplano, una Aproximación; H. Alonso.

3.2.5 Disponibilidad de Recursos Subterráneos en el Sistema Tuyajto, II Región de Antofagasta. Preparado por Geo-Aguas Consultores para Exploraciones Mundo S. A. (EMSA), 2007.

El estudio se realizó para determinar la disponibilidad y distribución de aguas subterráneas en las cuencas Laguna Tuyajto, Pampa Colorada y Pampa Las Tecas.

Dos premisas metodológicas se utilizaron para su desarrollo: la primera consistió en considerar el sistema en equilibrio en el largo plazo y la segunda en una evaluación de mínima incertidumbre. La consideración de equilibrio en el largo plazo se traduce en que en un largo periodo de tiempo los caudales de entrada son iguales a los caudales de salida del sistema. Esto permite evaluar las recargas conociendo bien las descargas. La evaluación de mínima incertidumbre busca contabilizar lo más precisamente las salidas del sistema, dado que hacerlo con las entradas es más complejo y conllevaría mayores incertidumbres.

Las salidas en la zona de estudio (Figura 3.2) se resumen en salidas por evaporación (R1) desde la cuenca Laguna Tuyajto, más descarga subterránea hacia otras cuencas, a la cuenca Incahuasi ubicada al sur (R2) y a la cuenca Aguas Calientes 3 ubicada al poniente (R3). Para la evaporación se caracterizó la variación de su valor potencial medio anual con la altura, así como los tipos de suelo, que definen parte del proceso en las napas y la profundidad de extinción. Para el traspaso entre cuencas se requirió conocer las secciones de paso, así como los gradientes del agua subterránea. Cuando los flujos son turbulentos, como es el caso de la zona de estudio, se requiere aplicar correcciones a los métodos tradicionalmente usados, para considerar las condiciones de régimen impermanente y no lineal de la situación.

Los métodos que se utilizaron para medir la evaporación fueron lisímetros y microlisímetros. Las curvas de evaporación v/s profundidad se ajustaron usando lo propuesto por Grilli y Vidal (1986), en que los tipos de suelo (sulfatos, carbonatos y costra de cloruros) y profundidades de la napa se obtuvieron con el desarrollo de numerosas calicatas en la vecindad de la Laguna Tuyajto.

El estudio de las precipitaciones, por su parte, se hizo considerando un análisis regional, en el que se utilizaron estaciones DGA en territorio chileno y otras estaciones al este de la zona de estudio, en territorio argentino. Al no haber estaciones en la zona misma de estudio, se generaron series sintéticas para ésta, relacionando precipitación con cota media de terreno para la cuenca estudiada.

Para sustentar los trabajos, se realizaron importantes campañas de terreno orientadas, entre otras cosas, a instrumentalizar la zona. Dentro de los dispositivos instalados, además de los

lisímetros y microlisímetros mencionados, se encuentran una estación meteorológica (El Laco), evaporímetros, pluviómetros, un limnímetro, malla de piezómetros y ruta de nieve. También se obtuvieron muestras de agua para análisis químicos e isotópicos, se hizo un levantamiento topográfico y mediciones de infiltración en el suelo.



Fuente: [Geo-Aguas Consultores, 2007]

Figura 3.2: Esquema de caudales salientes propuesto en el estudio

En el estudio se sintetiza también aspectos de la geología regional, contextualizándola primero en el marco del Altiplano, conocido en esta zona como Puna de Atacama. El análisis geológico local incluye trabajos de campo y una descripción completa de la zona de estudio, tanto a nivel de superficie como de subsuperficie. Esto último se concluyó con un trazado y descripción de perfiles estratigráficos y la definición de los límites hidrogeológicos, que definen zonas impermeables y aquellas por las cuales se produce el traspaso de aguas entre cuencas (Figura 3.3).

Desde el punto de vista químico, se analizaron aguas provenientes de piezómetros, pozos de investigación, afloramientos de aguas superficiales, vertientes y lagunas, además de aguas provenientes de lluvia y nieve. Independiente de la procedencia de las aguas, la mayoría de las muestras son cloruradas sódicas, con una mineralización típica de aguas de circulación

regional, que produce concentraciones relativas de los iones mayoritarios independientes de la geología de la zona.



Fuente: [Geo-Aguas Consultores, 2007]

Figura 3.3: Límites hidrogeológicos del dominio de estudio

En Pampa Las Tecas, las aguas subterráneas muestran una componente aniónica más bicarbonatada y una componente catiónica hacia el calcio y magnesio, mostrando una circulación más local. Esta cuenca sería una de las que recibe recarga directa que se drena a otras zonas del área de estudio.

En base a la información de salinidad (STD) de las aguas muestreadas y analizadas a nivel superficial y subterráneo en cada cuenca, se construyó un modelo conceptual de los flujos, tal como se muestra en la Figura 3.4. Este modelo obedece a los resultados de la química e isotopía, señalando que existe circulación de aguas subterráneas desde la cuenca Salar El Laco hacia el oeste, en un continuo, que culmina en el Salar de Capur y que también es coherente con los gradientes hidráulicos observados. La cuenca Laguna Tuyajto drenaría aguas también hacia el sur, a la cuenca Salar de Incahuasi.

460625 COPIA



Figura 3.4: Esquema de circulación de las aguas subterráneas representando las salinidades (STD) de vertientes, afloramientos y pozos.

Hidrogeológicamente, los acuíferos se definieron como albergados en rocas volcánicas y volcanoclásticas fracturadas, con diferentes permeabilidades primaria y secundaria. Hay evidencias de conexión entre las hoyas hidrográficas estudiadas, incluso entre algunas que están fuera del área de interés del estudio. A pesar de la cantidad de información levantada, sigue existiendo incertidumbre sobre las características de las secciones de paso de los flujos, debido en gran medida a las limitaciones de acceso.

Las unidades hidrogeológicas se estructuraron en 6 capas, de acuerdo a lo presentado en la columna estratigráfica generalizada de las cuencas Tuyajto, Pampa Colorada y Pampa Las Tecas. Su potencia observada alcanzó los 300 m. La Figura 3.5 muestra el perfil mencionado y las unidades se enumeran a continuación, desde la más superficial a la más profunda.

- Unidad Sedimentaria No Saturada: sedimentos aluviales, arenas y gravas limo-arcillosas no consolidadas. No están saturados y presentan una alta permeabilidad. Su potencia varía entre 20 y 80 m, con espesores mayores en depocentro de cuencas.
- Unidad volcánica No Saturada: tobas andesíticas y dacíticas no saturados, con permeabilidad media a baja, condicionada por el grado de fracturamiento. Sus espesores varían entre 5 y 40 m.
- Unidad de Permeabilidad Baja: presenta poco desarrollo y se observa sólo en Pampa Las Tecas y Colorada. Su potencia se estimó en 20 m y permeabilidad del orden de 10⁻² m/d.
- Unidad de Permeabilidad Baja a Media: con una amplia extensión se asocia a tramos de roca fresca con escaso fracturamiento, con espesores de 100 m y permeabilidades entre 0,5 y 5 m/d. La porosidad efectiva medida es de 5%.
- Unidad de Permeabilidad Media a Alta: lavas y tobas con amplio desarrollo y fracturamiento que van de intenso a moderado. La permeabilidad testeada se encuentra mayoritariamente entre 10 y 30 m/d. La potencia varía entre 50 y 150 m.
- Unidad de Permeabilidad Alta: rocas con intenso fracturamiento o delgadas capas de sedimento, con permeabilidades sobre 50 m/d. Sus potencias reducidas no sobrepasan los 10 m.

Las unidades presentadas muestran distinto grado de porosidad y fracturamiento, siendo este último factor determinante en la permeabilidad. Los sondeos TEM hechos en las zonas límites de cuencas hidrográficas corroboran la continuidad de estratos y niveles de agua, dando más evidencias de su conexión hidrogeológica. A pesar de esto, en las zonas más abruptas topográficamente, este método geofísico no puede ser implementado, por lo que no se cuenta con información detallada sobre permeabilidad y niveles saturados en estos sectores.



Fuente: [Geo-Aguas Consultores, 2007]

Figura 3.5: Columna estratigráfica generalizada de la zona de estudio.

En particular, los trabajos que se realizaron para determinar las secciones de paso entre las cuencas Laguna Tuyajto y Salar de Aguas Calientes 3 (N-S), así como con Salar de Incahuasi (E-W, Callejón de Caco), incluyen 3 perfiles geoeléctricos para cada una.

El perfil geofísico en la sección transversal entre Laguna Tuyajto y Salar de Aguas Calientes 3, tiene un ancho promedio de 1.500 m y una profundidad saturada variable entre 350 y 300 m. Para la sección entre Laguna Tuyajto y Salar de Incahuasi el ancho promedio de los perfiles geofísicos varió entre 1.000 y 4.000 m, con una potencia media saturada de 350 m.

El gradiente hidráulico se estimó para varias de las cuencas del sector, en las que Exploraciones Mundo S.A. (EMSA) ha construido y habilitados pozos de bombeo, observación y reconocimiento. Los gradientes estimados para las secciones de interés son:

Laguna Tuyajto – Salar de Aguas Calientes 3: 1,2 E-02 Laguna Tuyajto – Callejón de Caco: 9,3 E-03

Los parámetros hidráulicos se determinaron mediante pruebas de bombeo de corta duración (12 y 24 horas) en primer término y luego con otras de larga duración (20 días). Estos últimos se realizaron en Pampa Las Tecas y Colorada, mientras que los primeros incluyeron también a Pampa Amarilla (cuenca Tuyajto). Los valores de transmisividad estimados varían entre 217 m^2/d en Pampa Amarilla y 10.400 m^2/d en Pampa Colorada. Los coeficientes de almacenamiento en las mismas zonas varían entre 6,5 E-02 y 1,5 E-05, ambos en Pampa Colorada, mostrando condiciones de acuífero libre a semiconfinado.

Para estimar la recarga, como se señalara anteriormente, se evaluaron las descargas. La profundidad de la napa, hasta un máximo de 3 m, se obtuvo realizando numerosas calicatas en la vecindad de la Laguna Tuyajto, que fueron posteriormente interpoladas para tener isopiezas continuas. La profundidad de extinción se determinó con la información de lisímetros.

Las características de los suelos, que también afectan el proceso de la evaporación, se obtuvieron con la integración de información a partir de imágenes satelitales, geología, construcción de piezómetros, lisímetros y medidas de conductividad eléctrica. De aquí se catalogaron en 3 tipos (Figura 3.6), donde las vegas caen dentro del segundo de éstos:

- costra de cloruros.
- sulfatos, en material granular, tamaño limo-arcilla, no consolidado, y
- carbonatos, en estratos finos de limo y arcilla medianamente compactados.

Para los valores de evaporación en superficie se aplicó relleno y extensión de sus estadísticas a las estaciones de Peine y Socaire. Las series sintéticas sirvieron para obtener datos del fenómeno a la cota en que se desarrolló el estudio, cruzando la información con la medida en las campañas de terreno. Con la comparación del mes de diciembre de 2006 (periodo de retorno 10 años), se estimaron para los distintos suelos, tasas de evaporación en superficie y profundidad de extinción. Finalmente, las curvas de evaporación utilizadas fueron las presentadas a continuación:

$$E(z) = E_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot Z) \qquad \text{y}$$

$$E(Z) = E_0 \qquad \qquad \text{Si} \quad 0 \le Z \le Z_0$$

$$E(z) = E_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot (Z - Z_0)) \qquad \qquad \text{Si} \quad Z \ge Z_0$$

Los valores de evaporación en superficie y profundidad de extinción se muestran en la Tabla 3.2.



Fuente: [Geo-Aguas Consultores, 2007]

Figura 3.6: Zonas de evaporación consideradas en el sistema Tuyajto

Tabla 3.2: Tasas de evapor	ación y profundi	dades de extinción	adoptadas.
----------------------------	------------------	--------------------	------------

Zona	Tasa de Evaporación (mm/d)	Prof. Extinción (m)
Costra de cloruros	3,75	0,13
Carbonatos	4,9	2,6
Sulfatos	6,2	1,13
Vegas	3,7	0,1

Fuente: [Geo-Aguas Consultores, 2007]

La recarga generada sintéticamente y luego de restar a la evaporación la precipitación, entregó un valor de largo plazo conservador (menor de los perfiles sintéticos) de 257 L/s.

La recarga estimada indirectamente determinando las descargas hacia otras cuencas, se aproximó usando la siguiente ecuación de flujo no lineal (Dupuit-Forchheimer, Pérez-Franco), debido a las condiciones del escurrimiento producidas por los gradientes hidráulicos.

$$I = \frac{Q}{L \cdot T_D} + \frac{Q^2}{L^2 \cdot T_T^2}$$

en que *I* es el gradiente, *Q* el caudal pasante, *L* el ancho de la sección, T_D la transmisividad darciana y T_T la transmisividad turbulenta. Los valores de transmisividad, ancho de la sección y gradiente hidráulico para el traspaso desde la cuenca Tuyajto a las cuencas Aguas Calientes 3 e Incahuasi se presenta en la Tabla 3.3. Las anchos de sección presentados en la Tabla 3.3 corresponden a las medianas de trapecios (secciones transversales de flujo) trazados usando

una proyección de los contactos impermeables definidos por la geología, con base inferior horizontal a la cota 3.500 msnm y base superior horizontal en la cota del nivel freático. Los perfiles TEM realizados en esta zona ocupan un ancho de aproximadamente un tercio de la base mayor del trapecio y, en profundidad, unos 50 m menos que la cota de 3.500 msnm fijada como base inferior. Respecto de los gradientes utilizados, se consideró un valor que difiere del presentado en los capítulos precedentes del informe, y puesto en las páginas anteriores de esta revisión. El valor del caudal estimado, como se reconoce también en el informe revisado, es fundamental, y agregaríamos sensible, para la determinación del caudal saliente.

1			232	
Entre Tuyajto y cuenca	Gradiente Promedio	Ancho sección (m)	T-turbulento (m ² /d)	T-darciano (m²/d)
S. de Aguas Calientes 3	0,0203	3.000	169	975
Salar de Incahuasi	0,0066	2.500	169	975
Salar de Incahuasi	0,0066	2.500	169	975

Tabla 3.3: Propiedades de la sección de transición entre la cuenca L. Tuyajto y sus vecinas.

Fuente: [Geo-Aguas Consultores, 2007]

Finalmente, los caudales calculados usando estos datos fueron de 482 L/s hacia Aguas Calientes 3 y de 152 L/s hacia Incahuasi.

De este modo, la recarga total es igual a la suma de las recargas estimadas por evaporación menos precipitación, más la descarga hacia las cuencas vecinas, lo que da un total de 891 L/s, correspondiente al valor de largo plazo para el sistema conformado por las cuencas Laguna Tuyajto (con subcuenca Pampa Amarilla), Pampa Colorada y Pampa Las Tecas.

Para verificar el resultado, se planteó estimar los caudales salientes desde Aguas Calientes 3 (AC3) como medida de las entradas desde Tuyajto. Estas salidas son: subterráneamente hacia Capur y por evaporación menos precipitación. El procedimiento fue idéntico al aplicado en Tuyajto. La recarga por precipitación se realizó usando coeficientes de infiltración que varían entre 4 y 20%, aunque se desconoce la fuente con la que se definieron estos valores y cómo se aplicaron a las precipitaciones estimadas. El factor de infiltración supuesto para AC3 fue de 18%. Sin necesidad de estimar el caudal pasante hacia Capur, se determinó que el caudal saliente desde AC3 por concepto de evaporación menos precipitación superaba lo estimado como salida subterránea desde Tuyajto hacia el este, lo que validaría el resultado obtenido anteriormente.

De esta forma, el modelo conceptual indica aportes desde El Laco a las cuencas Las Tecas y Colorada, a través de las zonas permeables que se aprecian en la Figura 3.3, con un fondo impermeable no identificado y situado como horizontal a una cota de 3.500 msnm. La geometría del terreno quedó definida por la topografía de las tres hoyas hidrográficas de interés.

3.2.6 Evaluación de Impactos Hidrológicos Producto de la Extracción de Agua Subterránea Proyecto Pampa Colorada. Preparado por Water Management Consultants para BHP Billiton – MEL, 2006.

Este Estudio de Impacto Ambiental (EIA) somete a evaluación el proyecto "Suministro de Agua Pampa Colorada", que consiste, de manera general, en la extracción de aguas subterráneas desde acuíferos de cuencas altoandinas al este del Salar de Atacama, para abastecer los procesos productivos de Minera Escondida Ltda. (MEL). Sin duda, este es el antecedente más completo del que se dispone en la zona, dado que fue enfocado a la exploración y modelación hidrogeológica de la misma zona de estudio abordada en el convenio DGA – PUC.

Según el documento, la zona Pampa Colorada comprende cinco subcuencas, denominadas Pampa Loma Amarilla, Pampa Puntas Negras, Pampa Amarilla, Pampa Colorada y Pampa Las Tecas, con una superficie estimada de 825 km².

Desde una perspectiva hidrogeológica, se resume que los acuíferos del área de estudio, están compuestos mayoritariamente por acuíferos profundos alojados en depósitos volcánicos fracturados, donde el basamento impermeable está poco definido.

La operación se realizaría con un número de pozos entre 25 y 35, ubicados en las subcuencas Pampa Colorada, Pampa Las Tecas y Pampa Puntas Negras, por un total máximo de 1.027 L/s (Figura 3.8). Este corresponde a un escenario modificado respecto de lo planteado originalmente, para evitar la afectación de los humedales protegidos que se encuentran en Laguna Tuyajto y Salar de Aguas Calientes 2 (sector sur). Los derechos de agua se encuentran aprobados, sin embargo, su extracción no es factible hasta que se aprueben los permisos ambientales por los cuales se realiza este EIA.

Para efecto de realizar las obras, en el área se ha levantado una línea base de la que se detallan a continuación algunos aspectos de interés para el presente estudio realizado por el convenio DGA-PUC (DIHA).

Clima y Meteorología

De acuerdo a la clasificación de Köeppen, en la zona se desarrollan dos grupos climáticos: Árido o Desierto Normal (BWk) y Frío de Tundra por Altura (ETH). Las precipitaciones en el área de estudio están influenciadas por estar cerca de la transición entre dos regímenes. Por una parte el régimen de precipitaciones que predomina en la costa oeste del hemisferio sur, los sistemas frontales generados en el Pacífico, y por otra la influencia tropical de la cuenca del Amazonas, que produce tormentas en verano. También debe tomarse en cuenta la presencia de 460625 COPIA



Figura 3.7: Ubicación del Sector Pampa Colorada y de subcuencas estudiadas en el EIA.



 Fuente: [WMC, EIA Pampa Colorada, 2006]

 Figura 3.8: Pozos de bombeo de Exploraciones Mundo S. A. y derechos otorgados

El Niño, fenómeno que se produce con una frecuencia variable de 4 a 7 años, y que consiste en el desplazamiento de la corriente fría de Humboldt por la corriente cálida ecuatorial que aumenta las precipitaciones en estas latitudes.

Geología y Geomorfología

En términos regionales se tiene que el Salar de Aguas Calientes 2 se encuentra en el Complejo Volcánico de la Puna y Altiplano, una importante provincia volcano-tectónica, constituida por grandes volúmenes de volcanismo ignimbrítico, desarrollado desde el Mioceno superior al Reciente.

Por su parte, Laguna Tuyajto tiene en su margen oriental depósitos lacustres con gravas y arenas con intercalaciones volcanoclásticas y con fauna continental fósil. Al sur de la laguna existen depósitos de Ignimbrita Patao, de color gris claro, escasos cristales y bien soldada.

Para obtener más antecedentes sobre la geología subsuperficial en las cuencas de estudio, WMC amplió la información de perfiles TEM realizados por Exploraciones Mundo S. A. (EMSA) previamente. Así, se contó con 120 km de perfil correspondientes a 273 sondeos del tipo mencionado anteriormente. A partir de esta labor se definieron 5 unidades geo-eléctricas, donde las 2 capas más profundas (4 y 5) se encuentran sólo en Pampa Colorada, Las Tecas y Amarilla.

Los datos obtenidos de la geofísica fueron contrastados con la información de pozos, así como con aquella obtenida de la perforación con diamantina. Esta última actividad permitió corroborar las interpretaciones TEM, así como también maximizar la caracterización espacial de las unidades hidrogeológicas, determinar porosidad y almacenamiento. Se concluyó que sólo existen depósitos volcánicos en el área, y que las intercalaciones sedimentarias son poco importantes.

Integrando la información de perforaciones y perfiles geofísicos, WMC reconoció 5 unidades litológicas para el área de estudio, las que se presentan en la Figura 3.9 y se describen a continuación. Otras 2 unidades (L1 y L2) de flujos de lava andesítica también se identificaron en los sondajes.

Unidad A. Depósitos aluviales (Qal): Está formada por sedimentos no consolidados, principalmente de tamaño de grava, y su composición varía de manera transicional, de litologías mixtas en la parte superior a un tipo litológico único hacia la base. Existe un contacto gradacional entre la base de la unidad y la parte superior de las rocas volcánicas subyacentes y, en las áreas en las cuales las rocas volcánicas subyacentes están moderadamente meteorizadas a muy meteorizadas, el contacto es difícil de establecer. La

unidad incluye toba multicomposicional y fragmentos de lava en una matriz de arena, con limo y arcillas en áreas localizadas.

Esta unidad representa la parte superior de la secuencia estratigráfica y es probable que se haya desarrollado durante un receso de la actividad volcánica y se haya generado debido a la meteorización y erosión de las rocas volcánicas preexistentes (tobas y lavas). Los flujos generados por las precipitaciones locales han transportado los sedimentos hacia los centros o áreas de baja altura (pampas) de las cuencas. Los fragmentos más angulares se encuentran en las partes más marginales de las pampas y los fragmentos más redondeados se encuentran cerca del centro de las cuencas.

Debido al limitado tamaño de las cuencas locales, se ha producido la depositación de material generalmente grueso, con una permeabilidad moderada a alta. Los espesores mayores de esta unidad se encuentran en el centro de Pampa Las Tecas (65 - 80 m) y en la zona norte de Pampa Colorada (80 m). En el centro de esta última, el espesor varía entre 20 y 40 m. En Pampa Amarilla varía entre 20 y 64 m, mientras que en Loma Amarilla entre 20 y 45 m. Tanto en Aguas Calientes 2 como en Tuyajto su espesor es más limitado, alcanzando un máximo de 13 m.

Unidad B. Toba lítica de composición andesítica (correlacionada con la Ignimbrita Tuyajto, *Qt*): Esta toba se encuentra parcialmente soldada y alterada por óxidos de hierro, y está compuesta de plagioclasa y cristales de cuarzo más alguna biotita oxidada. Esto da a la roca una apariencia andesítica. El contenido lítico aumenta especialmente en las muestras provenientes de la zona sur, lo que hace variar la apariencia de la roca a una toba lítica. En algunos sondajes, se evidencia un horizonte de arena con un espesor aproximado de 6 m, separando a esta unidad de su subyacente, lo que sugiere un evento erosional durante un periodo sin actividad volcánica. El espesor máximo registrado de la unidad fue de 90 m.

Unidad C. Toba cristalina de composición andesítica y dacítica (correlacionada con la Ignimbrita Cajón, Pc): Esta unidad corresponde a un depósito de ignimbrita compuesto por tobas andesíticas y dacíticas, intercaladas localmente con una lava verde oscuro. La toba dacítica está compuesta de cristales, fragmentos líticos y una matriz de ceniza, cuyos porcentajes relativos varían de un lugar a otro. Los minerales félsicos son principalmente plagioclasas vidriosas y tabulares y, en menor medida, ojos de cuarzo. Los minerales máficos son principalmente biotitas oxidadas y unos pocos anfíboles localizados.

Los fragmentos líticos son volcánicos, que por su color corresponderían a una composición andesítica. La matriz puede ocupar casi el 60% del volumen de la roca en algunos lugares y está totalmente compuesta de cenizas con granulometrías que van de tamaño fino a muy fino.

La unidad está presente en todos los sondajes excepto en Pampa Colorada y el norte de Incahuasi. En Puntas Negras alcanza espesores de 90 a 160 m, con valores mayores hacia el centro de la cuenca. En Loma Amarilla se adelgaza hacia el salar, con un sondaje que reporta 30 m de espesor. En Pampa Colorada y en El Laco se encuentra en el centro de la cuenca, con un espesor entre 115 y 130 m, adelgazándose hacia el noroeste hasta 49 m.

En Pampa Las Tecas alcanza un espesor entre 40 y 92 m, alcanza un espesor entre 40 y 92 m, con mayores valores hacia el centro de la cuenca. En Pampa Amarilla, el espesor es variable, con valores máximos detectados de 125 m, adelgazándose hacia el sur para llegar a 24 m.

Unidad D. Toba cristalina de composición riodacítica (correlacionada con la Ignimbrita Pampa Chamaca, Plpc, y la Ignimbrita Patao, Plp): la unidad está compuesta por una toba cristalina riodacítica, con una base riolítica que varía transicionalmente a dacítica hasta la parte superior. En la base de la unidad tiene alteración clorítica más generalizada. La roca presenta muchos ojos de cuarzo, biotitas oxidadas y anfíboles localizados y subordinados. También se encuentran presentes fragmentos líticos menores, principalmente de composición andesítica, y una matriz cristalina compuesta principalmente de cuarzo, plagioclasa y feldespato potásico subordinado.

La unidad está presente en todos los sondajes de la zona norte, con un espesor generalmente mayor que 100 m incluso en los márgenes. En un sondaje se identificó la base a 394 m, con un espesor total de 224 m. En la zona sur sólo se encuentra en Pampa Amarilla, con un espesor máximo de 159 m, adelgazándose hacia el sur con un registro de 24 m y otro sin presencia.

Unidad E: Lavas y tobas de composición andesítica (correlacionadas con los Estrato-Volcanes I, Msv): Esta unidad está compuesta por una intercalación de tobas y lavas andesíticas, localmente silicificadas. Predomina la lava y exhibe un color gris verdoso, que varía localmente a pardo rojizo debido a una alteración de óxido de hierro. Es posible reconocer algún cuarzo y plagioclasas, lo que sugiere una probable composición andesítica de la roca original. La toba muestra un color gris que varía a pardo rojizo en algunas zonas. Se encuentra alguna plagioclasa y anfíboles en una matriz localmente silicificada, aparentemente compuesta de cenizas.

La unidad corresponde a la base de la secuencia volcánica del área y sólo se identificó en los sondajes perforados en la zona sur. En Pampa Las Tecas se encontró una profundidad máxima de 160 - 170 m en el centro de la cuenca, que se reduce hacia los márgenes. En Pampa Colorada se encuentra en dos sondajes, uno a 82 m de profundidad y el otro a 150 m. En Pampa Amarilla es más profunda hacia el norte y más somera hacia el sur.



Fuente: Water Managenent Consultants Ltda. 2006

Figura 3.9: Columna estratigráfica de Pampa Puntas Negras.

Unidad L1. Lavas de composición andesítica (correlacionadas con los Estrato- Volcanes III, Plpv): La unidad está compuesta de una lava andesítica gris oscuro, que muestra finos cristales de hornblenda. La roca también muestra una epidotización moderada y una ligera cloritización y sericitización. Esta unidad sólo aparece en la parte sur de Pampa Puntas Negras, donde alcanza un espesor de 109 m.

Unidad L2: Lavas de composición andesítica (correlacionadas con los Estrato- Volcanes II, Plv): La unidad está compuesta de lavas andesíticas con cristales de plagioclasa en una matriz pardo rojizo que varía a gris. Se reconoce sólo en el área de Pampa Colorada, donde tiene un espesor mínimo de 128 m y no se identificó su base.

Hidrogeología

Los acuíferos del Sector Pampa Colorada están compuestos mayoritariamente por depósitos volcánicos y en menor medida por horizontes erosionados/meteorizados que se presentan entre algunas unidades litológicas. En general las formaciones permeables presentan continuidad, tanto en sentido vertical como horizontal, y se encuentran saturados en niveles más superficiales en las cercanías de los bofedales, donde la napa es más somera.

Los sondeos TEM indicaron que la profundidad del basamento en la zona norte (Puntas Negras y Aguas Calientes 2) no está claro, pudiendo ser superior a los 400 m. El acuífero allí es relativamente homogéneo y tiene una buena extensión lateral, especialmente en Puntas Negras. El límite este de la cuenca hidrográfica de Puntas Negras sería también un límite hidrogeológico, aunque no se descartan flujos más profundos que la conecten con las cuencas al este.

Respecto de la zona sur (Laguna Tuyajto, Salar El Laco y Pampas Colorada y Las Tecas), los perfiles de resistividad indicaron que sólo está definido el basamento en el sector sur de Pampa Colorada, donde hay una profundidad de 300 a 400 m bajo la superficie del terreno. Al igual que en el sector norte, el acuífero es relativamente homogéneo y tiene una buena extensión lateral, especialmente en Pampa Las Tecas e Incahuasi. El basamento tampoco queda bien definido, pudiendo estar bajo los 400 mbns. En el límite de las cuencas Laguna Tuyajto e Incahuasi no se detecta una divisoria de agua subterránea, infiriéndose un flujo de norte a sur. Además, la continuidad observada en los estratos, así como la del agua subterránea, sugiere que existe un flujo entre Pampa Colorada y Las Tecas, y Las Tecas y Amarilla (Laguna Tuyajto). El flujo entre las cuencas Pampa Colorada y Laguna Tuyajto estaría limitado por el espesor de los acuíferos.

La observación de los niveles estáticos de los pozos construidos para la exploración del área indicó que las mayores variaciones se encuentran en Loma Amarilla (12 a 136 m), mientras que las menores variaciones se observaron en Pampa Puntas Negras (40 a 130 m).

A pesar de aparecer hidrográficamente como cerradas, las cuencas de Pampa Puntas Negras, Pampa Colorada y Pampa las Tecas no presentan aguas superficiales ni evaporitas. Las perforaciones que se realizaron durante el estudio no identificaron depósitos salinos ni lacustres en estas zonas y, dado que reciben alguna recarga, su descarga es a través de aguas subterráneas hacia cuencas vecinas.

Observando los datos recopilados, WMC concluye que existe una conexión hidrogeológica desde Pampa Puntas Negras a Pampa Loma Amarilla (Salar de Aguas Calientes 2) y hacia el norte. Otro flujo de carácter regional se produce desde Pampa Colorada hacia Pampa Las Tecas y Pampa Amarilla (cuenca Laguna Tuyajto), y desde Pampa Amarilla (Laguna Tuyajto) a las cuencas Salar de Incahuasi y Salar de Aguas Calientes 3 (Figura 3.10).

Los niveles estacionales del agua subterránea no mostraron cambios significativos, lo que si ocurrió a nivel diario, lo que WMC atribuye a efecto de cambios de presión y/o mareas.

En Salar de Aguas Calientes 2 se encontró profundidades máximas de la napa de 24,6 m, mientras que en Laguna Tuyajto éstas fueron de 19,4 m.

Las descargas del agua subterránea se producen a través de evaporación en las áreas en las que las napas freáticas se aproximan a la superficie (cerca de salares) y por descarga de las vertientes en Laguna Tuyajto, salares de Aguas Calientes 2, El Laco, Aguas Calientes 3 / Talar e Incahuasi.

Se realizaron pruebas de bombeo de largo plazo, para conocer el área de influencia de la explotación. Estas pruebas tuvieron una duración programada de 30 días, donde se seleccionaron dos pozos para las cuencas de mayor potencial para explotarlos exhaustivamente. La Figura 3.11 muestra el área de influencia que tuvo este bombeo observado en los piezómetros construidos por MEL para tales efectos. No se produjo interferencia entre cuencas.

Hidrología

Utilizando los datos de precipitación en una escala mayor a la que aborda el proyecto, WMC obtuvo algunas conclusiones a nivel regional. Las estaciones usadas son en su mayoría las del BNA de la DGA, además de algunas propias de MEL. Los principales resultados del estudio hidrológico WMC-MEL (2006) se listan a continuación:

- En casi todas las estaciones, el monto promedio de precipitación anual se produce en un 80% o más entre los meses de diciembre y marzo.
- Las estaciones de las que se dispuso información (en particular las de DGA) no registran precipitación nival. Estudios realizados en El Laco (Viulle, 1996), indican que a esta cota la sublimación alcanza valores del 70%, lo que indica poca disponibilidad de

escurrimientos a partir de las nieves. De acuerdo a esto, las recargas se producirían principalmente debido a las precipitaciones de verano.

• La precipitación media anual en el área de estudio se estimó entre 160 y 180 mm/año, ajustando la mejor regresión de precipitación versus altura. Estos valores son coherentes con lo planteado para la zona en el Balance Hídrico de Chile (DGA, 1987).

Al igual que con las precipitaciones, se realizó un análisis con los datos de una zona más amplia a la del estudio para caracterizar la evaporación. Los ajustes de este parámetro en función de la altura entregaron para la zona valores entre 3,0 y 3,7 mm/día.

La estación meteorológica instalada cerca de la Avanzada El Laco permitió sacar los siguientes resultados para el año 2005:

- Las temperaturas máximas se produjeron de noviembre a marzo y fueron del orden de 11 a 20° C. Las mínimas se producen de mayo a septiembre y oscilan entre -2° C y -14° C, siendo comunes durante todo el año temperaturas bajo los 0° C.
- Las velocidades máximas de viento registradas fueron de 17 m/s en los meses de invierno, con una gran variabilidad. En verano son más estables y del orden de 7 8 m/s. La dirección predominante es W, pero las mayores intensidades provienen del NW.
- Mayo a julio fue el periodo de menor humedad relativa. Febrero, abril y diciembre los de mayor. Los valores máximos alcanzan el 81% en febrero y mínimo de 6% en julio. La media mensual es del orden de 21%.
- La presión atmosférica media mensual registrada fue de 609 mb, con diferencias medias mensuales entre máximas y mínimas de 3 mb, como promedio. La máxima diaria registrada fue de 613,5 mb y la mínima de 601,3 mb.
- Con un sensor de nieve se detectaron durante 2005 tres eventos catalogados como significativos, uno durante abril (18 cm) y 2 durante septiembre (32 y 13 cm). El monto total caído durante ese año fue de 63 cm.
- Durante el periodo 16 de enero de 2005 y 1 de febrero de 2006 se registraron 515 mm de agua lluvia, concentrada de abril a julio y de septiembre a noviembre. Mayo fue el mes de mayor pluviosidad (112 mm).



Fuente: [WMC, EIA Pampa Colorada, 2006]Figura 3.10: Niveles y direcciones del flujo del agua subterránea.

460625 COPIA



Fuente: [WMC, EIA Pampa Colorada, 2006]

Figura 3.11: Área de influencia en pruebas de bombeo de larga duración. Pozos con nombre (en azul) corresponden a los seleccionados para el bombeo en cada cuenca, desde las que se extrajeron 200 L/s (aprox.) en cada una.

La evapotranspiración se determinó usando los datos registrados por la estación en el método de Penman – Monteith. La mayor evaporación se produce durante los meses de marzo, octubre, noviembre y diciembre, mientras que la menor en los meses de enero y febrero y entre los meses de abril a septiembre. La evapotranspiración potencial promedio para el área del proyecto fue estimada en 4,7 mm/día. La máxima potencial mensual fue registrada en diciembre, con 197,3 mm. La máxima potencial diaria fue de 7,5 mm en los meses de febrero y diciembre.

Los salares y lagunas son alimentados por las precipitaciones y los aportes de agua subterránea cuya variación es inestable. Estas últimas se manifiestan en afloramientos de carácter puntual o difuso. Es probable que se produzcan arroyos efímeros asociados a deshielos y después de lluvias intensas.

Utilizando imágenes satelitales Landsat 5TM para el periodo 1986-2006, se observó variaciones en el tamaño de la laguna del Salar de Aguas Calientes 2, con un mínimo en 1990 y un máximo en 2004. La Laguna Tuyajto por su parte, presentó variaciones menores en el mismo periodo, coincidiendo el año de máxima y con una mínima el año 1988. En ambas lagunas se realizó batimetría durante los meses de septiembre y octubre de 2006, reportándose un área de 252 há para Aguas Calientes 2 y de 232 há para Tuyajto. Esta última presenta un fondo menos plano que la primera.

En las mismas hoyas se realizaron aforos durante el 2006. En el sector SW de Salar de Aguas Calientes 2 se reporta un caudal promedio de vertientes y descargas difusas cercano a 120 L/s, con aportes principales desde la zona sur (~105 L/s). Los aforos efectuados en la Laguna Tuyajto arrojaron un caudal de 100 L/s desde vertientes y descargas difusas.

Hidroquímica

De manera general se señala que las aguas de Aguas Calientes 2 y Tuyajto presentaron altas conductividades eléctricas, siendo menores en la cabecera de los afluentes que alimentan las lagunas.

Las aguas subterráneas se presentan uniformes, lo que indica que no existen flujos complejos con diferentes tipos de agua, y que los acuíferos son en general homogéneos y continuos.

Se señala que los estudios de calidad del agua subterránea en Puntas Negras indican que las temperaturas de las aguas subterráneas registradas en la cuenca de Pampa Puntas Negras varían entre 12,1 y 36,4°C, con una temperatura promedio de 23,5° C. Los pozos ubicados en el margen de la cuenca exhiben temperaturas más bajas que las de los pozos ubicados en el centro de la cuenca. El pH en toda la cuenca varía entre 6,1 y 9,4.

Los pozos muestreados más cerca de los márgenes norte y este de la cuenca presentan un pH más alcalino (con un promedio de 8,2) mientras que en el centro el pH promedio es 7. Se encuentra agua subterránea salobre en el centro de Pampa Puntas Negras (2.000-3.000 mg/L) hasta 220 m de profundidad. La salinidad aumenta en función de la profundidad, alcanzando valores de 6.000 mg/L. En la zona norte de Pampa Puntas Negras ocurren flujos entrantes de agua dulce. En el margen oriental, los flujos entrantes son ligeramente salobres (2.200 mg/L en PNAR1).

Se pueden esperar flujos entrantes de agua dulce desde los márgenes sur y oriental. Los diagramas de Piper y Schoeller muestran que, en la parte central de la cuenca, las aguas subterráneas corresponden (en su mayor parte) a aguas tipo Na-Ca-Cl. En los márgenes de la cuenca, el agua es tipo Ca-Na-HCO3. En detalle se puede observar que los pozos del sector nororiental muestran una composición bicarbonatada cálcica-sódica (Ca-Na/HCO3), mientras que todos los otros pozos muestran composiciones cloruradas cálcica-sódicas (Ca-Na-Cl) con proporciones variables de Mg.

Los análisis isotópicos de las muestras y químicos de elementos menores y trazas indican que hay un flujo de carácter regional profundo entre cuencas. Las zonas más llanas o pampas reciben aportes de recarga local, mientras que las aguas más profundas, que en algunos puntos se observaron mezcladas con las más someras, reciben su recarga en zonas altas.

El análisis bacteriológico muestra que hay una alta actividad en los pozos de producción en la zona, lo que estaría produciendo rápidamente corrosión.

Estimación de la Recarga

Para estimar la recarga se utilizaron varios métodos, que dan como resultado distintas tasas de percolación profunda así como porcentajes de la precipitación total sobre el área. En la Tabla 3.4 se resume la información presentada, en que se concluye un valor entre 5 y 20%.

Método de estimación	Recarga sector norte (L/s)	Recarga sector sur (L/s)	% de la Pp
Modelación Hidrológica (HEC-HMS)	250 - 530	175 – 375	9 - 20%
Descarga agua subterránea (sin ET)	60 - 230	206 - 371	3 - 15%
Balance masa isótopos ambientales			3 - 14%
Revisión investigaciones de recarga			3 - 9%
Balances hídricos con datos estaciones			3 - 22%
Estimaciones DGA	256 (PN) – 269	151 (PC, PLT) - 226	

Tabla 3.4: Estimaciones de recarga realizados por WMC para el EIA Pampa Colorada

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 describe 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 diferentes cuencas endorreicas que componen el sistema piloto son consecuencia del relieve volcánico generado. A su vez, los relieves volcánicos son accidentes morfológicos, edificados con gran rapidez y que constituyen un relieve característico que permite la formación de las cuencas aisladas. Dada la similitud litológica y fisiográfica general de las diferentes cuencas piloto, se realiza una caracterización geomorfológica general para todo el sistema.

Los factores climáticos característicos de la Puna de Atacama, tales como las oscilaciones diarias extremas de temperatura, precipitaciones estivales, vientos constantes y de alta velocidad, entre otros, inducen a un sistema de erosión particular. Se favorece la erosión mecánica de rocas, siendo común en esta zona la presencia de grandes bloques de toba. La Puna de Atacama es uno de los lugares donde se puede reconocer con claridad los efectos de la erosión eólica, observándose ventifactos a diferentes escalas.

Las redes de drenaje se desarrollan esporádicamente, por lo que se mantienen lechos secos durante la mayor parte del año. Se preservan las formas de acumulación, tales como los conos y llanuras aluviales. Las altas temperaturas diurnas favorecen la evaporación, generando costras salinas no sólo en las depresiones, sino que también en los lechos de cursos superficiales.

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 Antofagasta

Chile presenta zonas con rasgos geomorfológicos característicos, según los cuales Börgel (1983) ha definido distintas agrupaciones regionales con unidades micro-regionales. La Región de Antofagasta está ubicada en la región septentrional de las pampas desérticas y cordilleras pre-altiplánicas, cuyos relieves se muestran en la Figura 4.1. Esta Región presenta rasgos macro-estructurales semejantes a los de sus Regiones vecinas de Tarapacá y de Atacama, compuestas por diversas unidades morfoestructurales producto de fenómenos modeladores del relieve que han tenido lugar desde el Paleógeno, siendo la de mayor relevancia el Altiplano chileno.

Esta macrounidad del relieve, presenta una variedad de unidades morfotectónicas, producto de cambios fisiográficos tanto en sentido norte sur como este oeste. Para explicar el desarrollo zonal del país, se utilizan perfiles transversales que cortan desde el nivel del Océano Pacífico hasta alturas cordilleranas que superan los 5.000 msnm. Siguiendo este patrón, se generó un perfil transversal a los 23° S, coincidiendo con el sector más ancho de Chile, entre la península de Mejillones y la frontera con Argentina, en el sector norte de la Puna de Atacama. Los perfiles permiten reconocer quiebres abruptos en la pendiente con el ascenso, y en dirección al este (Figura 4.2). Las rupturas separan niveles que corresponden a unidades micro-regionales, como las que se mencionan a continuación.

- Farellón costero
- Planicie litoral
- Cordillera de la Costa y sus depresiones internas
- Desierto de Atacama
- Pediplanos y sistemas de glacis o pediment
- Precordillera de Domeyko
- La gran fosa de los salares prealtiplánicos
- Cordones prealtiplánicos meridionales
- Depresión salares cautivos pre-altiplánicos
- Altiplano chileno

Destaca en el perfil la presencia de la Precordillera de Domeyko, que corresponde a la tercera y última sección de la precordillera andina, que se origina como un relieve de poca envergadura. Sin embargo, el efecto de las dislocaciones tectónicas pliocénicas dio paso al desarrollo de alturas sobre los 4.000 msnm (ej.: Cerro Quimal, 4.278 msnm), que en general actúan como la barrera orográfica occidental de los salares.

Las cuencas piloto de la Región de Antofagasta forman parte de las fosas orientadas norte- sur que se emplazan dentro de la unidad geomorfológica de la Gran Fosa de los Salares pre-Altiplánicos, que posee tres subdivisiones. La primera corresponde a la Depresión Longitudinal pre-Altiplánica. La segunda, de igual nombre que la unidad, se extiende desde el norte del Salar de Atacama hasta la Laguna Santa Rosa, al sur del Salar de Maricunga. Las cuencas piloto de la Región de Antofagasta se emplazan dentro de la tercera sub-unidad geomorfológica, denominada Depresión de los Salares Cautivos pre-Altiplánicos, en la Puna de Atacama, y se compone por una serie de cuencas salinas aisladas, dispersas entre los cordones andinos pre-altiplánicos. Se debe hacer notar que esta última sub-unidad se considera como parte de la unidad de la Gran Fosa de los Salares pre-Altiplánicos, a pesar de que se emplaza más al este y como parte de la unidad del Altiplano chileno.

Continuando hacia el este se encuentran los cordones prealtiplánicos, de alturas irregulares. Ubicado entre Chañaral-Visviri por el norte y Ojos del Salado por el sur, destaca su gran altura y se caracteriza por su carácter volcánico. Actúa como una barrera orográfica frente a las masas de aire amazónicas y en muchos lugares se utiliza como límite natural entre Chile y sus países limítrofes. Aísla del clima húmedo continental a los sectores áridos y semiáridos ubicados en su interior.

Finalmente, se distingue al elemento geomorfológico de primer orden que se observa en los Andes Centrales, que corresponde a la presencia de la meseta altiplánica, la segunda más alta del mundo después del Tíbet, y el más alto de origen no colisional (Isacks, 1988). El Altiplano-Puna se ubica en un territorio restringido, pero se considera una buena muestra de la morfología peneplanizada, característica de la Gran Meseta que cubre gran parte de Bolivia junto con algunas zonas de Argentina y Chile. Corresponde a un *plateau* que presenta alturas de 3.700 a 4.200 msnm. Se extiende por unos 1.800 km en forma paralela al margen continental y tiene un ancho que varía entre los 350 y 400 km. En su límite occidental se desarrolla el actual arco volcánico, el límite oriental del Altiplano está marcado por la Cordillera Oriental, que a su vez limita al este con las Sierras Subandinas. Es en este bloque elevado donde se generaron numerosas cuencas pequeñas y de carácter endorreico.

El *plateau* altiplánico o Altiplano–Puna, ubicado en Los Andes Centrales se divide en dos secciones. La sección más al norte se denomina como Altiplano, mientras que la sección de más al sur se denomina Puna. Las cuencas piloto de la II Región de Chile se emplazan en el sector denominado Puna, o Puna de Atacama. Su posición se correlaciona espacial y temporalmente con el magmatismo de arco andino, pero su alzamiento se debe en primera instancia al engrosamiento cortical como respuesta al acortamiento horizontal de una litosfera de menor densidad y mayor temperatura. Sin embargo, dicho acortamiento en la superficie sólo justifica un 70 - 80 % del engrosamiento cortical observado, sugiriendo que la adición

magmática y otros procesos, tales como el adelgazamiento de la litosfera, hidratación del manto superior, o un *underplating* tectónico, podrían contribuir significativamente al engrosamiento. El alzamiento en la región del Altiplano comenzó hace unos 25 Ma, coincidiendo con la aumentada tasa de convergencia y la disminución del ángulo de subducción inferida; el alzamiento de la Puna comienza unos 5–10 Ma después (Allmendinger et al., 1997).



Figura 4.1: Región septentrional de las pampas desérticas y cordilleras prealtiplánicas.

460625 COPIA



Perfil Región de Antofagasta (23 30')

Isacks (1988) propone un modelo de dos etapas para el desarrollo de la formación de la meseta. En una primera etapa comienza el alzamiento, hace unos 25 Ma para el segmento del altiplano y hace unos 15 - 20 Ma para el segmento de la Puna. Esto ocurre durante un episodio de subducción de bajo ángulo a casi-subducción plana (Coira et al., 1993; Kay et al., 1995), que como consecuencia adelgaza, calienta y ablanda la litosfera que subyace el área por alzarse. Para la segunda etapa, que comienza hace unos 12 - 6 Ma, el acortamiento cesa en el altiplano y migra hacia el este, mientras que para la Puna continúa hasta hace unos 1 - 2 Ma (Allmendinger et al., 1997).

Para la Región de Antofagasta se presenta a continuación los relieves volcánicos y de acumulación, que constituyen las unidades geomorfológicas en el área de estudio.

4.1.1 Descripción de Unidades Geomorfológicas

El carácter volcánico propio de estas cuencas forma relieves que exponen distintos tipos litológicos a la influencia del ambiente. Los factores exógenos tipo climático, hídrico y biológico, participan en los procesos de erosión, transporte y acumulación de los subproductos de estas rocas volcánicas. Para la caracterización conjunta del sistema de cuencas, las unidades geomorfológicas locales se dividen en: relieves volcánicos y relieves de acumulación, según el factor que influyó con mayor fuerza en su morfología.

Se describen a continuación el conjunto de unidades morfológicas que se han identificado en el sistema de cuencas piloto.

4.1.1.1 Relieves volcánicos

Las diferentes cuencas endorreicas que componen el sistema piloto, se forman y se delimitan según la disposición de las diferentes unidades de relieve volcánico que se generan, producto de la actividad volcánica neógena y cuaternaria que es característica de primer orden del sector de la Puna de Atacama. Los relieves volcánicos son accidentes morfológicos, edificados con gran rapidez, y que construyen un relieve característico que permite la formación de las cuencas aisladas.

Cordón volcánico

Relieve mayoritariamente de acumulación, formado por el conjunto de eventos volcánicos y subvolcánicos. Abarca un grupo de estrato-volcanes, conos volcánicos, coladas de lava y domos. En el sistema de cuencas piloto, se identifican dos cordones volcánicos, el Cordón de Puntas Negras, hacia el norte, y el Cordón de Chalviri, más al sur. Ambos se disponen como

una serie de centros eruptivos de orientación general WNW – ESE, ubicados en el sector occidental del sistema de cuencas.

Estrato-volcán

Cuando las erupciones de lava alternan con la expulsión de materiales piroclásticos, se forman los denominados estratovolcanes o volcanes compuestos, consistentes en la superposición de capas a base de estos materiales sólidos, es decir, cenizas, coladas de lava y otras materias.

Para su formación se requiere un largo periodo de actividad eruptiva o la repetición de numerosas erupciones en un área restringida. En una primera etapa del estrato-volcán, las lavas fluyen del mismo conducto central rellenando el cráter y desbordándose por las laderas. Al elevarse progresivamente el cono, la presión del magma no basta para que las lavas alcancen el vértice del conducto y los fundidos buscan su salida a través de fracturas, abriendo conductos próximos a la base del edificio; por esta razón la pendiente es más suave en los niveles inferiores del estrato-volcán. Las ramificaciones del conducto principal dan a su vez origen a pequeños edificios en las faldas o proximidades del estrato-volcán que se denominan conos adventicios o parásitos.

Los mejores ejemplares de la zona de estudio son los volcanes Aguas Calientes (5.924 msnm), Volcán Pili (6.046 msnm) y Puntas Negras (5.852 msnm).



Figura 4.3: Perfil esquemático de un estrato-volcán típico, donde se observa la alternancia entre depósitos de lava y piroclastos en ambas imágenes.

Cono volcánico

Un cono piroclástico es un cono volcánico que se levanta a partir de fragmentos volcánicos sueltos de tamaño ceniza (pómez, piroclastos, tefra). El edificio volcánico se construye a partir

de la eyección y acumulación de coágulos de partículas y burbujas de lava eyectados a través de un conducto único. A medida que la lava rica en gases es expulsada violentamente hacia la atmósfera, ésta se rompe en pequeños fragmentos que solidifican y decantan como ceniza alrededor del cráter, formando así un cono circular u ovalado. La mayoría de los conos piroclásticos tienen en la cima un cráter con forma de tazón. Los conos de ceniza raramente superan los 500 -750 m de potencia y, como son depósitos no consolidados, tienden a ser vulnerables a la erosión.

Domo volcánico

Los domos volcánicos son cuerpos sub-redondeados compuestos por acumulaciones de rocas incandescentes muy densas y viscosas que no son expulsadas como coladas de lava o rocas incandescentes, sino que se acumulan en cuanto extruyen, formando peñascos inestables que luego se derrumban. Los domos resisten por más tiempo a la intemperie debido a la dureza del magma enfriado.

Los mejores ejemplares reconocidos en el sistema de cuencas piloto son el conjunto de domos de orientación N-S, ubicados hacia el costado oriental del Salar de Aguas Calientes 2. Corresponden, de norte a sur, a los cerros Bola, Purifican, Arenoso, Chivato Muerto y Chamaca.

Colada de lava

En ocasiones se reconocen flujos de lava o de ignimbrita que se denominan coladas. La colada, más o menos fluida, es más rápida en las proximidades del punto de efusión que después de cierto recorrido, ya que al enfriarse se vuelve más viscosa y disminuye la velocidad hasta detenerse.

Cráter de Explosión

Son edificios volcánicos constituidos exclusivamente por grandes cráteres labrados por debajo de la superficie pre-volcánica, a partir de erupciones muy explosivas de tipo freatomagmático o freático.

Colada Ignimbrítica

Las coladas ignimbritas son rocas que se generan a partir de flujos piroclásticos densos con un alto contenido en fragmentos magmáticos juveniles y que se emplazan a temperatura elevada. Las ignimbritas se generan por colapsos de las columnas eruptivas en las erupciones plinianas, y en el de domos y coladas lávicas de viscosidad elevada. De acuerdo a la temperatura del flujo en el momento de su detención se distinguen ignimbritas soldadas o no soldadas. Estas rocas se disponen formando extensas mesetas inclinadas

Plataforma ignimbrítica

En la Puna de Atacama, los depósitos ignimbríticos se disponen formando extensas mesetas inclinadas entre 1° y 4°, preferentemente hacia el este. Rellenan también depresiones morfoestructurales. Se las reconoce, en algunos casos, formando delgadas "mesas" sobre unidades menos resistentes a la erosión (Gardeweg y Ramirez, 1985). Esta unidad se compone principalmente por las ignimbritas Atana y Pampa Chamaca, en las cuencas Salar de Aguas Calientes 2, Puntas Negras y Salar El Laco.

Domo intrusivo

Son afloramientos rocosos cristalinos, de carácter intrusivo, que dan forma a domos lisos y rocosos. La pendiente de estos domos es alta, y tienen forma parabólica.

Caldera

El término caldera lo define Williams (1941) como "una depresión volcánica grande, más o menos circular o en forma de círculo". Este es un rasgo geomorfológico generalmente más grande que un cráter volcánico, y la mayoría son producto de hundimiento o colapso. El término caldera resurgente (Smith y Bailey, 1968) define a una caldera donde el bloque hundido después de las subsidencia inicial, ha sido levantado, generalmente en la forma de un domo estructural. El domo estructural puede estar fracturado radialmente, concéntricamente, o ambos. Las calderas resurgentes comúnmente exhiben volcanismo resurgente o postresurgente a lo largo de las fracturas anulares o a lo largo de las fracturas dentro del domo estructural. La zona de fracturamiento anular parece ser la única fuente de salida de las ignimbritas, esto sugiere fuertemente la existencia de fracturas anulares pre-emplazamiento de las ignimbritas. Muchas calderas tienen actividad volcánica por la zona de fracturamiento anular aún después del hundimiento central, en contraste con la actividad puntual o centralizada de un volcán. Esto supone un bloque central intacto que se hunde y cuyos límites son las fracturas anulares. Los volúmenes de ignimbrita que salen varían de 50 a 500 km³, mientras que la duración de las erupciones que producen ese volumen de ignimbritas es desconocido. La erupción y el hundimiento son dos etapas separadas pero los procesos son concurrentes, especialmente cuando los volúmenes de ignimbrita que hicieron erupción son muy grandes.

Caldera La Pacana

La caldera La Pacana es una de las calderas resurgentes más grandes y mejor expuestas en el mundo, y fue reconocida por primera vez por Gardeweg y Ramírez (1987). Dos ignimbritas mayores parecen haberse originado a partir de la caldera La Pacana, basado en sus variaciones de espesor, distribución lateral y relaciones estratigráficas: la Ignimbrita Toconao, riolítica y

pobre en cristales (4 – 5 Ma); y la Ignimbrita Atana, dacítica y rica en cristales (4 Ma). Siguiendo al colapso de la caldera y a la formación del bloque resurgente Atana, se forman diversos domos dacíticos a riolíticos y ricos en cristales, a lo largo del margen del bloque resurgente. Este volcanismo post-caldera continúa desde los 4 a los 2 Ma, lo que indica que el sistema magmático La Pacana estuvo activo al menos durante 2 Ma, posterior a la erupción principal. La ignimbrita Atana se extiende hacia el oeste, sur y este de la caldera La Pacana. Dos afloramientos brechosos ocurren en el margen topográfico de la caldera y se interpretan como áreas de ventilación para la ignimbrita Atana. Esto implica que el margen estructural de la caldera coincide con el alto topográfico y no con el bloque resurgente, como antes se postulaba.

El centro de la caldera se ubica a los $23^{\circ}10$ 'S – $67^{\circ}25$ 'E. Gardeweg y Ramírez (1987) la definen elíptica, con un tamaño de ~60 x 35 km, con el eje mayor orientado N-S. El margen topográfico está bien definido hacia los costados este, sur y oeste. Cuando éstos se encuentran bien expuestos, el margen se describe como un acantilado compuesto por unidades precaldera, que son cubiertas por los depósitos de la Ignimbrita Atana, alcanzando relieves de hasta 1.000 m de espesor, por sobre la depresión topográfica de la caldera.

El cordón La Pacana es un elongado domo resurgente de tobas intra-caldera, que ocupa un 25% del área que se ubica dentro de la depresión topográfica. Es sub-paralelo al margen topográfico, con su eje mayor que cambia a una dirección NW en la parte norte de la caldera. Se identifican diversos domos andesíticos y dacíticos, de edades que varían entre los 2,7 - 4,8 Ma, que se reconocen a lo largo del margen del domo resurgente, y que se corresponden con depósitos que se clasifican como pre- y post-caldera.

Las áreas relativamente planas que se ubican entre el domo resurgente y el margen topográfico se describen como el foso de la caldera. Es una cuenca irregular de unos 2 - 10 km de ancho, y que rodea al domo resurgente en sus flancos oeste, sur y este. El foso está parcialmente relleno por depósitos sedimentarios que derivan de la misma erosión del domo resurgente y de las paredes de la caldera, y por rocas volcánicas post-caldera. Las partes más bajas del foso son ocupadas por salares, en donde se han depositado sedimentos aluviales, lacustres y evaporíticos (Gardeweg y Ramírez, 1987).

4.1.1.2 Relieves de acumulación

Conos aluviales

Los conos aluviales abundan en el sistema de cuencas piloto, especialmente en el sector sur, compuesto por las cuencas Laguna Tuyajto, Pampa Colorada, Pampa Las Tecas y Salar El Laco. Se reconocen por su forma en abanico y son formados producto de los cauces

torrenciales que transportan sedimentos desde las altas cumbres del cordón volcánico, y que descienden en dirección a la llanura aluvial. Dado que la pendiente disminuye drásticamente en las zonas bajas de las cuencas, la velocidad del agua también lo hace, siendo incapaz de seguir transportando los materiales y por lo tanto los deposita en la zona terminal del abanico.

Llanura fluvial

La sedimentación fluvial se produce cuando disminuye la pendiente y, por tanto, la intensidad de la corriente es menor. Los materiales son depositados por orden de tamaños: primero los grandes bloques, luego los cantos rodados, después la grava y por último las arenas y los limos. Sólo se reconoce una llanura fluvial en la cuenca Laguna Tuyajto, donde predominan los materiales detríticos de origen volcánico. Esta llanura es producto de la erosión, transporte y depositación que generan las aguas que provienen de los deshielos del Volcán Tuyajto, y que transportan sedimentos desde las altas cumbres en dirección a la llanura aluvial.

Llanura aluvial

Es el relieve sedimentario formado por el aporte de la erosión que rebaja las altas cumbres y que, mediante los cursos de agua o a través de procesos gravitatorios, deposita material detrítico en las depresiones de la cuenca. Es común que en esta zona se distingan grandes conos aluviales superpuestos a estas zonas de baja pendiente. Su composición, heterogénea y clástica, les confiere un alto potencial hidrogeológico, pues las recargas al acuífero suelen infiltrarse en estas zonas, como ocurre en todas las cuencas que componen el sistema piloto. Por este motivo, las hoyas suelen tener una red de drenaje poco desarrollada o ausente.

Salar

Los salares son un rasgo hidrográfico presente en gran parte de las cuencas endorreicas. Estos se forman producto de la acumulación de aguas en cuencas cerradas presentes en regiones áridas, donde la descarga por evaporación en el largo plazo es mayor que la recarga por precipitación. Predominan sales tales como cloruros, sulfatos, nitratos, boratos, entre otros. En el sistema de cuencas piloto, se reconoce a los salares Aguas Calientes 2, Tuyajto, y El Laco.

En la Figura 4.4 se presenta la distribución de las principales unidades geomorfológicas del sistema de cuencas piloto, interpretadas en su mayoría mediante imágenes satelitales y mapas topográficos. Destacan los cordones Puntas Negras y Chalviri, y las mesetas ignimbríticas del sector oriental del sistema.

460625 COPIA



Figura 4.4: Mapa geomorfológico del sistema de cuencas piloto de la II Región de Chile.

4.2 Cuencas Piloto Región de Antofagasta

Los límites morfológicos de todas las cuencas que pertenecen al sistema piloto, corresponden a barreras naturales compuestas por rocas y relieves de origen volcánico, tales como cordones volcánicos, estrato-volcanes neógenos y cuaternarios, plataformas ignimbríticas, coladas, entre otros. Las cuencas se caracterizan por presentar altos gradientes topográficos entre las cumbres volcánicas que definen sus límites y las partes bajas, caracterizadas por acumulaciones sedimentarias que en algunas ocasiones presentan lagunas y/o salares.

A continuación, se describe a los elementos geomorfológicos principales que se identifican en cada cuenca, por separado. Además, se incluyen sus características morfométricas. Un mapa con la toponimia de las cuencas más detallada se presenta en el ANEXO VIII.

Cuenca Salar de Aguas Calientes 2

La hoya hidrográfica del Salar de Aguas Calientes 2 tiene forma pseudo-rectangular, con orientación N-S, y con proyección de un área de drenaje en la esquina SO. Es la cuenca de mayor área de las cuencas piloto, con una superficie de 975 km² y un perímetro de 234 km. Limita con diversas cuencas endorreicas, con límites definidos por relieves de tipo volcánico. Al norte limita con la cuenca Salar de Pujsa, al noreste con la cuenca Salar de Loyoques o Quisquiro, al este con las cuencas Cerro Coquena y Salar de Jama, al sureste con la cuenca Puntas negras, al suroeste con las cuencas sub-Aguas Calientes 2 y sub-Miscanti, y al oeste con la cuenca Laguna Lejía (Figura 4.5).

La cuenca alberga un salar, con un área de 110 km². Este se encuentra al centro de la cuenca y se alimenta superficialmente a partir de tres vertientes puntuales que afloran en los extremos noroeste, norte y noreste del salar, y a partir de vertientes y afloramientos difusos en los extremos suroeste y sureste del salar.

La mayor elevación de la hoya del salar de Aguas Calientes 2 corresponde al Volcán Pili, con 6.046 msnm, mientras que la menor corresponde al sector central del salar, con 4.165 msnm. La altura media de la cuenca es de 4.562 msnm.

En esta cuenca, las unidades de relieve volcánico son las que definen a los límites de la cuenca. Los de mayor consideración y envergadura son: el Cordón de Puntas Negras, que define el límite suroeste; los estrato-volcanes Volcán Aguas Calientes y Volcán Pili (Cerro Acamarachi, o Caracol de Piedra, en Aymara) hacia el noroeste; y el cordón Alto de Toro Blanco, una plataforma ignimbrítica que define el límite occidental con la cuenca Laguna Lejía. El límite oriental lo definen una cadena de domos volcánicos, de orientación N-S, compuesta por los cerros Purifican, Arenoso, Chivato Muerto y Chamaca. Se identifican

pequeños depósitos aluviales que se originan en las cumbres de los afloramientos volcánicos que circundan al salar y que depositan los productos de la erosión de estas unidades en perfectos abanicos aluviales, cuyas fases terminales coinciden con los márgenes del salar.

Cuenca Puntas Negras

La cuenca Puntas Negras tiene forma cuadrada, aunque sus contornos son redondeados. Abarca una superficie de 201 km², encerrada en un perímetro de 90 km. Limita al norte y oeste con la cuenca Salar de Aguas Calientes 2, al noreste con la cuenca Salar de Jama, al sureste con la cuenca Salar del Rincón y al sur con la cuenca Salar El Laco.

La cuenca se caracteriza por limitar al sur y oeste con depósitos volcánicos del Plioceno y cuaternario, y al norte y este con las ignimbritas Atana, Pampa Chamaca y Tuyajto. Los productos de la erosión aluvial, fluvial y eólica de todos los afloramientos mencionados se transportan y depositan en la parte más baja de la cuenca, donde se desarrolla una relativamente potente llanura aluvial. Esta unidad de relleno se encuentra a unos 4.355 msnm, coincidiendo con la altura más baja de la cuenca.

La mayor elevación de la hoya de Puntas Negras corresponde al Volcán Puntas Negras, con 5.852 msnm, mientras que la altura media de la cuenca es de 4.644 msnm.

En esta cuenca, las unidades de relieve de mayor consideración y envergadura que definen a los límites de la cuenca son: el Cordón de Puntas Negras, en el límite suroeste; los estratovolcanes cerros Granates, de alturas máximas cercanas a los 5.250 msnm y que corresponden al límite sureste; y las plataformas ignimbríticas que se identifican en el sector altos de Lari y Caballo Muerto, que corresponden al límite oriental de la cuenca.

Cuenca Laguna Tuyajto

La hoya hidrográfica Laguna Tuyajto tiene forma alargada de riñón, orientada N-S y comprende un área calculada en 249 km², encerrado en un perímetro de 110 km. Limita al norte con la cuenca sub Aguas Calientes 2, el este por las cuencas (de norte a sur), Salar El Laco, Pampa Colorada y Pampa Las Tecas, al sur por la cuenca Salar de Incahuasi, y al oeste por las cuencas (de sur a norte), Salar de Aguas Calientes 3 – Talar y Laguna Miscanti.

La Laguna Tuyajto está ubicada en el extremo suroeste de la cuenca y tiene un área de $3 \text{ km}^2 \text{ y}$ altura de 4.033 msnm, por debajo de los casi 4.600 msnm de altura media de la cuenca. Se identifican vertientes puntuales que alimentan a la laguna, desde el norte y desde el este. También se reconocen abundantes depósitos evaporíticos que están dispuestos hacia el este de la laguna.

COPIA



460625 COPIA Figura 4.5: Toponimia de las cuencas piloto Región de Antofagasta para descripción fisiográfica

La mayor elevación de la hoya de la Laguna Tuyajto corresponde al Volcán Puntas Negras, con 5.852 msnm, mientras que la menor corresponde al sector oeste de la cuenca, donde se emplaza la laguna.

Las unidades de relieve volcánico de mayor consideración y que definen bien los límites noroeste, noreste y sureste de la cuenca son, respectivamente: el Cordón de Chalviri, que incluye los estrato-volcanes Tuyajto y Puntas Negras; estrato-volcán Cerro El Hueso, donde se ubica la mina El Laco; y los Cerros Peinado, de origen intrusivo y Las Tecas, de origen volcánico.

Es fácil identificar numerosos y grandes abanicos aluviales muy bien conservados, formados por abundantes sedimentos que son producto de la erosión de las rocas volcánicas que conforman las altas cumbres del Cordón Chalviri al norte y de los Cerros Las Tecas, al este de la cuenca. Aunque no son de carácter permanente, pueden reconocerse y trazarse los cursos de agua que provienen de precipitaciones estivales y sus depósitos fluviales asociados. La Laguna Tuyajto se caracteriza por presentar una terraza hacia el este, indicando antiguos niveles que se correlacionan con las líneas de costa al oeste que evidencian el sistemático descenso de sus aguas.

Cuenca Pampa Colorada

La cuenca Pampa Colorada tiene forma sub-redondeada y es la más pequeña de las cuencas piloto con un área de 58 km² y un perímetro de 43 km. Limita al oeste con la cuenca Laguna Tuyajto, al este con la cuenca Salar El Laco, y al sur con la cuenca de similares características morfológicas denominada Pampa Las Tecas.

Su nombre se debe a los característicos sedimentos colorados que se depositan en la parte más baja, a unos 4.250 msnm, y que provienen en su mayoría de la erosión de rocas ricas en hierro, ubicadas en el límite norte, donde se encuentra la mina El Laco. La altura promedio de la cuenca es de 4.472 msnm y la mayor elevación corresponde al estrato-volcán Cerro El Hueso, con una altura de 5.269 msnm.

La cuenca se caracteriza por presentar una relativamente extensa cubierta aluvial, que se limita al norte y al oeste por depósitos volcánicos del Plioceno, y hacia el este por depósitos volcánicos del Mioceno. Las unidades de relieve volcánico de mayor consideración son: productos efusivos pliocénicos del Cordón Puntas Negras, hacia el norte de la cuenca; estratovolcanes muy erosionados de Loma Negra, que limitan hacia el este, en conjunto al relieve ignimbrítico de la Pampa Chamaca; y Cerros Las Tecas, que limitan al suroeste. Se identifica un gran cono aluvial que desciende de norte a sur cargado de sedimentos. Sobre este cono pueden trazarse los cursos de agua que provienen de precipitaciones estivales.

Cuenca Pampa Las Tecas

La cuenca Pampa Las Tecas tiene forma sub-redondeada y es la segunda más pequeña de las cuencas piloto, con un área de 109 km² y un perímetro de 59 km. Limita al norte con la cuenca Pampa Colorada, al este con la cuenca Salar El Laco, al sureste con la cuenca Laguna Jeche, al sur con la cuenca sub Laguna Jeche, al suroeste con la cuenca Salar de Incahuasi, y al oeste con la cuenca Laguna Tuyajto.

Al igual que Pampa Colorada, esta cuenca se caracteriza por su relativamente extensa cubierta aluvial, con depósitos sedimentarios que se transportan y depositan en las partes más bajas de la cuenca, a unos 4180 msnm. El promedio de altura de la cuenca se calcula en 4567 msnm y la mayor elevación corresponde a 5.685 msnm.

La cuenca Pampa Las Tecas, se encuentra casi completamente rodeada por depósitos volcánicos miocénicos. Las unidades volcánicas más relevantes corresponden al Cerro Incahuasi Sur, limitando el suroeste de la cuenca, y el Cerro La Cantera, hacia el sureste, ambos identificados como estrato-volcanes muy erodados, del Mioceno. Se identifican pequeños conos aluviales que transportan sedimentos que provienen desde el este y oeste de la cuenca.

Cuenca Salar El Laco

La hoya hidrográfica del salar El Laco es una cuenca que tiene la forma de riñón y comprende un área calculada en 271 km², encerrado en un perímetro de 121 km. Limita al norte con la cuenca Puntas Negras, al este con la cuenca Salar del Rincón, al sur con la cuenca Laguna Jeche y al oeste con las cuencas (de norte a sur) Laguna Tuyajto, Pampa Colorada y Pampa Las Tecas.

La cuenca se caracteriza por su salar de forma ovalada y orientada N-S, y de igual nombre que la cuenca. El salar presenta un área de 16 km², que se encuentra centrado, en el sector topográficamente más bajo de la cuenca, a una altura de unos 4.220 msnm. Este se alimenta superficialmente a partir de afloramientos difusos, ubicados en los límites norte, oeste y sur del salar. Se caracteriza por presentar una gran laguna central, de forma alargada y curva, de orientación N-S, y cóncava hacia el oeste.

La mayor elevación de la hoya Salar El Laco corresponde al Volcán Puntas Negras, con 5.852 msnm, mientras que la altura media de la cuenca es de 4.518 msnm.

En esta cuenca, las unidades de relieve volcánico son las que definen los límites de la cuenca, donde los depósitos ignimbríticos superan a los volcánicos. Los de mayor consideración y envergadura son: el estrato-volcán miocénico de Loma Negra, hacia el oeste de la cuenca; estrato-volcán Cerro Overo, hacia el norte; y las lomas La Cantera y Las Torres, de carácter ignimbrítico y que limitan hacia el margen sur del salar.

4.2.1 Geomorfología Local

Son los depósitos volcánicos neógenos y cuaternarios, los que dan lugar al relieve volcánico característico de la Puna de Atacama en general, siendo la mayoría pertenecientes al Plioceno, y concentrados entre el rango que va entre el Mioceno superior y Pleistoceno. Estos relieves se componen básicamente por numerosos centros volcánicos que han dado origen a estratovolcanes con diferentes grados de erosión; secuencias volcánicas estratificadas, de composición andesítica y, subordinadamente, dacítica y basáltica; domos y estructuras circulares de composición principalmente riolítica; conos piroclásticos y/o de escoria, basálticos, correspondientes a estructuras monogenéticas formadas por la acumulación de escoria; coladas de lava; relieves, plataformas, mesetas y coladas ignimbríticas, que consisten en tobas con distintos grados de soldamiento, de composición dacítica y riolítica.

Producto de la escasez de precipitaciones y la consecuente ausencia de ríos permanentes, las formas de erosión son restringidas a plataformas volcánicas que por litología no favorecen a la incisión fluvial y consecuente formación de quebradas. Se distinguen más bien, formas de acumulación tales como conos aluviales y de derrubios, que en sus zonas terminales acumulan extensas llanuras aluviales. Además de la erosión pluvial, fluvial y eólica, se deben considerar los efectos de la meteorización química que produce la alteración hidrotermal. El aporte de detritos asociado a estos procesos ha generado depósitos antiguos y recientes, cuya morfología se ha conservado gracias a la aridez del clima.

Las imágenes satelitales muestran que la región de la Puna de Atacama contiene una gran cantidad de estructuras lineares y curvilíneas en la superficie de depósitos ignimbríticos, que se identifican como canales o *ridges*. Se asume que los *ridges* lineares son formaciones típicas que se deben a la erosión eólica, mientras que los canales más sinuosos se corresponden con ambientes fluviales. Los patrones distintivos más encontrados resultan en un sinnúmero de estructuras lineares, orientadas NW–SE y reconocidas en diversas ignimbritas de la región. Se reconocen tanto canales como *ridges*, y en algunos sectores una compleja relación entre ambos. Esto sugiere que la erosión eólica se complementa con procesos de erosión fluvial para dar forma al relieve observado (Bailey et al., 2007).

A pesar del clima hiper-árido que se reporta para la región, no se debe subestimar el rol de flujos de agua en la confección del relieve, considerando la época desde que se emplazan los depósitos ignimbríticos. Estudios recientes indican que el clima en el Desierto de Atacama puede haber sido semiárido desde el tiempo en que se emplazaron la mayoría de los depósitos ignimbríticos (Gaupp et al., 1999; Hartley y Chong, 2002). Otros estudios demuestran periodos húmedos que han ocurrido en la historia geológica reciente (Kull y Grosjean, 1998; Latorre et al., 2003; Rech et al., 2002).

La erosión eólica es muy activa debido a lo estéril y carente de vegetación que es el paisaje de la Puna. Incluso los depósitos más consolidados serán eventualmente reducidos por consecuencia de la exposición continua y prolongada al viento. Si el viento mantiene una dirección constante, puede tener un efecto distintivo en el paisaje, esculpiendo estructuras lineares y paralelas (Whitney, 1978), como se muestra en la Figura 4.6.

Los vientos constantes pueden también rebajar la superficie al remover el material más fino y menos consolidado. Este proceso se denomina deflación y crea una textura de superficie armado, conocido también como el "pavimento del desierto" (Figura 4.7).

La orientación preferencial de la estructuras NW – SE debe implicar algo más que condiciones de formación y/o propiedades superficiales de las ignimbritas. Los mecanismos de enfriamiento de la roca inciden en la formación de uniones de planos de enfriamiento dentro de la extensión de las ignimbritas, lo que provee de potenciales planos de debilidad a escalas menores que la regional. Se ha sugerido que estos planos de debilidad pueden influir en la alineación penetrante NW – SE de los caracteres derivados por efecto del viento (Bailey et al., 2007). Estudios del clima actual indican que la dirección del viento proviene dominantemente desde el NW (Das et al., 1998).



Fuente: [Modificado de Bailey et al., 2007]

Figura 4.6: Proceso de erosión denominado deflación. Las flechas negras indican la dirección del viento.



Fuente: [Modificado de Bailey et al., 2007]

Figura 4.7: Proceso que describe la formación del pavimento del desierto por acción de la acción continua del viento.

4.2.2 Hidrografía

Red Hidrográfica

Dado el factor climático imperante en el sector de la Puna de Atacama, que consiste en un régimen esporádico y estacional de los escurrimientos superficiales, sumado a la topografía abrupta y las pequeñas áreas de las cuencas, no existe un desarrollo notable de la red de drenaje para el sistema piloto. Las escasas precipitaciones estivales infiltran en las cabeceras de los conos aluviales, o se transportan e infiltran rápidamente en la zona de mayor permeabilidad, denominada llanura aluvial. No existen escurrimientos de régimen permanente para el sector estudiado.

Se ha trazado una red hidrográfica para cada cuenca, basado en la identificación de incisiones fluviales en los distintos tipos de roca, y reconocidas en imágenes satelitales. A pesar del pobre desarrollo de las redes, se han identificado algunos sistemas, que se describen a continuación.

> Red radial

Sistema destructivo de densidad media a baja, controlado por la morfología de domos volcánicos miocenos, orientados N-S, hacia el costado este del Salar de Aguas Calientes 2 (cerros Bola, Purifican, Arenoso, Chivato Muerto y Chamaca).

Red pectinada en pluma

Presente en las altas cumbres de los márgenes occidentales de las cuencas Laguna Tuyajto y Pampa Las Tecas. Consiste en un sistema destructivo con ángulos de confluencia casi ortogonales. Los cauces que presentan este tipo de red se presentan en rocas volcánicas miocénicas erodadas, y muestran una orientación NE-SW.

Red paralela a subparalela

Se desarrolla únicamente en la cuenca Salar de Aguas Calientes 2 sobre afloramientos de la Ignimbrita Cajón, que está débilmente soldada. Presenta una orientación principal NW-SE. A gran escala, se reconoce que los drenajes que provienen de las altas cumbres del Cordón de Puntas Negras son paralelos, lo que podría indicar algún tipo de control estructural mayor.

> Red dendrítica o arborescente

Se identifican dos sistemas de redes dendríticas bastante desarrolladas. La primera en la cuenca Salar de Aguas Calientes 2, sobre afloramientos de roca de la Ignimbrita Atana bien soldada, y la segunda en Puntas Negras, en rocas con grados variables de soldamiento de la Ignimbrita Pampa Chamaca. Este sistema destructivo se presenta como un sistema medianamente denso y medianamente integrado, con ángulos de confluencia entre 50° y 90°.

460625 COPIA



Figura 4.8: Red hidrográfica inferida en cuencas piloto de la Región de Antofagasta.

Características de las Cuencas y de las Subcuencas

Salar de Aguas Calientes 2

Algunas características morfométricas de la cuenca del Salar de Aguas Calientes 2 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	975 km ²
Pendiente media	14,95 %
Altura máxima	6.046 msnm
Altura media	4.562 msnm
Altura mínima	4.165 msnm
Rango	1.881 m
Superficie del salar	128 km^2

Tabla 4.1: Características morfométricas del Salar de Aguas Calientes 2

La Figura 4.9 muestra la curva hipsográfica o hipsométrica de la hoya Salar de Aguas Calientes 2, que indica la proporción de su superficie en determinadas bandas de altura. Se aprecia que la totalidad de la cuenca se encuentra sobre los 4.150 msnm y una transición lenta a zonas ocupadas por alturas superiores a 5.000 msnm. Sólo alrededor del 10% del área de la cuenca se encuentra sobre esta cota.



Figura 4.9: Curva hipsográfica cuenca del Salar de Aguas Calientes 2.

La cuenca superficial se ha dividido en 12 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. La Figura 4.10 muestra la división de esta cuenca junto a la de Puntas Negras, que conforman un sistema que se ha denominado sector o grupo norte.

Al norte del salar se encuentra el aporte superficial más importante, el Río Pili, que baja por la ladera del cerro del mismo nombre. Otros aportes se producen por el vértice NO del salar, paralelo al cordón Alto de Toro Blanco. Por el oriente llega la Quebrada de Chamaca, al sur del Cerro Chamaca o Chivato Muerto, que forma unas vegas poco menos importantes que las del Pili antes de desembocar.

El salar es de tipo playa y representa casi un 12% del área de la cuenca, con varias lagunas de extensión variable, siendo la más importante la que se encuentra al surponiente, alimentada por vertientes que surgen al pie del Cerro Overo y que da vida a los bofedales allí presentes. Otras fuentes intermitentes desde el sur (pampa Loma Amarilla) también harían sus aportes en los periodos húmedos.

Para conocer en mayor detalle las zonas de descarga al salar en la zona aledaña a éste, se presenta una descripción en el apartado 8.6.3.

ID	ID Subcuenca	Nombre	Superficie (km ²)
1	216.1	Pampa Loma Amarilla	224,51
2	216.2	Cerro Chiliques	54,75
3	216.3	Alto de Toro Blanco	12,89
4	216.4	Vertiente Oeste	25,05
5	216.5	Cerrillos Puntas Negras	36,79
6	216.6	Pampa Totoral	105,23
7	216.7	Pampa Chamaca	51,4
8	216.8	Cerro Purifican	73,74
9	216.9	Pampa Pili	127,72
10	216.10	Cerros de Río Negro	10,03
11	216.11	Río Pili	125,26
12	216.12	Salar de Aguas Calientes 2	127,78

Tabla 4.2: Subcuencas Salar de Aguas Calientes 2.





Figura 4.10: Subcuencas de cuencas del grupo norte, Salar de Aguas Calientes 2 y Puntas Negras.

Puntas Negras

Algunas características morfométricas de la cuenca Puntas Negras son expuestas en la Tabla 4.3. En particular, allí se detallan altura máxima, media y mínima, rango, pendiente media, superficie de la cuenca.

Superficie cuenca	201 km ²
Pendiente media	13,37 %
Altura máxima	5.852 msnm
Altura media	4.644 msnm
Altura mínima	4.353 msnm
Rango	1.499 m
Superficie del salar*	-

Tabla 4.3: Características morfométricas de Puntas Negras.

*Esta cuenca no tiene salar en su depresión.

La Figura 4.11 muestra la curva hipsográfica o hipsométrica de la hoya Puntas Negras, que indica la proporción de su superficie en determinadas bandas de altura. Se aprecia que la totalidad de la cuenca se encuentra sobre los 4.350 msnm, siendo la más alta del sistema piloto. Menos del 10% de la superficie de la cuenca se encuentra sobre los 5.000 msnm.



Figura 4.11: Curva hipsográfica cuenca Puntas Negras.

La cuenca superficial se ha dividido en 5 subcuencas, que representan las subáreas aportantes a la depresión más la depresión misma. Los nombres de estas unidades se muestran en la Tabla 4.4 y se asignaron de acuerdo a las singularidades topográficas o cursos intermitentes más importantes contenidos en ellas. La Figura 4.10 muestra la división de esta cuenca junto a la de Aguas Calientes 2, que conforman un sistema que se ha denominado sector o grupo norte.

Al sur de la cuenca del salar de Aguas Calientes 2, se desarrolla esta cuenca endorreica que no forma laguna ni salar. Al igual que otros casos en que ocurre esta situación, la recarga que recibe esta cuenca sería descargada subterráneamente hacia otra, en este caso particular hacia el norte (ver apartado piezometría), y no a través de evaporación desde napas someras. La revisión de los antecedentes presentados y las visitas a terreno efectuadas indican que ambas cuencas están desconectadas superficialmente.

Otra confusión que puede producirse es relacionarla con la cuenca de elevación intermedia del Salar de Punta Negra, ubicado al sur del Salar de Atacama y que ocupa el espacio que separa a las cuencas que hemos llamado del bloque central con las del sur del Altiplano de la II Región (ver Parte I del presente estudio, Hidrografía Regional del Altiplano). La cuenca de Puntas Negras recibe su nombre por el cordón de cerros que la cruza, donde el Volcán Puntas Negras ubicado en el límite sur es el de mayor altura (5.852 msnm).

ID	ID Subcuenca	Nombre	Superficie (km ²)
13	218.1	Volcán Puntas Negras	38,18
14	218.2	Cordón Puntas Negras	24,5
15	218.3	Cerros Granates	31,72
16	218.4	Alto de Caballo Muerto	37,38
17	218.5	Pampa Esquina Amarilla	69,28

Tabla 4.4: Subcuencas Puntas Negras.

Laguna Tuyajto

Algunas características morfométricas de la cuenca Laguna Tuyajto son expuestas en la Tabla 4.5. En particular, allí se detallan altura máxima, media y mínima, rango, pendiente media, superficie de la cuenca y de la laguna.

La Figura 4.12 muestra la curva hipsográfica o hipsométrica de la hoya Laguna Tuyajto, que indica la proporción de su superficie en determinadas bandas de altura. Se aprecia que toda la cuenca se encuentra sobre los 4.000 msnm, con un desarrollo pronunciado entre la parte baja y la alta, teniendo una distribución pareja de su superficie entre los 4.000 y los 5.300 msnm.

Superficie cuenca	249 km^2
Pendiente media	19,43 %
Altura máxima	5.852 msnm
Altura media	4.596 msnm
Altura mínima	4.033 msnm
Rango	1.819 m
Superficie Laguna	$2,6 \text{ km}^2$

Tabla 4.5: Características morfométricas de Laguna Tuyajto.



Figura 4.12: Curva hipsográfica cuenca Laguna Tuyajto.

La cuenca superficial se ha dividido en 5 subcuencas, que representan las subáreas aportantes a la depresión más la depresión misma. Los nombres de estas unidades se muestran en la Tabla 4.6 y se asignaron de acuerdo a las singularidades topográficas o cursos intermitentes más importantes contenidos en ellas. La Figura 4.14 muestra la división de esta cuenca, así como también las otras correspondientes al grupo sur (Pampas Colorada y Las Tecas, y Salar El Laco).

No hay escurrimientos superficiales salvo algunos afloramientos puntuales y difusos en la vecindad de la laguna. Estos han sido estudiados por Water Management Consultants para la formulación del EIA Pampa Colorada (WMC, 2006). Su caracterización se encuentra descrita en el apartado 8.6.3, del capítulo Caracterización Hidrogeológica.

ID	ID Subcuenca	Nombre	Superficie (km ²)
18	226.1	Cerro Incahuasi Sur	28,2
19	226.2	Cerro Peinado	12,61
20	226.3	Callejón San Vicente	114,12
21	226.4	Volcán Tuyajto	21,19
22	226.5	Laguna Tuyajto	72,48

Tabla 4.6: Subcuencas Laguna Tuyajto.

Salar El Laco

Algunas características morfométricas de la cuenca Salar El Laco son expuestas en la Tabla 4.7. En particular, allí se detallan altura máxima, media y mínima, rango, pendiente media, superficie de la cuenca y del salar.

Tabla 4.7: Características morfométricas de Salar El Laco.

Superficie cuenca	271 km^2
Pendiente media	14,61 %
Altura máxima	5.852 msnm
Altura media	4.518 msnm
Altura mínima	4.219 msnm
Rango	1.633 m
Superficie salar	$16,2 \text{ km}^2$

La Figura 4.13 muestra la curva hipsométrica de la hoya Salar El Laco, que indica la proporción de su superficie en determinadas bandas de altura. Toda la cuenca se encuentra sobre los 4.200 msnm, con un desarrollo de un 10% en una cota bajo 4.250 msnm. Entre los 4.520 y los 4.580 msnm también se encuentra un porcentaje cercano al 10% de la superficie total.

El Salar El Laco se encuentra en el rincón sureste del bloque central del Altiplano de la II Región, limita al oriente con la gran hoya del salar del Rincón, ubicado en Argentina y con área aportante desde Chile. El salar ubicado en el centro es de tipo playa con una laguna poco profunda y es alimentado por la Quebrada del Hueso desde el norponiente y la Quebrada de la Astilla por el poniente.



Figura 4.13: Curva hipsográfica cuenca Salar El Laco.

La cuenca superficial se ha dividido en 5 subcuencas, que representan las subáreas aportantes a la depresión más la depresión misma. Los nombres de estas unidades se muestran en la Tabla 4.8 y se asignaron de acuerdo a las singularidades topográficas o cursos intermitentes más importantes contenidos en ellas. La Figura 4.14 muestra la división de esta cuenca, así como también las otras correspondientes al grupo sur (Pampas Colorada y Las Tecas, y Laguna Tuyajto).

ID	ID Subcuenca	Nombre	Superficie (km ²)
23	227.1	Pampa del Rincón	46,02
24	227.2	Loma Las Torres	24,23
25	227.3	Loma Las Canteras	25,73
26	227.4	Quebrada del Hueso	84,42
27	227.5	Salar El Laco	90,4

Tabla 4.8: Subcuencas Salar El Laco.

Pampa Colorada y Pampa Las Tecas

Algunas características morfométricas de las cuencas Pampa Colorada y Pampa Las Tecas son expuestas en la Tabla 4.9. En particular, allí se detallan altura máxima, media y mínima, rango, pendiente media, superficie de la cuenca y del salar.



Figura 4.14: Subcuencas de cuencas del grupo sur, Laguna Tuyajto, Pampas Colorada, Las Tecas y Salar El Laco.

Cuenca	Pampa Colorada	Pampa Las Tecas
Superficie cuenca (km ²)	58	109
Pendiente media (%)	15,59	21,12
Altura máxima (msnm)	5.269	5.685
Altura media (msnm)	4.472	4.567
Altura mínima (msnm)	4.256	4.181
Rango (m)	1.013	1.504
Superficie laguna o salar (km ²)	-	-

Tabla 4.9: Características morfométricas de cuencas Pampa Colorada y Pampa Las Tecas.

La Figura 4.15 y Figura 4.16 muestra las curvas hipsográficas de las hoyas Pampa Colorada y Pampa Las Tecas, respectivamente. Ambas cuencas tienen perfiles hipsométricos parecidos, con una transición uniforme desde el punto más bajo hasta cierta altura en la que éste se hace más vertical, lo que indica morfologías muy similares. La cuenca Pampa Colorada tiene su menor cota más alta que Las Tecas, pero la altura máxima es mayor en la segunda.

Corresponden a cuencas endorreicas de un tamaño medio a bajo en comparación a las demás hoyas hidrográficas definidas en este estudio. Estas cuencas se encuentran rodeadas por la Laguna Tuyajto (oeste) y Salar El Laco (este).

La cuenca de Pampa Colorada está sitiada por un anfiteatro de cerros, algunos de los cuales superan los 4.500 msnm, destacando en la dirección suroeste el Cerro Las Tecas con 4.747 m de altitud. La red hidrográfica de la cuenca es bastante reducida debido a su pequeña superficie y está compuesta principalmente por pequeñas quebradas que funcionan bajo condiciones de tormenta. Entre estas se encuentra la Quebrada La Astilla, que conduce las aguas desde el noreste de la cuenca hacia el valle.

La cuenca de Pampa Las Tecas limita al norte con el Cerro las Tecas (4.747 msnm) y al sur con los Cerros Incahuasi (5.676 msnm), Casliri (5.233 msnm) y Lomas de Jeche (4.887 msnm). A la igual que Pampa Colorada, la red hidrográfica de la cuenca es bastante reducida debido a su naturaleza endorreica y a su pequeña superficie, estando compuesta por pequeñas quebradas y arroyos que terminan su curso infiltrándose en la pampa.

La cuenca superficial se ha dividido en 4 subcuencas, que representan las subáreas aportantes a la depresión más la depresión misma. Los nombres de estas unidades se muestran en la Tabla 4.10 y se asignaron de acuerdo a las singularidades topográficas o cursos intermitentes más importantes contenidos en ellas.



Figura 4.15: Curva hipsográfica cuenca Pampa Colorada.



Figura 4.16: Curva hipsográfica cuenca Pampa Las Tecas.

Tabla 4.10: Subcuencas Pampa Colorada (229) y Pampa Las Tecas (228).

ID	ID Subcuenca	Nombre	Superficie (km ²)
28	228.1	Cerro Casliri	62,26
29	228.2	Cerro Las Tecas	47,00
30	229.1	Quebrada La Astilla	19,81
31	229.2	Loma Negra	38,18

COPIA

5 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA

5.1 Marco Geológico

Este capítulo tiene como finalidad definir el modelo geológico conceptual para el sector donde se emplazan las cuencas piloto de la II Región de Chile. El estudio se realiza sobre la base de antecedentes bibliográficos, una campaña de terreno, interpretación de imágenes satelitales y de las unidades de subsuperficie a partir de una recopilación estratigráfica de pozos.

Para caracterizar la geología de superficie, se generó un mapa geológico que muestra las unidades que afloran en el área de las cuencas, para luego describirlas con énfasis en las características litológicas que son relevantes para un posterior modelamiento hidrogeológico. La descripción y mapeo geológico se basan en los contenidos de la Carta Geológica de Chile a escala 1:250.000, Hoja Toconao (Ramírez y Gardeweg, 1982) ubicada entre los 23°-24° S y 67°30'-69° W y la Hoja Río Zapaleri (Gardeweg y Ramírez, 1985), ubicada al este del meridiano 67°30' W, entre los límites con Bolivia y Argentina. Los documentos mencionados fueron elaborados por el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN).

La información anteriormente señalada se ha complementado con documentos científicos, estudios anteriores en la zona y el libro "*The Geology of Chile*" (2007). Existe un cuadrante en el sector sur de la cuenca Laguna Tuyajto que no cuenta con una descripción geológica superficial oficial. Se ha recurrido a imágenes satelitales Landsat ETM+ (NASA) para completar dicha información.

La geología del norte de Chile, y específicamente para el sector de la Puna de Atacama, responde a la interacción convergente de placas entre el margen occidental sudamericano y las placas oceánicas que las subductan. Esta dinámica ha sido desarrollada desde el Paleozoico hasta la actualidad. Los Andes Centrales son principalmente producto del engrosamiento cortical y volcanismo generado en respuesta a la subducción de la placa oceánica de Nazca, bajo la corteza continental Sudamericana. Actualmente, la placa de Nazca subduce en dirección al NE, a una tasa de 700 mm/año (Coutand et al., 2001).

En la Región de Antofagasta existen numerosas unidades fisiográficas de disposición aproximada norte - sur. Una sección a través de los Andes Centrales entre los 20° - 28° S permitiría reconocer fácilmente a 7 provincias morfogenéticas, que de oeste a este son: Cordillera de la Costa, Depresión Central, Cordillera de Domeyko, Depresión Pre-Andina, Altiplano-Puna con el cordón volcánico en su borde occidental o Cordillera Occidental y, finalmente, Cordillera Oriental y Sierras Subandinas hacia el este (Muñoz y Charrier, 1996).


Fuente: [Modificado de Actas II SIEA, Charrier, 1993] Figura 5.1: Perfil Esquemático entre las latitudes 23°-24°S.

Las cuencas piloto de esta Región se ubican en el borde occidental de la unidad denominada Puna, ubicada al este del Salar de Atacama, prolongándose hacia Bolivia y el NW de Argentina, y limitando finalmente con la Cordillera Oriental. La Puna chilena o Puna de Atacama, abarca una superficie de unos 10.000 km². Esta unidad en particular, se caracteriza por su relieve de suaves lomajes que delimitan a pequeñas cuencas endorreicas colindantes, algunas de las cuales presentan depósitos evaporíticos en sus áreas topográficamente más bajas. Cabe destacar que el área de estudio se ubica en la zona transicional entre la Cordillera Occidental y la Puna.

La característica más relevante de los Andes Centrales es la presencia del *plateau* altiplánico, que incluye al Altiplano boliviano y se extiende por unos 1.800 km, desde el sur de Perú, hasta el noroeste de Argentina. Tiene una elevación que promedio de 4 km y alcanza un ancho máximo de 400 km en el sector de los Andes bolivianos. La corteza continental que la subyace alcanza espesores de hasta 70 km (Götze et al., 1994; Wigger et al., 1994), principalmente como consecuencia del acortamiento andino (Kley et al., 1998; Baby et al., 1997).

La Puna corresponde a la parte más austral del *plateau* de los Andes Centrales y en promedio se eleva unos 4.400 msnm. Aunque se refiere a la Puna como parte del *plateau*, se debe hacer notar que la Puna no tiene topografía plana, sino más bien rugosa. Las menores elevaciones (3.500 – 3.600 msnm) se encuentran en las cuencas intra-montanas, que han sido rellenadas por sedimentos cenozoicos y donde el drenaje interno y las altas tasas de evaporación, en ocasiones, desarrollan salares. Limitan a las cuencas cordones volcánicos de orientación general NW-SE, donde es común reconocer volcanismo tipo caldera. Estos parecen emplazarse según fallas pre-existentes y que fueron reactivadas durante el orógeno Andino (Coutand et al., 2001). El límite occidental de la Puna corresponde a la denominada Cordillera Occidental, donde se ubica el arco volcánico actual y las cuencas piloto de esta Región. El límite oriental corresponde a la denominada Cordillera Oriental, que alcanza alturas de hasta

6.500 msnm. Esta cordillera se compone principalmente por estrato-volcanes de composición dacítica y andesítica del arco volcánico activo.

5.1.1 Estratigrafía

La historia geológica de la Puna de Atacama abarca un rango de unos 1.000 Ma. Se han diferenciado unidades estratificadas, cuyas edades se extienden entre el Paleozoico y el Cuaternario, e intrusivos menores del Mioceno. Las rocas más antiguas, de entre 1.000 - 230 Ma, tienen escasa representación. La zona de estudio se caracteriza más bien por revelar extensos depósitos volcánicos, aunque en menor medida tiene depósitos sedimentarios del Mioceno superior – Cuaternario. Bajo éstos aparecen, en ventanas de erosión o en cerros islas, las rocas sedimentarias plegadas e intrusivas, pre-miocenas.

Las unidades más antiguas reconocidas son de edad paleozoica y corresponden a la Formación Aguada de la Perdiz, compuesta por estratos alternados de arenisca; Formación Poquis, una alternancia de areniscas finas y limonitas silicificadas y Formación Estratos del Salar de Quisquiro, de areniscas cuarcíferas. Las unidades estratificadas mesozoicas y cenozoicas, en orden de antigüedad decreciente, son las siguientes: Estratos de Quebrada Blanca de Poquis, de edad cretácica superior y compuesta por conglomerados, areniscas y calizas; Formación Siglia, asignada al Terciario inferior, con más de 300 metros de areniscas, limolitas y brechas; Formación Chojfias, compuesta por 2.000 m de areniscas, limonitas y yeso, asignadas al Terciario; Formación Cajchimayo, con 400 m de conglomerados y gravas de mediana consolidación, y edad Terciaria; y la Formación Pastos Chicos, compuesta por gravas mal estratificadas, de potencia desconocida y edad miocena superior. La columna estratigráfica culmina con rocas volcánicas del Cenozoico superior en el techo, correspondientes a ignimbritas, conjuntos de volcanes y depósitos piroclásticos aéreos.

Junto a estas unidades se distinguen los depósitos no-consolidados, que se componen por los lacustres, aluviales, coluviales, morrénicos, piroclásticos, y salinos.

5.1.2 Rocas Ígneas

Los afloramientos de rocas intrusivas pertenecen al Mioceno, y corresponden a pequeños y escasos cuerpos porfídicos, con características sub-volcánicas, cuya composición es principalmente dacítica, con variaciones a riolitas y localmente a monzonitas y dioritas.

El ciclo orogénico Andino abarca desde el Mesozoico al Presente, y comprende una serie de arcos magmáticos que migran progresivamente hacia el este (Coira et al., 1982; Reutter et al., 1988; Scheuber y Reutter, 1992; Scheuber et al., 1994). Se han distinguido cuatro sistemas de

arcos magmáticos: Jurásico a Cretácico Temprano; Cretácico Medio; Cretácico Tardío a Paleógeno; Mioceno al Reciente.

El volcanismo de arco actual se desarrolla en la Cordillera Occidental y describe la actividad volcánica desarrollada durante el Mioceno – Reciente. Esta cordillera se forma por un conjunto de edificios volcánicos que forman parte del Complejo Volcánico del Altiplano-Puna (CVAP) que de Silva y Francis (1989), definen entre los 21° S y 24° S. El arco magmático actual describe una acentuada delimitación de un frente de estrato-volcanes. Este frente se extiende paralelo al margen oeste del continente sudamericano, a unos 200 – 250 km al este de la fosa Chile- Perú (Isacks, 1988; Cahill and Isacks, 1992).

Como se ha descrito preliminarmente, el arco volcánico está constituido por estrato- volcanes y secuencias volcánicas estratificadas, caracterizadas por su alto nivel explosivo desde el Mioceno Inferior hasta el periodo actual. La composición de los productos volcánicos son calco-alcalinos y el tipo de roca dominante son las andesitas y dacitas. Los estrato-volcanes se presentan en complejos de dos o más conos y, ocasionalmente, tienen asociados pequeños domos en sus flancos. Las secuencias estratificadas corresponden a afloramientos aislados de lavas y piroclastos, que no pueden ser directamente relacionados a centros de emisión. En menor proporción, se reconocen domos y estructuras circulares. Corresponden a cuerpos sub-redondeados, algunos de paredes abruptas y superficies rugosas, eruptadas sobre y en torno a un centro de emisión. Además, hay conos piroclásticos y/o de escoria, correspondientes a estructuras morfogenéticas, formadas por la acumulación de escoria marcadamente vesicular, ceniza y lava, también en torno a un centro de emisión.

Algunos conocidos ejemplos del CVAP son Tata Sabaya y Parinacota (6.348 msnm), Tarapacá (5.850 msnm), Nevados de Payachata, San Pedro (6.145 msnm), Láscar (5.550 msnm), Socompa (6.051 msnm), Llullaillaco (6.739 msnm), Lastarria, Ollagüe (5.863 msnm) y el volcán más alto del mundo, Ojos del Salado (6.887 msnm).

El abundante magmatismo silicio es una de las características más importantes de la actividad volcánica neógena de los Andes Centrales. La concentración miocena a pliocena de las calderas que componen el CVAP son por lejos una de las provincias ignimbríticas eruptivas más grandes en el mundo (Schnurr et al., 2007). Este complejo se ubica entre los 21° - 24° S, cubre un área de unos 70.000 km², concentra el mayor volumen de ignimbritas (~ 30.000 km³) del Mioceno tardío al Pleistoceno y presenta evidencias geoquímicas de poseer una fuente predominantemente cortical. La estratigrafía es dominada por extensas ignimbritas dacíticas, ricas en cristales y con volúmenes que exceden los 1.000 km³ (ej.: de Silva, 1989b; de Silva y Francis, 1989). Existen buenos estudios para las calderas que conforman el CVAP, ellos incluyen las calderas de: La Pacana (Gardeweg y Ramírez, 1987; Lindsay et al., 2001a, b;

Schmitt et al., 2001, 2002), Panizos (Ort, 1993; Ort et al., 1996) y el Complejo Vilama–Coruto (Coira et al., 1996; Soler et al., 2007). Los eventos volcánicos asociados a la caldera La Pacana son de gran relevancia para el sector donde se emplazan las cuencas piloto, particularmente donde se emplaza la cuenca Salar de Aguas Calientes 2. Es por esta razón que se abordarán sus características de manera particular.

5.1.3 Régimen Tectónico (Estructuras)

Los estudios estructurales detallados para el volcanismo Mioceno a Reciente en la Puna de Atacama, se asocian a la presencia de un sistema de fallas de primer orden, de orientación NW-SE, denominada falla Calama – Olocapato – El Toro (Francis et al., 1989; Coira et al., 1993, 1996; Petrinovic, 1999; Seggiaro, 1994).

5.2 Unidades Geológicas

5.2.1 Generalidades

Se describen a continuación las unidades geológicas y depósitos no-consolidados que afloran y pertenecen al sector de la Puna de Atacama, delimitado por el cuadrante que encierra a las cuencas piloto de la II Región de Chile. Estas cuencas son Salar de Aguas Calientes 2, Puntas Negras, Laguna Tuyajto, Pampa Colorada, Pampa Las Tecas y Salar El Laco.

5.2.2 Rocas Paleozoicas

Formación Aguada de la Perdiz (Ordovícico-Pzap)

La base de la formación no aparece expuesta y su techo corresponde al contacto discordante con las ignimbritas Atana y Guatiquina (García et al., 1962). Los productos volcánicos de un arco magmático pretérito fueron depositados en una cuenca marina antigua localizada en el presente flanco oeste de la Cordillera de los Andes. El resultado es la existencia de secuencias de lavas basálticas, riolíticas y andesíticas, intercaladas por rocas sedimentarias marinas, que en conjunto constituyen el Complejo Ígneo y Sedimentario Cordón Lila y la Fm. Aguada de la Perdiz (Hervé et al., 2007).

La Fm. Aguada de la Perdiz consiste en una sucesión de detritos gruesos a finos, depósitos marinos someros con intercalaciones volcánicas y volcanoclásticas, y fauna asociada al arenigiano medio (Charrier et al., 2007). Dentro de la secuencia existen niveles y sectores fuertemente silicificados. Las capas se disponen según una estructura anticlinal de rumbo general NNW y manteos variables entre 40° y 80°.

Estratos del Salar de Quisquiro (Paleozoico-Pzq)

La base de estos estratos, que afloran en la parte sureste del salar de Quisquiro, es desconocida y están cubiertas por la Ignimbrita Atana del Plioceno. La asociación mineralógica y el alto grado de madurez de estas rocas permiten deducir que corresponden al producto de erosión de un bloque continental.

Litológicamente corresponde a una sección de arenisca de cuarzo con más de 50 m de espesor. Estos estratos afloran en un pequeño anticlinal de eje aproximadamente NS, en cuyo flanco oriental las capas tienen rumbo N10°E y manteos de $35 - 45^{\circ}$ E. La secuencia está bien estratificada en bancos de 1 - 3 m de potencia, con intercalaciones de granulometría más fina. Se caracteriza por su coloración crema-rojiza y rojo-violácea.

5.2.3 Rocas Mesozoicas

Formación Siglia (Terciario inferior-Tis)

Se distribuye en el sector del Salar de Lari y en la Serranía de Siglia, en la parte sur del Altiplano de la Segunda Región. Su base no se observa y subyace la cubierta compuesta por la Formación Pastos Chicos, las ignimbritas Guatiquina y Atana, y los depósitos asociados a volcanes miocenos. Esta unidad se encuentra intruida por los pórfidos de Siglia y Lari.

Litológicamente, la Formación Siglia se constituye de areniscas de grano fino y limolitas pardas, grises, verdes y moradas, con trazas fósiles y brechas verdes, con venillas e intercalaciones de yeso. La estratificación es en general pobre y difusa, los afloramientos están disgregados y mal preservados. La secuencia se encuentra intensamente plegada y está intruida por pequeños diques y filones de pórfidos riolíticos, monzonítico-cuarcíferos y dioríticos.

Formación Pastos Chicos (Mioceno superior-Mspc)

Se encuentra al este de Cerros de Perdiz y al sur de Lari, donde se observan afloramientos pobremente expuestos de esta unidad en el sector sur oriental del Altiplano. La formación sobreyace depósitos de las formaciones Aguada de la Perdiz. La envuelven depósitos de las ignimbritas de Guatiquina y Atana, y depósitos asociados a las unidades de volcanes desde el Mioceno al Plioceno. La Formación Pastos Chicos se depositó en una cuenca continental intermontana, producto de la activa erosión de las unidades más antiguas.

Esta unidad se compone de gravas mal estratificadas. Al sur de Lari, se observan gravas de grano medio a fino, mal consolidados, con rodados sub-redondeados de lavas y de un material compuesto por hematites y biotitas.

460625 COPIA



Fuente: [Modificado de SERNAGEOMIN, Hojas Toconao (1982) y Río Zapaleri (1985)]

Figura 5.2: Mapa Geológico de la Puna de Atacama.





Figura 5.3: Simbología del Mapa Geológico de la Puna de Atacama.

Depósitos Aterrazados (Terciario-TQt)

Estos se reconocen únicamente en la ladera oriental del Volcán Tuyajto, al norte de la laguna de igual nombre, en la vertiente occidental del cordón Lila, con la Ignimbrita Tucúcaro intercalada en estos sedimentos.

Corresponden a sedimentos medianamente litificados, con estratificación regular y granulometría variable. Son depósitos de piedemonte y corrientes de barro, constituidos predominantemente por gravas, arenas y limos, los cuales se encuentran encauzados por los cauces de las quebradas actuales. En general presentan intercalaciones de ceniza volcánica mezcladas entre las gravas.

5.2.4 Rocas Volcánicas del Cenozoico Superior

El volcanismo del Cenozoico superior se inicia en el Mioceno inferior, ligado a procesos compresivos y distensivos. Este volcanismo ocurre en dos etapas. Una en el Mioceno, de tipo fisural, con ignimbritas riolíticas a dacíticas intercaladas, y con lavas andesíticas que han formado el *plateau* riolítico. Posteriormente otra, de tipo central, de edad Plio-Pleistocénica, con lavas dacíticas a riolíticas y estrato-volcanes andesíticos a dacíticos. Este material volcánico junto a los sedimentos continentales se depositan sobre rocas muy plegadas y erosionadas del Mesozoico y Cenozoico inferior (Lahsen, 1982).

El volcanismo Cenozoico en los Andes Centrales comprende tres asociaciones volcánicas (Coira et al., 1982, 1993), y todas ellas se encuentran representadas en el área de estudio: (1) estrato-volcanes andesíticos – dacíticos del arco principal (Cordillera Occidental) del Mioceno temprano – Pleistoceno; (2) depósitos ignimbríticos y domos en arco principal y región de tras-arco del Mioceno temprano – Plioceno; (3) centros basálticos en el tras arco del Plioceno – Pleistoceno.

El volcanismo moderno aparentemente experimenta poca deformación neógena (Scheuber y Reutter, 1992).

Ignimbritas

El término ignimbrita se deriva de las palabras latinas igni – (fuego) e imbri – (lluvia). Describe a rocas piroclásticas formadas por extendidos depósitos consolidados de flujos piroclásticos (o flujos de ceniza), violentas erupciones de gas sobrecalentado y fragmentos de magma rico en sílice (Sparks et al., 1973).

Una de las provincias ignimbríticas más grandes del mundo se sitúa en el Complejo Volcánico Altiplano – Puna, entre las latitudes 21° - 24° de los Andes Centrales, en el norte de Chile. Dentro de esta área de unos 50.000 km² hubo un periodo mayor de actividad volcánica, hace 3,5 - 6 Ma, durante el cual se emplazaron diversos depósitos ignimbríticos mayores.

La distribución, edad y origen de las ignimbritas en el área de la Puna de Atacama han sido extensamente descritos en diversos estudios (Francis y Baker, 1978; Caffe et al., 2007; de Silva, 1987, 1989b; de Silva y Francis, 1989; Gardeweg y Ramírez, 1985, 1987; Guest, 1969; Lahsen, 1982; Lindsay, 1999; Lindsay et al., 2001a; Marinovic y Lahsen, 1984; Ramírez y Gardeweg, 1982; Rutland et al., 1965; Schmitt et al., 2002; Schnurr et al., 2007).

Las ignimbritas presentes en este sector del Altiplano consisten en tobas con distintos grados de soldamiento, de composición dacítica y riolítica, colores gris-rosado y pardo-rojizo, con texturas vitroclásticas y eutaxíticas (bandas y fragmentos de distintos colores). Las unidades descritas se integran por uno o más flujos piroclásticos, separados entre sí por delgados depósitos piroclásticos aéreos. Las diferencias se basan en sus características petrográficas (contenido y tipo de cristales y matriz), presencia y tipo de pómez o "fiammes", grado de soldamiento, distribución areal, posición estratigráfica y edades radiométricas. Ellas son: Ignimbrita Guatiquina, Ignimbrita Atana, Ignimbrita Pampa Chamaca, Ignimbrita Patao, Ignimbrita Cajón y la Ignimbrita Tuyajto, con un rango de edades que va desde el mioceno superior al Pleistoceno – Holoceno.

Ignimbrita Guatiquina (Mioceno superior-Msg)

Esta unidad denominada por Francis y Baker (1978) se distribuye en el sector sureste del Altiplano. Su localidad tipo corresponde al paso de Guatiquina, reconociéndose también afloramientos en el sector de Pampa del Rincón y Pampa Las Tecas, más al sur. La Ignimbrita Guatiquina se ubica estratigráficamente sobre las formaciones Siglia y Pastos Chicos y está cubierta por la Ignimbrita Atana y la Ignimbrita Cajón. La Ignimbrita Guatiquina forma una superficie inclinada de $1 - 1,5^{\circ}$ hacia el SE, generalmente plana, con algunos frentes abruptos de color blanco y rojo, producto de falla o de erosión diferencial. Además, se observan torres aisladas o grupos de ellas, de hasta 15 m de altura, remanentes de erosión. Hacia el este, estas torres forman cordones en dirección E-SE, asociados a un drenaje tipo "cola de caballo".

Litológicamente, los depósitos de esta unidad corresponden a una unidad de enfriamiento constituida por al menos dos flujos de color pardo-rojizo a gris-rosada e inclusive blanco, con presencia ocasional de fiammes. El grado de soldamiento de esta unidad es variable. Comúnmente, la base es poco soldada, con escasos cristales de plagioclasa y biotita. Hacia el techo, presenta un soldamiento mediano. Es una toba riodacítica, pardo grisáceo, localmente eutaxítica, con fiammes de obsidiana, cristales y pómez rosado o rojizo.

Ignimbrita Atana (Plioceno-Pla)

La Ignimbrita Atana es una de las ignimbritas de gran volumen que se emplaza en el Complejo Volcánico de la Puna durante el Mioceno tardío y el Pleistoceno. Se estima un volumen de al menos 2.500 km³ (Lindsay et al., 2001a; Mason et al., 2004), lo que la clasifica como el cuarto depósito ignimbrítico más grande reconocido en el mundo. La Ignimbrita Atana es una unidad dacítica de gran volumen datada en 4,09 \pm 0,09 Ma y con una potencia total estimada en 40 m (de Silva, 1989b). Esta sobreyace a la Ignimbrita Toconao, de composición riolítica.

La erupción de la Ignimbrita Atana da lugar a la formación de la Caldera La Pacana a partir de un mecanismo de colapso. La caldera de aproximadamente 60 x 25 km se reconoce como una de las calderas más grandes y mejor expuestas del mundo, con una geometría elíptica y con su eje mayor orientado N-S (Ramírez y Gardeweg, 1982).

La Ignimbrita Atana subyace a las ignimbritas Pampa Chamaca y Tuyajto y a los depósitos del Conjunto de Volcanes II. Los depósitos afloran típicamente en las laderas del cordón Cerros de Atana. Su parte central corresponde a un domo estructural resurgente, constituido por tobas fuertemente soldadas, cortadas por un sistema de fallas sub-paralelas y características. Los extensos afloramientos alejados de la caldera dan origen a superficies inclinadas $2,5 - 4^{\circ}$ E, donde la erosión ha originado notables estructuras que forman altas paredes o columnas. Es un extenso flujo de tobas dacíticas rosadas, densamente soldadas cercano al domo resurgente, y menos soldada fuera de los límites de la caldera. Esta ignimbrita está formada por diversos flujos de composición similar. Las unidades alejadas de la caldera corresponden a tobas poco a medianamente soldadas de color blanco a pardo-rosado. Hacia arriba, los distintos flujos se separan por depósitos piroclásticos aéreos. Todos los flujos de esta unidad se caracterizan por la presencia de fenocristales de cuarzo rosado, plagioclasa, biotita cobriza y escasos líticos.

Lindsay (1999) y Lindsay et al. (2001a) resuelven dos asuntos que quedan pendientes en los estudios realizados por Gardeweg y Ramírez: (1) se piensa que la Ignimbrita Atana se distribuye radialmente hacia el oeste, sur y este de la caldera y, además, como franjas de ignimbrita no-consolidada dentro del foso de La Pacana. Según Lindsay, los depósitos del cuadrante noreste de la caldera tiene características únicas y muy distintas a las de la Ignimbrita Atana en cualquier otra parte, y la denomina como Ignimbrita Tara (Figura 5.4); (2) hacia el oeste de la caldera, se describe a la Ignimbrita Atana como la que sobreyace a la Ignimbrita Toconao, de composición riolítica y pobre en cristales. A pesar de la estrecha correlación espacial y temporal, los autores no consideran la posibilidad de que la Ignimbrita Toconao provenga de la misma fuente magmática que la Ignimbrita Atana. de Silva et al. (1988) sugiere que la Ignimbrita Toconao fue la precursora a la Ignimbrita Atana, representando a la cubierta de la cámara magmática, rica en volátiles. Basado en las

observaciones y el re-mapeo del sector Puna, se ha revisado la distribución de la Ignimbrita Toconao y se plantea lo que se observa en la Figura 5.5.

En su mayor parte, las ignimbritas asociadas a La Pacana sobreyacen a una secuencia de ignimbritas pre-caldera, del Mioceno medio – tardío, y descritas por Gardeweg y Ramírez (1987). Lindsay et al. (2001a) realizó una reexaminación de la estratigrafía, geocronología, vulcanología y petrología de la caldera La Pacana y su sistema magmático asociado. De allí, estima entre otras cosas un volumen de 2.500 km³ para la Ignimbrita Atana. Diversas ignimbritas más jóvenes que corresponden a un volcanismo post-caldera afloran dentro de la caldera La Pacana. Estas corresponden a las ignimbritas Pampa Chamaca y Tuyajto. Ambas son de composición riolítica, pero poco más se sabe de ellas.



Fuente: [Modificado de Lindsay et al., 2001a]

Figura 5.4: Afloramiento de la Ignimbrita Atana según: izq.: Gardeweg y Ramírez, 1987; der., Lindsay et al., 2001a. La línea punteada representa la probable extensión de la Ignimbrita Atana bajo la Ignimbrita Tara. Bo.: Bolivia; Ar.: Argentina; Ch.: Chile.

Ignimbrita Pampa Chamaca (Plioceno-Plpc)

Se encuentra sobre las lavas del Conjunto de Volcanes I, la Ignimbrita Guatiquina y la Ignimbrita Atana. Hacia el sur del Altiplano se reconoce esta ignimbrita en la Pampa Las Tecas, rellenando paleorelieves relacionados a calderas de colapso más antiguas y asociadas a las ignimbritas Guatiquina y Atana. Esta ignimbrita podría tener su origen en la depresión actualmente ocupada por el Salar de Aguas Calientes 2 o en alguna estructura ahora cubierta por los volcanes del Cordón Puntas Negras. En la zona, se presenta fuertemente erosionada y aflorando en filas de torres E-SE. Hacia el este, donde forma mesas de color gris-violeta, ocurre en delgadas láminas de espesor máximo 50 cm.



Fuente: [Modificado de Lindsay et al., 2001a]

Figura 5.5 Distribución inferida de la Ignimbrita Toconao. Izq.: antes del 2001; der.: según Lindsay et al., 2001a. Los signos de interrogación indican que la Ignimbrita Toconao podría encontrarse bajo el relleno intra-caldera de Atana. Bo.: Bolivia; Ar.: Argentina; Ch.: Chile.

Se trata de un flujo de ignimbrita de vidrio y cristales, color gris-rosado, de amplia distribución y, en general, delgado. Corresponde a una toba con notables cambios de color, textura y proporción de cristales, las cuales en general están relacionadas con el grado de soldamiento y la potencia del afloramiento. La base corresponde a un nivel vítreo, bien soldado. Hacia arriba, grada a un nivel gris-rosado, medianamente soldado, con abundantes cristales de plagioclasa, biotita cobriza y cuarzo, además de pómez, cuya proporción aumenta hacia el techo. La superficie de erosión presenta un característico diaclasamiento poligonal. En los afloramientos en los alrededores del Salar El Laco, la toba se presenta bien soldada y con abundantes fenocristales de plagioclasa y biotita pequeña, además de delgadas pómez.

Ignimbrita Patao (Plioceno-Plp)

Los afloramientos en la zona de estudio se encuentran al noroeste del Volcán Lascar, también al sur de Socaire, Cerros Peine y cordones de Mal Paso y Corquepe, rellenando quebradas con dirección de flujo E-W. Sobreyace a la Ignimbrita Atana y bajo el Conjunto de Volcanes III.

Corresponde a una toba gris clara, con la porción basal deleznable y la porción superior bien soldada. Está afectada, ocasionalmente, por diaclasamiento columnar y comúnmente presenta una superficie rugosa asociada a drenaje tipo dendrítico en zonas de poca pendiente y a drenaje tipo "cola de caballo" en zonas de pendiente más fuerte. Es una toba gris clara o pardo

rosado claro, con escasos fenocristales de plagioclasa, biotita cobriza y escaso cuarzo. Presenta fragmentos de pómez, rocas y escoria volcánica de color pardo oscuro.

Ignimbrita Cajón (Pleistoceno-Pc)

Sobreyace a la ignimbrita Atana y el Conjunto de Volcanes II. Esta unidad aflora en gran parte del Altiplano chileno. La potencia puede variar entre los 100 m, al sur del Volcán Licancabur, acuñándose hasta espesores de 1 m en Silapenti, al noroeste de Toconao. Se extiende hacia la ladera oriental de la Cordillera de los Andes al noreste de Cerros La Pacana y al sur del Salar de Aguas Calientes 2, los que corresponden a la unidad inferior de este flujo.

Petrográficamente, esta unidad corresponde a una toba débilmente soldada, de color pardo o gris-rosáceo, con fenocristales de cuarzo rosado, plagioclasa frágil, biotita orientada y pequeños cristales de anfíboles y/o piroxenos. Presenta fragmentos de pómez, cuya abundancia es variable.

Ignimbrita Tuyajto (Pleistoceno – Holoceno-Qt)

Corresponde a la más joven del área de estudio. Está constituida por un depósito de flujo reducido, de colores pardo-rojizos, que aflora típicamente en los alrededores de la Laguna Tuyajto. Esta ignimbrita es poco potente, con espesores que van desde algunos decímetros a 3 m. Aun así, se distinguen al menos dos unidades de flujo. Esta ignimbrita se encuentra sobre la Ignimbrita Cajón y cubre además los productos asociados a las unidades volcánicas recientes. Sus afloramientos son discontinuos y su centro de emisión probablemente se ubica en el área del cordón Puntas Negras. Corresponde a una toba moderada a fuertemente soldada, de color pardo rojiza y extensión reducida, con abundantes fenocristales (25%), constituidos por plagioclasas y piroxenos. Además, contiene fragmentos líticos, volcánicos y de pómez. Tiene una base vítrea que grada desde una zona poco soldada hasta una zona bien soldada, con diaclasamiento columnar.

Volcanes

En la zona de estudio, se encuentran numerosos centros volcánicos, los que han dado origen a estrato-volcanes y secuencias volcánicas estratificadas, de composición andesítica y, subordinadamente, dacítica y basáltica. El término estrato-volcanes agrupa estructuras volcánicas de gran tamaño, compuesta por capas alternantes de lavas y piroclastos, los cuales se presentan en complejos de dos o más conos y, ocasionalmente, tienen asociados pequeños domos en sus flancos. Las secuencias estratificadas corresponden a afloramientos aislados de lavas y piroclastos de distintas composiciones, comúnmente plegadas y que no pueden ser directamente relacionadas a centros de emisión. En menor proporción se reconocen cuerpos

sub-redondeados llamados domos y estructuras circulares, que se constituyen por lavas viscosas y de composición principalmente riolítica. Además, hay conos piroclásticos y de escoria, basálticos, correspondientes a estructuras monogenéticas, formadas por la acumulación de escoria marcadamente vesicular, ceniza y lava, en torno a un centro de emisión. Se reconoce un cráter de explosión.

Los volcanes se presentan en forma aislada o formando grupos o complejos de dos o más aparatos volcánicos alineados en varias direcciones, aunque de preferencia NW-SE.

En las cartas geológicas que describen la Puna de Atacama, las lavas de los centros volcánicos se agrupan en tres unidades estratigráficas informales. Esta clasificación se basa en el grado de erosión, relaciones estratigráficas no siempre bien expuestas y dataciones radiométricas.

En estos centros volcánicos se pueden distinguir cinco tipos petrográficos, los cuales corresponden, en orden decreciente de abundancia a andesitas de piroxeno, andesitas de hornblenda y/o biotita, dacitas, basaltos y/o andesitas basálticas y riolitas.

Conjunto de Volcanes I (Mioceno superior-Msv)

Se dispone en discordancia sobre la Formación Siglia y subyace en discordancia a todas las ignimbritas descritas antes. Los estrato-volcanes y domos de esta unidad presentan conos intensamente erosionados, de perfil redondeado e irregular y disectados por quebradas profundas, cuyas lavas son raramente individualizables. El avanzado estado de erosión que los ha afectado ha descubierto, en algunos casos, un núcleo con alteración solfatárica que oscurece la estructura de cono volcánico o domo, pudiendo no ser reconocido como tal, ya que ha perdido completamente la forma original. Las lavas son principalmente andesitas de piroxeno y hornblenda.

Conjunto de Volcanes II (Plioceno-Plv)

Se agrupa aquí el conjunto de volcanes cuyos productos engranan con las ignimbritas del sector. Los estrato-volcanes de esta unidad tienen conos con forma redondeadas, pero conservando su perfil original. Presentan un cráter abierto, erosionado por una o más quebradas. Las coladas de lava, en muchos casos, mantienen rasgos morfológicos originales, aunque raramente individualizables y son en general de composición andesítica. Predominan las andesitas de piroxeno, habiendo bastantes andesitas de hornblenda y/o biotita. En el área de El Laco, la erosión ha descubierto el núcleo de estos centros volcánicos con alteración hidrotermal solfatárica. Los domos y estructuras sub-circulares de esta unidad también conservan gran parte de sus texturas y estructuras originales. Solamente las crestas de flujos de coladas rugosas están redondeadas debido a la alta viscosidad de las lavas.

Conjunto de Volcanes III (Plioceno – Pleistoceno-Qv)

Esta unidad cubre a las dos unidades anteriores y a gran parte de la secuencia de ignimbritas. Se agrupan los estrato-volcanes que conservan su perfil original, cercano a un cono y cuyas cumbres se presentan redondeadas, con cráteres erosionados, generalmente incompletos y poco nítidos. Las coladas presentan rasgos de su morfología original, aunque no siempre son individualizables. Litológicamente, estos estrato-volcanes están constituidos principalmente por andesitas de hornblenda y/o biotita y, en menor proporción, por dacitas.

Depósito Piroclástico de Corral Coquena (Plioceno-Plcc)

En los alrededores de las localidades Corral de Coquena, Cerro Coquena y Laguna Trinchera, se extiende un depósito piroclástico de rocas poco consolidadas. Se ubican estratigráficamente sobre lavas del Conjunto de Volcanes I, pórfidos dacíticos del Mioceno medio-superior y parcialmente a riolitas de Corral de Coquena y la ignimbrita Atana. Subyace a la ignimbrita Pampa Chamaca del Plioceno tardío. Su origen estaría relacionado con el episodio explosivo que generó la estructura circular de Cerro de Coquena, que habría correspondido a un domo volcánico.

Corresponde a un depósito mal estratificado compuesto de cenizas y pómez blancas angulosas. El techo del depósito corresponde a un nivel gris compuesto por grandes fragmentos angulosos de vitrófiros riolíticos.

5.2.5 Depósitos no-Consolidados y Salinos del Cuaternario

Los depósitos consolidados se asignan al cuaternario y son los que se componen por acumulaciones locales de sedimentos, que se depositan sobre las unidades consolidadas más antiguas. Estas rellenan valles y depresiones o se ubican hacia los sectores bajos de las laderas de los cerros, en las llanuras que caracterizan las partes más bajas de las cuencas.

Dado el carácter endorreico de las cuencas de la Puna, la descarga de agua se produce principalmente por evaporación y en menor proporción por evapotranspiración. En consecuencia, varias de estas cuencas presentan depósitos salinos denominados comúnmente salares. Los salares se depositan en las partes más bajas y planas de las cuencas cerradas y están formados por una fracción líquida correspondiente a salmueras, una fracción salina representada por la depositación de diferentes sales transportadas en solución a la cuenca y una fracción sólida constituida por distintos niveles de arena, limo y arcilla. A ninguno de los salares de la Puna de Atacama, a excepción de Tara, confluyen cauces superficiales permanentes de importancia, y la gran mayoría son alimentados sólo por las precipitaciones y aguas subterráneas, suficientes como para mantener pequeñas lagunas de carácter somero.

Depósitos Aluviales (Qal)

Corresponden a los depósitos no consolidados más abundantes dentro del área de estudio. Se encuentran rellenando las depresiones, como también algunas quebradas. Estos depósitos están constituidos por una mezcla heterogénea de gravas, arenas y limos, de composición polimíctica, originados en corrientes de barro, crecidas o por un compuesto de transporte por acción de la nieve y el viento de la cordillera. El espesor varía entre 0,01 - 1 m.

Depósitos Coluviales (Qc)

Son los depósitos generados por gelifracción en la falda de los volcanes y que han sufrido un leve arrastre gravitacional. Estos depósitos son, en general, monomícticos, de bloques angulosos y algunas muestran abrasión eólica. En forma gradual, éstas pueden pasar a constituir depósitos aluviales que se extienden en las bases de los aparatos volcánicos.

Depósitos Lacustres (Ql)

Estos depósitos afloran en las cercanías de las lagunas Quisquiro y Tuyajto. Consisten en gravas y arenas, con componentes piroclásticos (pómez, lapilli, escoria volcánica), lentes de diatomitas y calcarenitas con carófitas. En superficie están cubiertos por una capa delgada de fragmentos pulidos por acción del viento, son de colores claros y presentan depresiones y crestas paralelas a los bordes de estas lagunas, que han sido interpretadas como líneas de costa antiguas.

Depósitos Morrénicos (Qm)

A medida que el glaciar avanza, se desprenden detritos desde el fondo del valle glacial y sus paredes laterales, depositando sedimentos glaciales caóticos. De este modo, depósitos morrénicos se refiere a cualquier acumulación de depósitos sin consolidar que ocurren en ambientes glaciales presentes o pretéritos. Los depósitos morrénicos se reconocen en el Cordón de Puntas Negras entre los 4.350 y 4.900 msnm, a ambos lados de dicho cordón. Las morrenas de fondo rellenan los valles labrados en coladas de lava, entre los principales aparatos volcánicos. La superficie de estos depósitos es irregular ya que los bloques forman pequeños montículos. Las morrenas laterales están adosadas a las paredes de los valles. Se asigna una edad holocénica.

Depósitos Piroclásticos (Qp)

Se distribuyen en las faldas del Volcán Láscar y Aguas Calientes y en el cordón Puntas Negras; consisten en depósitos de escoria volcánica, pómez y ceniza, extruida recientemente y que permanece *in situ*.

Depósitos Laháricos (Qla)

Se encuentran alrededor de los volcanes Láscar y Aguas Calientes. Presentan una coloración gris clara característica, y originan superficies planas con lomajes redondeados. Los rodados que los constituyen alcanzan hasta 80 cm de diámetro, son redondeados y mal seleccionados y presentan, además, cenizas levemente litificadas.

Depósitos Salinos (Qs, Qcl, Qsl, Qcs)

Los Andes del Norte Grande de Chile presentan cuencas cerradas situadas entre los diferentes cordones que forman la cordillera, que en algunos casos presentan depósitos salinos denominados comúnmente salares. Estos se forman por una fracción líquida correspondiente a salmuera, una fracción salina representada por la depositación de diferentes sales transportadas en solución a la cuenca, y una fracción sólida constituida por distintos niveles de arena, limo y arcilla. La salinidad varía junto con los cambios en la flora y fauna, desde niveles muy bajos en los sitios de surgencia, hasta máximos en el interior de las lagunas o riberas alejadas de la surgencia.

Existen varios salares o cuerpos salino-detríticos que encierran lagunas salobres y cuya extensión depende del nivel freático estacional. Los salares o cuerpos salino-detríticos principales que afloran en la zona de estudio son los salares Loyoques o Quisquiro, Aguas Calientes 2, Talar, Laguna Tuyajto y El Laco. Estos depósitos se componen de limos salinos, cloruros, sulfatos y boratos, que se exponen como una banquisa rugosa de color variable entre pardo claro y blanco. Estos cuerpos se depositan en las partes más bajas del área estudiada que son depresiones topográficas de origen principalmente volcano-tectónico, y formadas durante el Plioceno.

Estos depósitos forman parte del relleno sedimentario de cuencas endorreicas que constituyen los salares. Consisten en cubiertas evaporíticas, con niveles freáticos someros. Esta cubierta evaporítica o "costra de sal" puede ser subdividida de acuerdo a su aspecto físico, composición química y/o mineralógica. Basado en estudios anteriores, se pueden distinguir diversos tipos de costra: de cloruros, de transición a cloruros, de sulfatos, de sulfatos y sedimentos, y de limos salinos.

5.2.6 Rocas Intrusivas

Existen escasos afloramientos intrusivos, siendo la mayor parte de ellos pequeños cuerpos porfídicos con características de rocas sub-volcánicas, además de diques y filones. La composición de estos cuerpos es principalmente dacítica y a su vez, están cubiertos por lavas e ignimbritas de diversas edades. Asociados a estos cuerpos hay pequeñas zonas de alteración

hidrotermal. Estos cuerpos originan cerros de perfil relativamente plano y sección basal, en general, alargada.

Pórfidos Dacíticos de Quilapana y Ceja Alta (Mioceno superior-Msqca)

En las vertientes occidentales de los cordones de Quilapana y Ceja Alta, afloran tres cuerpos aislados de pórfidos dacíticos, dispuestos en una franja de dirección aproximada NS, y que cubren una superficie total de alrededor de 20 km². Se incluye en esta unidad el pequeño cuerpo que constituye la cumbre del Cerro Coquena (Cepeda, 1978).

Corresponde a un pórfido dacítico, de color gris-verdoso o gris-blanco, con variadas proporciones de fenocristales blancos de plagioclasa, biotitas negras o rojizas más pequeñas y ocasionalmente cuarzo y feldespato alcalino. La alteración, principalmente silicificación, varía tanto de un afloramiento a otro como dentro del mismo afloramiento.

Diques y Pórfidos de Siglia y Lari (Mioceno superior-Mssl)

Al este de la zona del salar El Laco y hacia el S-SE de la zona de estudio, en las localidades de Siglia, Cerro Imán y ocasionalemte en Lari, se han reconocido pequeños cuerpos intrusivos que conforman montículos cónicos o diques, que afloran en los pequeños cerros de la Serranía Siglia.

Son rocas de color gris claro o verde claro, de granulometría variada, de fina a porfídica, excepcionalmente con fenocristales de hasta 1,5 cm de diámetro. La composición varía de pórfidos riolíticos, en cuerpos mayores, a monzonitas y monzonitas cuarcíferas, con extremos de dioritas cuarcíferas.

Estos diques y pórfidos atraviesan la Fm. Siglia y se encuentran cubiertas por lavas miocenas y por la Ignimbrita Guatiquina, lo cual permite asignar a esta unidad edad entre Terciario inferior a Mioceno superior. Dataciones K-Ar en anfíbolas de monzonitas de Siglia y en roca total hacia el suroeste entregan edades de 10,0 +/-0,9 Ma y 11,8 +/-2,8 Ma, respectivamente, lo que permite asignar una edad miocena superior.

Pórfido Andesítico de Cerro Gigantes (Mioceno – Plioceno-MPlap)

Aflora en los cerros Hónar, Rayado, Gigantes y Peinado. Corresponde a un pórfido andesítico de hornblenda y piroxeno.

Son rocas rosadas porfíricas con fenocristales de tamaño medio de plagioclasa, con piroxeno y anfíbola en proporciones variables.

Pórfido Dacítico Cerros de Sáltar (Mioceno – Plioceno-MPld)

Es un cuerpo alargado en dirección N-S que aflora en los Cerros de Sáltar. Presenta una importante zona de alteración en el extremo norte.

Son rocas grises, porfídicas, con mega-fenocristales de plagioclasa, cuarzo y biotita.

Pórfido Andesítico de Cerro Corona (Mioceno – Plioceno-MPlab)

Aflora en el Cerro Corona y en cerros menores y cercanos. En la cumbre presenta un cuerpo hipabisal, más resistente a la erosión, a cuyo aspecto de corona debe su nombre el cerro.

Son rocas rosadas o gris-verdosas, porfídicas, con proporciones variables de megafenocristales de plagioclasa, biotita, anfíbola y escaso cuarzo.

5.3 Geología Estructural

El Altiplano y la Puna se desarrollan bajo un régimen continuo de subducción de corteza oceánica bajo corteza continental, donde se han realizado diversos estudios orientados a identificar los mecanismos responsables de iniciar y controlar la evolución cenozoica del *plateau* ubicado en los 15° - 26° S. El gran desafío es comprender el mecanismo que genera esta unidad morfo-estructural en la porción central de Los Andes, fenómeno único a lo largo de los 60.000 km de márgenes convergentes en la Tierra, y el por qué se desarrolla únicamente durante el Cenozoico, siendo que la configuración tectónica actual persiste desde el Jurásico.

La evolución miocena-cuaternaria de la actividad magmática de los Andes Centrales se asocia a dos tipos de estructuras principales, de orientación N-S y NW-SE. Por una parte, el volcanismo de arco describe la actividad volcánica que se desarrolla durante el Mioceno-Holoceno en la Cordillera Occidental, donde la zona de arco actual se delimita por un acentuado frente de estrato-volcanes que se extienden paralelos al margen occidental sudamericano, entre los 14° y los 27°S, de orientación N-S; por otra parte, y hacia al este, se centra a lo largo de estructuras de carácter regional y de orientación NW-SE, y que muestran una componente sinistral. Una de estas estructuras transcurrentes, denominada Calama-Olocapato-El Toro, puede trazarse por unos 300 km al este del arco, hasta el límite con la zona subandina, en la Cordillera Oriental. Esta estructura se inicia en el sector de la Puna de Atacama, en el cordón volcánico de Puntas Negras, y su prolongación se reconoce por la presencia de centros magmáticos del Mioceno, que se alinean sobre la traza de la falla (Matteini et al., 2002a; Matteini et al., 2002b). El volcanismo de trasarco a lo largo de los lineamientos NW-SE se relaciona a variaciones en el ángulo de subducción de la placa de Nazca subductante (Kay et al., 1999).

Matteini et al. (2002a, b), han estudiado la evolución del volcanismo de arco-trasarco a lo largo de una de las estructuras transversales más extensas de los Andes Centrales, la falla Calama-Olocapato-El Toro, a los 24°S. La variación composicional del volcanismo de arco, hacia el volcanismo de transarco, proporciona aproximaciones a la petrogénesis y a las regiones donde se origina el magma. Los centros volcánicos de Puntas Negras y Rincón corresponden a un magmatismo de tipo arco y tienen una típica signatura geoquímica calcoalcalina. Las composiciones de los productos volcánicos son calco-alcalinos y predominan las andesitas y dacitas. Hacia el este del arco, los complejos Tul-Tul, Del Medio y Pocitos están empobrecidos en tierras raras pesadas y podrían derivarse de un 20-30 % de fusión parcial de una metabasita de la corteza inferior, rica en granate. Estos líquidos podrían mezclarse con magmas de arco en la base de la corteza. Más al este, los productos de los complejos volcánicos de Quévar y Aguas Calientes muestran una signatura de corteza superior (alto 86Sr/87Sr, bajo 143Nd/144Nd), y podrían representar a una mezcla de un 20-30 % de los magmas descritos para Tul-Tul, Del Medio y Pocitos, y entre un 70-80 % de fundidos de la corteza superior. El volcanismo de trans-arco describe a la actividad volcánica del Mioceno que se desarrolla detrás (más al este) del frente de arco. Los productos volcánicos que se relacionan a estructuras transversales a voluminosas ignimbritas dacíticas.

5.3.1 Fallas

El volcanismo en los Andes Centrales se produce en dos sectores bien definidos: la Cordillera Occidental y el *plateau* Altiplano – Puna. En la Cordillera Occidental, la actividad volcánica ha sido continua desde el Mioceno al Holoceno. En el *plateau* Altiplano – Puna se reconocen dos estilos volcánicos que difieren en su distribución temporal y espacial: (a) volcanismo asociado a lineamientos transversales orientados NW – SE, del Mioceno medio a temprano y (b) centros volcánicos monogenéticos del Plioceno – Cuaternario, ubicados principalmente en el sector sur de la Puna (Matteini et al., 2002a, b).

La actividad volcánica Miocena que se desarrolla en la Puna se relaciona a la estructura transversal Calama – Olocapato – El Toro, y comprende voluminosas ignimbritas dacíticas, diversos estrato-volcanes y domos de composición andesítica – dacítica (Francis et al., 1989; Coira et al., 1993, 1996; Petrinovic, 1999; Seggiaro, 1994). El volcanismo de tras-arco asociado a lineamientos NW-SE, tiene que ver con variaciones en el ángulo de subducción de la placa de Nazca (Kay et al., 1999).



Fuente: [Modificado de Matteini et al., 2002a, b]

Figura 5.6: Bosquejo que indica la distribución de volcanismo de arco y de tras-arco. En rojo, influencia de falla Calama – Olocapato – El Toro en estrato-volcanes y centro ignimbrítico de la Puna; en verde, área de estudio.

5.3.2 Lineamientos

La Carta Geológica de Chile, escala 1:250.000, indica que en la Puna de Atacama existen manifestaciones estructurales. Se resaltan una serie de fallas normales y lineamientos, localizados en los sectores de Lomas de Siglia, Alto de Lari, Cordón de Ceja Alta, Cordón de La Pacana, y a ambos flancos del Salar de Loyoques o Quisquiro, todas ubicadas fuera de los límites del sistema de cuencas piloto de la II Región de Chile.

Estas estructuras presentan dos orientaciones características: NE-SW y NW-SE, que por su dirección pueden relacionarse a la falla regional Clama – Olocapato – El Toro. Estas fallas se consideran un rasgo estructural importante, ya que son de extensión regional. Localmente se presentan en grupos de fallas y se prolongan en muchos casos por extensiones de varios kilómetros.

El rasgo estructural más sobresaliente de la cobertura volcánica corresponde a la caldera resurgente La Pacana y que está asociada a la extrusión de la Ignimbrita Atana, ya descrito anteriormente. Se asocian a este fenómeno fallas normales y lineamientos en los cordones de Quilapana y Ceja Alta, y el Cerro Coquena hasta el cordón de Alto de Lari. El domo resurgente corresponde al cordón Cerros de La Pacana, y consiste en un domo estructural asimétrico, que se eleva unos 1.000 m sobre el foso, afectado por un sistema complejo de fallas normales de rumbo NW. Fueron formadas por extensión durante el plegamiento y fracturas densamente espaciadas, normales y paralelas a la estratificación. Las fallas son paralelas al eje longitudinal del domo y forman un complejo sistema de graben.

460625 COPIA



Fuente: [Modificado de SERNAGEOMIN, Hojas Toconao (1982) y Río Zapaleri (1985)]

460625 COPIA

Figura 5.7: Estructuras, lineamientos y geología superficial para sector de cuencas piloto de la II Región de Chile. Simbología de geología de superficie en Figura 5.3.

6 CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA

La caracterización hidrológica de los sistemas piloto de la II 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 la Región de Antofagasta predominan cinco tipos de clima, con características desérticas o de Tundra, que varían de acuerdo a su distancia al mar en bandas que van de norte a sur y están fuertemente influenciados por la topografía. De mar a cordillera los climas de esta Región se ordenan como sigue (ver Figura 6.1):

- Desértico con Nublados Abundantes, en la Costa.
- 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 toda la Precordillera, incluyendo la depresión pre-Andina del Salar de Atacama.
- Tundra por Efecto de Altura con Precipitación Estival, en la Cordillera de los Andes, y
- Tundra por Efecto de Altura con Escasa o Nula Precipitación, en la Cordillera de los Andes, casi en el límite de las regiones de Antofagasta y Atacama.

Las cuencas del Sector Pampa Colorada (cuencas piloto de la Región de Antofagasta) están completamente insertas en una zona con clima de Tundra por Efecto de Altura con Precipitación Estival. Este clima se caracteriza por bajas temperaturas y humedad relativa, aire muy seco y de baja densidad en comparación a lo que ocurre a nivel del mar. La baja humedad disminuye la capacidad del aire para retener calor, lo que amplifica la oscilación térmica entre el día y la noche.

Las precipitaciones en el área de estudio están influenciadas por estar cerca de la transición entre dos regímenes. Por una parte el régimen de precipitaciones que predomina en la costa oeste del hemisferio sur, los sistemas frontales generados en el Pacífico y por otra la influencia tropical de la cuenca del Amazonas, que produce tormentas en verano. También debe tomarse en cuenta la presencia de El Niño, fenómeno que se produce con una frecuencia variable de 4 a 7 años y que consiste en el desplazamiento de la corriente fría de Humboldt por la corriente cálida ecuatorial que aumenta las precipitaciones en estas latitudes.

En la zona hay de forma permanente una alta luminosidad y radiación solar. Las temperaturas mínimas diarias están normalmente bajo los 0° C y durante el invierno pueden bajar fácilmente los -10° C.



Fuente: [Modificado de IGM]

Figura 6.1: Climas de las Regiones en que se encuentra el Altiplano – Puna de Chile

6.2 Análisis de Precipitaciones

En el sistema piloto de las cuencas de los salares El Laco, Aguas Calientes 2, Laguna Tuyajto, Puntas Negras, Pampa Colorada y Pampa Las Tecas (II Región) se dispone de 4 estaciones pluviométricas instaladas con el convenio PUC-DGA. Además, se seleccionaron 3 estaciones cercanas de la DGA y se dispone de estadística de precipitación en 6 estaciones pertenecientes a la empresa GeoAguas Consultores (llamadas estaciones GeoAguas en el informe). De las 13 estaciones disponibles 8 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 (PSAD	1956)	Altitud
				Este	Norte	[msnm]
1 *	PUC-DGA		Tuyajto	646.828	7.353.961	4.187
2 *	PUC-DGA		El Laco	665.437	7.367.499	4.449
3 *	PUC-DGA		Puntas Negras	658.814	7.377.199	4.459
4 *	PUC-DGA		A. Calientes 2	641.914	7.398.591	4.323
5	DGA	02500017-K	Camar	606.276	7.411.224	3.020
6	DGA	02500019-6	Socaire	613.485	7.391.129	3.251
7	DGA	02500021-8	Talabre	613.735	7.421.435	3.600
8 *	GeoAguas		Laco Estación Meteorológica	659.240	7.364.924	4.344
9 *	GeoAguas		Laco Camino Puntas Negras	656.630	7.372.398	4.683
10 *	GeoAguas		Laguna Tuyajto	644.260	7.352.781	3.990
11	GeoAguas		ACS Evaporímetros (salar)	636.531	7.353.164	3.920
12	GeoAguas		ACS sector Purichare	623.501	7.335.263	4.226
13 *	GeoAguas		Pampa Las Tecas	655.571	7.344.709	4.480

Tabla 6.1: Estaciones pluviométricas seleccionadas para el sistema piloto de la II Región.

* Estaciones ubicadas al interior de las cuencas del sistema piloto

460625 COPIA



Figura 6.2: Estaciones pluviométricas seleccionadas para el sistema piloto de la II 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. Las estaciones pertenecientes a GeoAguas fueron instaladas en 2005 y 2006, teniendo un registro de aproximadamente 2 años a nivel horario y diario. En cambio, en las estaciones pertenecientes a la DGA 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. De las 13 estaciones seleccionadas solamente la estación Aguas Calientes 2 (PUC-DGA) se encuentra suspendida debido a un robo del panel solar y la batería. 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 para el año hidrológico (Octubre-Septiembre). Se observa que la estadística de las estaciones de la DGA a nivel mensual y anual se inicia en la década de 1970 y llega sólo hasta el año hidrológico 2006-2007. Sin embargo se recopilaron datos a nivel diario hasta junio de 2008 en estas estaciones. En las estaciones PUC-DGA se disponen de datos a nivel mensual, horario y diario hasta febrero de 2009. 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		Tuyajto	4.187	V	1
2 *	PUC-DGA		El Laco	4.449	V	1
3 *	PUC-DGA		Puntas Negras	4.459	V	1
4 *	PUC-DGA		A. Calientes 2	4.323	S	1
5	DGA	02500017-K	Camar	3.020	V	31
6	DGA	02500019-6	Socaire	3.251	V	31
7	DGA	02500021-8	Talabre	3.600	V	26
8 *	GeoAguas		Laco Estación Meteorológica	4.344	V	2
9 *	GeoAguas		Laco Camino Puntas Negras	4.683	V	2
10 *	GeoAguas		Laguna Tuyajto	3.990	V	2
11	GeoAguas		ACS Evaporímetros (salar)	3.920	V	2
12	GeoAguas		ACS sector Purichare	4.226	V	2
13 *	GeoAguas		Pampa Las Tecas	4.480	V	2

Tabla 6.2: Vigencia y años de registro en las estaciones pluviométricas seleccionadas para el sistema piloto de la III Región.

* Estaciones ubicadas al interior del sistema piloto

** V: Vigente; S: Suspendida







N°	ESTACIÓN	2007			2008								2009							
		Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar
1	Tuyajto																			
2	El Laco																			
3	Puntas Negras (ex Amarilla)																			
4	A. Calientes 2																			
	: 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																		



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 II Región se dispone solamente de un año de estadística entre noviembre de 2007 y febrero de 2009, en las estaciones GeoAguas se dispone de aproximadamente 2 años de registro a partir del año hidrológico 2006-2007, y en las estaciones DGA se dispone de más de 20 años de registros de años completos. Por consiguiente, 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 PUC-DGA y GeoAguas Consultores permiten establecer solamente el comportamiento puntal de la precipitación para los años hidrológicos 2006-2007 y 2007-2008.

En la Figura 6.5 se presentan las series de precipitación anual para el año hidrológico en las estaciones DGA seleccionadas. En general las series tienden a variar alrededor de los 35 mm, sin embargo, se observa la presencia de tormentas importantes especialmente en los años 1974, 1980, 1983, 1986 y 2000.







Figura 6.5: Series de precipitación anual en las estaciones DGA seleccionadas para el sistema piloto de la II Región.

La Tabla 6.3 presenta las propiedades estadísticas de la series de precipitación anual en las estaciones seleccionadas para el año hidrológico (Oct-Sep). Sin embargo, para las estaciones PUC-DGA el valor promedio corresponde a la precipitación caída entre noviembre de 2007 y

octubre de 2008. Se observa que en las estaciones de la DGA el coeficiente de asimetría es positivo indicando que la mayoría de registros están concentrados más cerca del valor mínimo que del valor máximo. El coeficiente de variación, desviación típica sobre el promedio, varía entre 0,76 y 0,85.

N°	Estación Pluviométrica		Años Completos	Mínimo	Máximo	Promedio	Desv. Est.	Coef. Asim.	Coef. Var.
1 :	*	Tuyajto	1	48,5	48,5	48,5	-	-	-
2 :	*	El Laco	1	62,3	62,3	62,3	-	-	-
3 :	*	Puntas Negras	1	19,0	19,0	19,0	-	-	-
5		Camar	31	2,0	125,0	37,1	30,9	1,17	0,83
6		Socaire	31	0,0	147,9	43,8	37,3	1,39	0,85
7		Talabre	26	5,6	215,6	67,9	51,4	1,22	0,76
8 :	*	Laco Estación Meteorológica	2	30,5	52,3	41,4	-	-	-
9 :	*	Laco Camino Puntas Negras	2	37,3	68,3	52,8	-	-	-
10 *	*	Laguna Tuyajto	2	26,3	48,5	37,4	-	-	-
11		ACS Evaporímetros (salar)	2	20,5	32,0	26,3	-	-	-
12		ACS sector Purichare	2	19,5	36,0	27,8	-	-	-
13 *	*	Pampa Las Tecas	2	23,3	43,5	33,4	-	-	-

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 II Región.

* Estaciones ubicadas al interior de las cuencas del sistema piloto



Figura 6.6: Precipitación media anual en las estaciones seleccionadas. El valor presentado para las estaciones PUC-DGA corresponde al año hidrológico (2007-2008).

En la Figura 6.6 se presenta la precipitación anual en las estaciones PUC-DGA, GeoAguas y DGA ordenadas de norte a sur. Se observa que el agua caída en las estaciones PUC-DGA,

entre noviembre de 2007 y octubre de 2008, y en las estaciones GeoAguas es similar a la precipitación media registrada históricamente en las estaciones DGA.

La Figura 6.7 presenta la precipitación mensual entre noviembre de 2007 y octubre de 2008 en las estaciones PUC-DGA ordenada de acuerdo al año hidrológico (Oct-Sep). En la Figura 6.8 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 6.9 presenta la precipitación media mensual para las estaciones GeoAguas.

La mayor precipitación se registró en el mes de diciembre de 2007 para la estación Tuyajto, en enero de 2008 en la estación El Laco, y en febrero de 2008 en la estación Puntas Negras. En las estaciones DGA la mayor precipitación se registra en los meses de enero, febrero y marzo. En la mayoría de estaciones GeoAguas los meses con mayor precipitación son enero y febrero, a excepción de la estación Laguna Tuyjato donde el mes más lluvioso corresponde a agosto. En términos generales se observa un comportamiento homogéneo en la estacionalidad de la precipitación, siendo enero y febrero los meses más lluviosos.







Figura 6.7: Series de precipitación mensual para el periodo Noviembre 2007 – Octubre 2008, ordenada de acuerdo al año hidrológico (Oct-Sep), en las estaciones PUC-DGA de la II Región.

460625 COPIA



7. Talabre



Figura 6.8: Series de precipitación media mensual y probabilidades de excedencia empíricas del 15% y 85% en las estaciones DGA de la II Región seleccionadas.


Figura 6.9: Series de precipitación media mensual en las estaciones GeoAguas.

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. Se observa que más del 60% de la precipitación anual ocurre en el periodo Diciembre - Marzo en todas las estaciones seleccionadas, excepto en Laguna Tuyajto (GeoAguas). En las estaciones DGA, que tienen un registro mayor a 20 años de extensión, más del 75% de la precipitación ocurre entre diciembre y marzo. Por consiguiente, se evidencia que el comportamiento de las precipitaciones en el sistema piloto de la II Región está influenciado por el denominado invierno boliviano.

N°	Fuente	Estación	Diciembre	- Marzo	Abril - N	oviembre
			[mm]	%	[mm]	%
1 *	PUC-DGA	Tuyajto	42,0	86,6	6,5	13,4
2 *	PUC-DGA	El Laco	61,3	98,4	1,0	1,6
3 *	PUC-DGA	Puntas Negras	16,7	87,9	2,3	12,1
5	DGA	Camar	30,8	81,1	7,1	18,9
6	DGA	Socaire	32,1	75,7	10,3	24,3
7	DGA	Talabre	49,9	78,3	13,9	21,7
8 *	GeoAguas	Laco Estación Meteorológica	41,0	99,1	0,4	0,9
9 *	GeoAguas	Laco Camino Puntas Negras	51,1	96,9	1,6	3,1
10 *	GeoAguas	Laguna Tuyajto	21,8	23,9	69,4	76,1
11	GeoAguas	ACS Evaporímetros (salar)	18,4	67,4	8,9	32,6
12	GeoAguas	ACS sector Purichare	25,1	87,0	3,8	13,0
13 *	GeoAguas	Pampa Las Tecas	32,0	94,5	1,9	5,5

Tabla 6.4: Precipitación estacional en las estaciones seleccionadas de la III 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 la estación Camar (DGA) se dispone de registros entre enero de 1979 y junio de 2008, para la estación Socaire (DGA) entre agosto de 1974 y junio de 2008, y para la estación Talabre (DGA) entre agosto de 1995 y junio de 2008. En la Figura 6.11 se presentan los hietogramas de precipitación diaria en las estación Meteorológica, Laco Camino Puntas Negras y ACS sector Purichare (GeoAguas) se dispone de información de precipitación diaria entre noviembre de 2008; y en la estación Pampa Las Tecas entre noviembre de 2006 y mayo de 2008. La Figura 6.12 presenta la variación de la magnitud de la precipitación diaria entre noviembre de 2007 y febrero de 2009 en las estaciones seleccionadas. Se observa que la mayoría de tormentas ocurre casi en forma simultánea en la zona que cubre las estaciones seleccionadas. Este comportamiento es más marcado en enero de 2008, donde ocurrió una cantidad importante de tormentas.

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 6.10. 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 6.13 a la Figura 6.20 presentan en forma gráfica estas probabilidades para cada uno de los meses del año, en las estaciones ubicadas al interior del sistema piloto. Para el resto de estaciones estos resultados se presenta en el ANEXO I (AI.1).



Figura 6.10: Esquema del modelo de Markov para la precipitación diaria. El estado 1 corresponde a Seco (S) y el 2 a Lluvia (P).



Figura 6.11: Hietogramas en las estaciones seleccionadas de la II Región para el periodo Nov 2007 – Feb 2009.



Figura 6.11: Hietogramas en las estaciones seleccionadas de la II Región para el periodo Nov 2007 – Feb 2009. (Continuación).



Figura 6.11: Hietogramas en las estaciones seleccionadas de la II Región para el periodo Nov 2007 – Feb 2009. (Continuación).



Figura 6.11: Hietogramas en las estaciones seleccionadas de la II Región para el periodo Nov 2007 – Feb 2009. (Continuación).



Figura 6.12: Registro simultáneo de la magnitud de precipitación diaria en las estaciones seleccionadas (ordenadas de norte a sur) para el periodo Nov 2007 – Feb 2009.



Figura 6.13: Probabilidades de estar en estado seco (S) y lluvia (P), y probabilidades de transición entre estados para la estación Tuyajto.



Probabilidades Empíricas de Estar en un Estado

Figura 6.14: Probabilidades empíricas de estado seco (S) y lluvia (P), y de transición entre estados para la estación El Laco.



Probabilidades Empíricas de Estar en un Estado



Figura 6.15: Probabilidades empíricas de estado seco (S) y lluvia (P), y de transición entre estados para la estación Puntas Negras.



Figura 6.16: Probabilidades empíricas de estado seco (S) y lluvia (P), y de transición entre estados para la estación Aguas Calientes 2.



Figura 6.17: Probabilidades empíricas de estado seco (S) y lluvia (P), y de transición entre estados para la estación Laco Estación Meteorológica.



Probabilidades Empíricas de Estar en un Estado

Figura 6.18: Probabilidades empíricas de estado seco (S) y lluvia (P), y de transición entre estados para la estación Laco Camino Puntas Negras.





Jul

Ago

Sep

Oct

Nov

Dic

Jun

0,0

Ene

Feb

Mar

Abr

May



Probabilidades de Empíricas de Transición



Figura 6.20: Probabilidades empíricas de estado seco (S) y lluvia (P), y de transición entre estados para la estación Pampa Las Tecas.

Los resultados presentados en Figura 6.13 a la Figura 6.20 y en el ANEXO I (AI.1) muestran que los meses con mayor probabilidad de estar en estado de lluvia son generalmente enero y febrero. Mientras que los meses con menor probabilidad de lluvia son julio y agosto. En el mes de enero esta probabilidad varía alrededor de 20%, en las estaciones ubicadas al interior del sistema piloto. En las estaciones DGA, que se encuentran localizadas fuera del sistema piloto, la probabilidad de estar en estado de lluvia en enero se mantiene alrededor de 10%. En las estaciones de la DGA estas probabilidades se pueden considerar de largo plazo ya que fueron obtenidas con series de más de 20 años de registros.

En la Figura 6.21 a la Figura 6.28, 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 6.21: Probabilidad de permanencia en un estado (S = seco y P = Lluvia) durante k días para la estación Tuyajto.



Figura 6.22: Probabilidad de permanencia en un estado (S = seco y P = Lluvia) durante k días para la estación El Laco.



Figura 6.23: Probabilidad de permanencia en un estado (S = seco y P = Lluvia) durante k días para la estación Puntas Negras.



Figura 6.24: Probabilidad de permanencia en un estado (S = seco y P = Lluvia) durante k días para la estación Aguas Calientes 2.



Figura 6.25: Probabilidad de permanencia en un estado (S = seco y P = Lluvia) durante k días para la estación Laco Estación Meteorológica.



Figura 6.26: Probabilidad de permanencia en un estado (S = seco y P = Lluvia) durante k días para la estación Laco Camino Puntas Negras.



Figura 6.27: Probabilidad de permanencia en un estado (S = seco y P = Lluvia) durante k días para la estación Laguna Tuyajto.



Figura 6.28: Probabilidad de permanencia en un estado (S = seco y P = Lluvia) durante k días para la estación Pampa Las Tecas.

6.2.2.3 Análisis de la Precipitación Horaria

Se dispone de registros de precipitación a nivel horario solamente en las estaciones PUC-DGA y GeoAguas. 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 6.29 a la Figura 6.32 para las estaciones PUC-DGA, y en el ANEXO I (AI.3) para las estaciones GeoAguas. Los valores de estas probabilidades agrupados en tramos de 6 horas se presentan en la Tabla 6.5 donde se han destacado los valores diferentes de cero. En la 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.

Horas	20	07						20	08						20	09
	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb
							Tuya	njto								
00:00-06:00	0,00	0,00	0,35	0,00	0,00	0,00	0,00	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	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,27	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12:00-18:00	0,00	0,13	0,52	0,03	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00
18:00-00:00	0,00	0,00	0,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
							El La	aco								
00:00-06:00	0,00	0,00	0,06	0,00	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	0,00	0,00	0,03	0,03	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00
12:00-18:00	0,03	0,00	0,39	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,06	0,03	0,08
18:00-00:00	0,00	0,00	0,26	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,03	0,03	0,00
						P	untas I	Negras								
00:00-06:00	0,00	0,00		0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00				0,14	0,03	0,04
06:00-12:00	0,00	0,00		0,07	0,00	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00				0,07	0,00	0,00
12:00-18:00	0,07	0,00		0,14	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00				0,07	0,00	0,00
18:00-00:00	0,00	0,00		0,10	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00				0,07	0,03	0,04
						Agu	ias Ca	lientes	2							
00:00-06:00	0,00	0,00	0,04													
06:00-12:00	0,00	0,00	0,00													
12:00-18:00	0,00	0,10	0,12													
18:00-00:00	0,00	0,03	0,04													

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

Horas						Mes	es					
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
				Laco Es	stación M	leteorolo	ógica					
00:00-06:00	0,05	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
06:00-12:00	0,08	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
12:00-18:00	0,11	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
18:00-00:00	0,10	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00
				Laco C	amino Pu	untas Ne	gras					
00:00-06:00	0,02	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
06:00-12:00	0,10	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12:00-18:00	0,27	0,12	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00
18:00-00:00	0,05	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
				I	aguna T	uyajto						
00:00-06:00	0,03	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
06:00-12:00	0,03	0,04	0,00	0,00	0,00	0,07	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,02
12:00-18:00	0,08	0,05	0,00	0,02	0,00	0,00	0,03	0,03	0,03	0,05	0,12	0,11
18:00-00:00	0,10	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00
				AC	S Evapor	rómetros	3					
00:00-06:00	0,05	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
06:00-12:00	0,02	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,03	0,00
12:00-18:00	0,11	0,12	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,05	0,10	0,08	0,10	0,05
18:00-00:00	0,08	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00	0,00
				ACS	S Sector 1	Purichar	e					
00:00-06:00	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
06:00-12:00	0,03	0,04	0,02	0,02	0,02	0,00	0,03	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
12:00-18:00	0,15	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18:00-00:00	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
				Pa	ampa Las	s Tecas						
00:00-06:00	0,03	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02
06:00-12:00	0,03	0,02	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12:00-18:00	0,13	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,03	0,00	0,00	0,06	0,05
18:00-00:00	0,13	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,00

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



Figura 6.29: Probabilidad de lluvia a una determinada hora en la estación Tuyajto.



Figura 6.29: Probabilidad de lluvia a una determinada hora en la estación Tuyajto. (Continuación)



Figura 6.30: Probabilidad de lluvia a una determinada hora en la estación El Laco.



Figura 6.30: Probabilidad de lluvia a una determinada hora en la estación El Laco. (Continuación)



Figura 6.31: Probabilidad de lluvia a una determinada hora en la estación Puntas Negras.



Figura 6.32: Probabilidad de lluvia a una determinada hora en la estación Aguas Calientes 2.

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 las cuencas 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 6.33 presenta la variación de la precipitación media anual con la altitud en las estaciones de la II Región y que fueron seleccionadas en la Parte III de este estudio (Hidrología Regional del Altiplano). Además se colocaron las estaciones PUC-DGA, GeoAguas y DGA seleccionadas para el análisis del sistema piloto. De acuerdo a la hidrología regional, en la II Región se estimó un gradiente de 6 mm cada 100 m de altitud a partir de los 2.250 msnm.

Se observa que la variación de la precipitación con la altura en el único año de registro que se cuenta en las estaciones PUC-DGA, localizadas sobre los 3.400 msnm, no sigue la tendencia de las estaciones utilizadas en el estudio hidrológico regional. Esto se debe a que en el hidrológico 2007-2008 la cantidad de agua caída fue mucho menor a lo que se registró históricamente en las estaciones DGA. Sin embargo, es posible obtener un gradiente de 2,0 mm por cada 100 m de altura para las estaciones PUC-DGA y GoeAguas, el cual es menor que el gradiente estimado en el análisis regional.



Figura 6.33: Comparación de la variación de la precipitación media anual con la altitud en las estaciones DGA de la II 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 6.34 se presentan estas isoyetas para el sistema piloto de la II Región. Se incluyen los valores de la precipitación media anual en las estaciones seleccionadas



Figura 6.34: Mapa de isoyetas en la zona del sistema piloto de la II 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 6.35. Se observa en general que en las 3 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 6.35. Valores clasificados de q_{ij} para la precipitación anual en las estaciones DGA ordenadas de norte a sur.

6.3 Escurrimientos

Dentro del sistema piloto de la II Región los únicos aportes superficiales permanentes que disponen de mediciones de caudal se encuentran en las cuencas de la Laguna Tuyajto y Salar de Aguas Calientes 2. Estos escurrimientos son alimentados por vertientes ubicadas cerca de los salares, y por aportes difusos a los largo de los cauces. El promedio de los escurrimientos superficiales es de 94 L/s y 140 L/s para la Laguna Tuyajto y Salar de Aguas Calientes 2, respectivamente. Los pocos registros de caudal que se dispone fueron realizados en forma puntual en los años 2006 y 2007, por lo que no es posible realizar un análisis estadístico de estos. El detalle de la ubicación de estos escurrimientos y las mediaciones realizadas se presenta Acápite 8.7.3 "Descarga por Vertientes Naturales".

6.4 Análisis de Temperatura y Evaporación

La información de temperatura y evaporación de tanque en las cuencas del sistema piloto de la II Región es escasa. Se dispone de una estación cercana perteneciente a la DGA con registros de temperatura y evaporación. Al interior de la cuenca de Puntas Negras se dispone solamente de una estación instalada con el convenio PUC-DGA que registra temperatura. Además se dispone del registro de evaporación en 4 estaciones pertenecientes a GeoAguas. 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 II Región.

6.4.1 Análisis de Temperatura

A través del convenio PUC-DGA se instaló la estación meteorológica Puntas Negras, que registra datos de temperatura a nivel horario y se encuentra ubicada en la cuenca del mismo nombre. Por otra parte, se dispone del registro de temperatura en la estación Socaire, perteneciente a la DGA y ubicada en las cercanías del sistema piloto de la II Región. Esta última estación se encuentra actualmente suspendida. La Tabla 6.7 presenta la ubicación y altitud de estas estaciones, y en la Figura 6.43 se presentan en forma gráfica. En la estación Socaire (DGA) se disponen de series mensuales y anuales de temperatura mínima promedio, mínima absoluta, máxima promedio y máxima absoluta.

Tabla	6.7:	Estaciones	meteorológicas	con	registros	de	temperatura	seleccionadas	para	el
sistem	a pilo	oto de la II R	legión.							

N°	Fuente	Código BNA	Estación Pluviométrica	UTM (PSAI	0 1956)	Altitud
				Este	Norte	[msnm]
1	* PUC-DGA		Puntas Negras	658.814	7.377.199	4.459
2	DGA	02500019-6	Socaire	613.485	7.391.129	3.251

* Estaciones ubicadas al interior de las cuencas del sistema piloto



Figura 6.36: Estaciones meteorológicas con registros de temperatura seleccionada para el sistema piloto de la II Región.

6.4.1.1 Información Disponible

La estación Puntas Negras (PUC-DGA) fue instalada en octubre de 2007 por lo que se cuenta con aproximadamente un año de estadísticas de temperatura. En la estación Socaire (DGA) se dispone de 12 años de estadística hasta el año 1998. La Tabla 6.8 presenta un resumen del número de años con registro de información y vigencia de las estaciones seleccionadas. La disponibilidad de la estadística de temperatura en las estaciones seleccionadas a nivel anual se presenta en la Figura 6.37. La disponibilidad de datos a nivel mensual en la estación Puntas Negras (PUC-DGA) se presenta en la Figura 6.38.

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

N°	Fuente	Código BNA	Estación Meteorológica	Altitud	Estado	Años de
				[msnm]	**	Registro
1 *	PUC-DGA		Puntas Negras	3.874	V	1
2 *	DGA	02500019-6	Socaire	3.251	S	12

* Estaciones ubicadas al interior del sistema piloto

** V: Vigente; S: Suspendida

N°	ESTACION		1	196	51-	19	70						1	197	71-	-19	80)			198	81-	-19	90						19	91	-2	200	00						20	00	1-1	200)9	
1	Puntas Negras																																												
2	Socaire																																												
		: A	١ñc	o c	on	in	for	m	aci	ón	co	om	ple	eta									: /	٩ñc) C	on '	7 a	9	me	ese	s d	e	inf	orı	ma	aci	ón								
		: Año con 10 u 11 meses de información										: /	٩ñc	o c	on	me	eno	s ć	le 7	7 m	nes	ses	de	e i	nfc	orr	na	cid	ón																

Figura 6.37: Disponibilidad de datos anuales de temperatura en las estaciones seleccionadas para el sistema piloto de la II Región.



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

: Mes con menos de 10 meses de información

Figura 6.38: Disponibilidad de datos mensuales de temperatura en las estaciones PUC-DGA del sistema piloto de la II Región

6.4.1.2 Análisis de la Temperatura Anual y Mensual

En la estación Puntas Negras (PUC-DGA) se dispone solamente de algunos meses de información. En cambio, en la estación Socaire (DGA) se dispone de 12 años de registro. Por lo tanto, en esta última estación es posible obtener estadígrafos sobre el comportamiento un poco más a largo plazo de la temperatura a nivel anual y mensual en el sistema piloto.

Las series anuales de temperatura mínima absoluta y promedio, máxima promedio y absoluta se presentan en forma gráfica en la Figura 6.43 para la estación Socaire (DGA). En la Tabla 6.9 se presentan los principales estadígrafos de las series anuales de temperatura mínima absoluta y promedio, máxima promedio y absoluta.



Figura 6.39: Series anuales de temperatura mínima absoluta y promedio, máxima promedio y absoluta, en la estación Socaire (DGA).

Tabla 6.9:	Propiedades	estadísticas	de la	s series	anuales	de	temperatura	mínima	absoluta	у
promedio,	máxima pron	nedio y absol	luta, e	n la esta	ción Soc	aire	e (DGA).			

Parámetro	Años de Registro	Mínimo	Máximo	Promedio	Desv. Est.	Coef. Asim.
Temperatura mínima absoluta	12	-2,3	2,3	-0,1	1,4	-0,11
Temperatura mínima promedio	12	1,5	5,3	3,6	1,1	-0,36
Temperatura máxima promedio	12	9,5	17,6	16,0	2,3	-2,29
Temperatura máxima absoluta	12	12,3	21,9	19,5	2,7	-2,06

Se elaboró un diagrama tipo Box-Whisker con los datos de temperatura de la estación Puntas Negras (PUC-DGA), los cuales son registrados cada 10 minutos. Este diagrama se presenta en
la Figura 6.44 para cada uno de los meses del año. Se observa que la diferencia entre el valor máximo y mínimo alcanza hasta 34°C en junio de 2008.

En la Figura 6.41 se presentan los valores mensuales de la temperatura media absoluta, mínima promedio, mínima absoluta, máxima promedio y máxima absoluta a nivel mensual para la estación Puntas Negras (PUC-DGA). La Figura 6.42 presenta la variación de la temperatura mínima absoluta, mínima promedio, máxima promedio y máxima absoluta para la estación Socaire (DGA). 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.



Figura 6.40: Cuartiles (Q₁, Q₂ y Q₃) de la temperatura registrada cada 10 minutos en las estación Puntas Negras (PUC-DGA).



Figura 6.41: Series mensuales de temperatura mínima absoluta y promedio, media absoluta, máxima promedio y absoluta en la estación Puntas Negras (PUC-DGA).



Figura 6.42: Series mensuales de temperatura mínima absoluta y promedio, máxima promedio y absoluta en las estación Socaire (DGA).

6.4.1.3 Variación Espacial de la Temperatura

La Figura 6.43 presenta la variación de la temperatura media absoluta con la latitud. Se observa que las estaciones ubicadas bajo los 2.000 msnm del mar 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 6.43: Variación de la temperatura media absoluta con la latitud en las estaciones seleccionadas.

La Figura 6.44 presenta el gradiente regional de la temperatura media con la altitud obtenido en el análisis regional, observándose una disminución de 0,56°C cada 100 m para altitudes entre los 1.500 y 4.500 msnm. Se presenta además los valores de la temperatura media absoluta en las estaciones PUC-DGA y DGA seleccionadas para el sistema piloto. Estos últimos valores fueron estimados calculando el promedio entre la temperatura mínima absoluta, mínima promedio, máxima promedio y máxima absoluta en la estación Socaire, y promediando los valores medios mensuales en la estación Puntas Negras. Para la estación Socaire se obtuvo una temperatura promedio de 9,8°C y para la estación Puntas Negras de 0,8°C. Al comparar estos valores con el gradiente regional se observa que la estación Socaire mantiene la tendencia regional. En cambio, la estación Puntas Negras no sigue esta tendencia, estando la temperatura ligeramente desplazada hacia abajo. Sin embargo, el valor registrado en esta última estación corresponde al registro de un año por lo que no es representativo de lo que ocurre en el largo plazo en la zona en estudio.

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 II Región se presentan en la Figura 6.45.



Figura 6.44: 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 II Región.



Figura 6.45: Mapa de isotermas en la zona del sistema piloto de la II Región.

6.4.2 Análisis de Evaporación

El en el sistema piloto de la II Región se dispone de 4 estaciones meteorológicas con registro de evaporación de tanque. La Tabla 6.10 presenta la ubicación de estas estaciones, altitud y vigencia, y en la Figura 6.46 se presenta su ubicación en forma gráfica.

Tabla 6.10: Estaciones meteorológicas con registros de evaporación seleccionadas para el sistema piloto de la II Región.

Nº	Fuente	Cód. BNA		Estación Meteorológica	UTM (PSA	UTM (PSAD 1956)		UTM (PSAD 1956)		Estado	Años de
					Este	Norte	[msnm]	**	Registro		
1	DGA	02500019-6		Socaire	613.485	7.391.129	3.251	S	25		
2	GeoAguas		*	El Laco (Superficie)	660.629	7.361.987	4.250	V	<1		
3	GeoAguas		*	Tuyajto (Superficie)	644.159	7.352.607	4.048	V	<1		
4	GeoAguas			Talar (Superficie)	630.017	7.343.738	3.943	V	<1		

* Estaciones ubicadas al interior del sistema piloto

** V: Vigente; S: Suspendida



Figura 6.46: Estaciones meteorológicas con registros de evaporación seleccionada para el sistema piloto de la II Región.

En la estación Socaire (DGA) se dispone de información a nivel mensual y anual de series de evaporación total y media. En cambio en las estaciones GeoAguas se dispone de registros solamente a nivel mensual. La disponibilidad de esta estadística para el año hidrológico (Octubre-Septiembre) se presenta en la Figura 6.47 y Figura 6.48 para la evaporación media y total, respectivamente. Se observa que los registros en la estación Socaire se inician a partir de la década de 1970, llegando el registro hasta el año hidrológico 1998-1999. En las estaciones GeoAguas se tienen registros incompletos en los años hidrológicos 2005-2006 y 2006-2007. Llama la atención que la mayor parte de los 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 del análisis se utilizó solamente la evaporación total de cada mes, multiplicando el registro de evaporación media mensual por el número de días del mes.

N°	CODIGO ESTACION		1971-1980	1981-1990	1991-2000	2001-2007				
1	02500019-6 Socaire									
		: Año con información completa								
			: Año con 10 u 11 meses de información							
			: Año con 7 a 9 meses de información							
			: Año con menos de 7 meses de información							

Figura 6.47: Disponibilidad de información histórica de evaporación media (Año hidrológico)

N°	CODIGO	ESTACION	1971-1980		1981-1990						1991-2000							2001-2007									
1	02500019-6	Socaire																									
2		El Laco (Superficie)																									
3		Tuyajto (Superficie)																									
4		Talar (Superficie)																									

: Año con información completa
: Año con 10 u 11 meses de información
: Año con 7 a 9 meses de información
: Año con menos de 7 meses de información

Figura 6.48: Disponibilidad de información histórica de evaporación total (Año hidrológico).

En la Tabla 6.11 se presentan los principales estadígrafos de la serie anual de evaporación en la estación Socaire para los años hidrológicos completos. Se observa que los valores varían entre 2.547 mm y 4.030 mm con una media de 3.127 mm. La Figura 6.49 presenta esta serie en forma gráfica.

Tabla 6.11: Propiedades estadísticas	de las	series de	evaporación	anual	(mm) e	n las	estaciones
seleccionadas.							



Figura 6.49. Serie de evaporación anual (mm) en la estación Socaire (II Región).





Figura 6.50: Evaporación media mensual en las estaciones seleccionadas del sistema piloto de la II Región.

La Figura 6.50 presenta la variación de la evaporación a lo largo de los meses del año, en las estaciones seleccionadas. Se observa que los meses con mayor evaporación son noviembre, diciembre y enero, alcanzando valores de hasta 350 mm mensuales en la estación Socaire. Por otra parte la menor evaporación ocurre en los meses de junio y julio con valores de alrededor de 170 mm en la estación Socaire. En las estaciones pertenecientes a GeoAguas se ordenó la serie de acuerdo al año hidrológico. Se observa un comportamiento similar en la variación mensual de la evaporación respecto a la estación Socaire. Sin embargo, la magnitud del agua evaporada es menor en las estaciones GeoAguas que en la estación Socaire, lo cual se debe a que esta última estación se encuentra localizada aproximadamente 1.000 msnm bajo las estaciones GeoAguas.

La Figura 6.51 presenta la variación de la evaporación anual con la latitud para el año hidrológico (Oct-Sep). Se observa que en las estaciones de la II 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 6.51: Variación de la 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 6.52. 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.



Figura 6.52: Gradiente de la evaporación media anual en las estaciones seleccionadas de la XV, I, II y III Región.

7 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA E ISOTÓPICA

El presente capítulo expone y analiza los datos hidroquímicos recopilados, correspondientes a las cuencas piloto del Altiplano de la II Región de Chile. Las cuencas piloto de esta Región son las que concentran la mayor cantidad de antecedentes hidrogeoquímicos, debido al interés del sector privado en realizar exploraciones de recursos hídricos. En este sentido interesa conocer el tipo de aguas y las interconexiones hidráulicas que existen entre las cuencas, tanto para evaluar de buena forma la disponibilidad, como para conocer la afección a sistemas ambientales dependientes de ciertas condiciones.

La base de datos hidrogeoquímicos recopilados se ha construido con datos generados en proyectos de entidades públicas, aquellos cedidos por parte de la empresa privada (GeoAguas Consultores) y finalmente complementados con nuevas muestras en el marco del presente estudio (DGA – PUC). Adicionalmente, se han incorporado antecedentes de las cuencas Laguna Lejía y Salar de Aguas Calientes 3, que limitan al oeste del Salar de Aguas Calientes 2 y de la Laguna Tuyajto, respectivamente.

El objetivo de esta parte del documento es caracterizar desde una perspectiva hidrogeoquímica las aguas tanto superficiales como subterráneas de la zona de estudio, a lo que se incorpora su caracterización isotópica basada en los datos de deuterio y oxígeno-18.

Para la caracterización hidrogeoquímica de cada cuenca, se representaron las concentraciones de los elementos mayoritarios de cada muestra mediante diagramas de Piper y diagramas de Stiff. Luego, se evaluaron las concentraciones de los elementos minoritarios que más abundan en el sector y finalmente se han comparado los valores isotópicos de deuterio y oxígeno-18 con la recta meteórica mundial preexistente.

Como resultado se ha definido un modelo conceptual hidrogeoquímico, que se complementa con la información topográfica, piezométrica y geológica, tanto superficial como de profundidad. Las composiciones químicas y evoluciones de las aguas estudiadas son muy similares, en general, cloruradas-sódicas. En ellas existen variaciones verticales de las concentraciones químicas, observándose una estratificación que muestra un aumento de la concentración con la profundidad. La alta salinidad de las aguas profundas sería producto de la mineralización de las aguas durante una circulación lenta por el acuífero, que ayudada por la anomalía termal de ciertas cuencas en particular, acelera la disolución de las especies minerales.

Como característica de los elementos mayoritarios, se plantea que éstos aumentan sus concentraciones en el agua en razón de la dirección del flujo. Dada la similitud entre las

distintas áreas, es probable que no existan sistemas de flujos complejos ya que los acuíferos son en general homogéneos y continuos. Sin embargo, es posible reconocer variaciones en la proporción de elementos mayores relacionadas a la existencia de zonas de recarga local.

Por otra parte, la mayoría de los datos isotópicos se alinean de manera más o menos paralela entre las líneas meteóricas con y sin exceso de deuterio, indicando que el agua de recarga fue afectada por la sublimación de la nieve antes de su derretimiento (Clark y Fritz, 1997), y/o la evaporación del agua en la zona no saturada o desde aguas subterráneas cercanas a la superficie (Aravena et al., 1999).

7.1 Datos Disponibles y Tratamiento de la Información

Los datos disponibles a partir de publicaciones científicas, aportes de privados e instituciones públicas se seleccionaron para la confección de una base de datos. Se contó con un total de 251 muestras, de las cuales 127 corresponden a fuentes superficiales (vertientes, afloramientos, escurrimientos, vegas, lagunas); 120 a fuentes subterráneas (diferentes niveles de pozos); 3 son muestras de nieve y 1 de lluvia (ANEXO VII). Con el objeto de uniformar la información recopilada, se les asignó un código a cada muestra, cuyas tres primeras letras responden a la cuenca en la que se ubica, una cuarta al tipo de agua y un número, que se refiere a cuántas veces se ha muestreado en ese lugar.

Para el trabajo con elementos mayoritarios y análisis de buena calidad, se seleccionaron aquellas muestras que presentaban datos para los siguientes de estos elementos a la vez: Cl⁻, SO_4^{-2} , HCO_3^{-} , NO_3^{-} , Na^{-} , K, Mg^{-2} , Ca^{-2} y NO_3^{-} . Aplicando este filtro, la base de datos se redujo a 155 muestras, de las cuales 56 corresponden a fuentes superficiales y 99 a fuentes subterráneas.

Luego, se realizó un balance iónico de los análisis, donde la suma de miliequivalentes de aniones debe ser igual a la suma de miliequivalentes de cationes de elementos mayoritarios (ver Parte IV del presente estudio). Se aceptó un error de 10% en valor absoluto, eliminando aquellos análisis que no cumplían con este criterio. Aplicando este filtro, la base de datos definitiva se redujo a 99 datos, de los cuales 46 corresponden a fuentes superficiales y 53 a fuentes subterráneas.

La cantidad de muestras utilizadas para cada cuenca se detalla en la Tabla 7.1. Se han filtrado de la misma manera las muestras correspondientes a las cuencas Laguna Lejía y Salar de Aguas Calientes 3, obteniéndose 24 muestras complementarias (18 superficiales y 6 subterráneas, Tabla 7.2).

Nombre Cuenca	Nº Muestras Superficiales	Nº Muestras Subterráneas	Total		
Salar de Aguas Calientes 2	17	4	21		
Puntas Negras	-	17	17		
Laguna Tuyajto	21	4	25		
Pampa Colorada	-	12	12		
Pampa Las Tecas	-	11	11		
Salar El Laco	8	5	13		

Tabla 7.1: Detalle de muestras que corresponden a la base de datos filtrada para las cuencas piloto de la II Región de Chile.

Tabla 7.2: Detalle de muestras que corresponden a la base de datos filtrada para las cuencas Laguna Lejía y Salar de Aguas Calientes 3.

Nombre Cuenca	Nº Muestras Superficiales	Nº Muestras Subterráneas	Total		
Laguna Lejía	4	-	4		
Salar de Aguas Calientes 3	14	6	20		

Aunque hay una distribución heterogénea de datos que califican para trabajar, la cuenca Laguna Tuyajto es la que concentra la mayor cantidad de información, mientras que la cuenca Salar El Laco la que tiene menos (Tabla 7.1). Las Figura 7.1 a Figura 7.4 indican los puntos de muestreo para las cuencas analizadas, tanto superficiales como subsuperficiales.

Para efectos del análisis de elementos minoritarios, no es necesario realizar un balance iónico de las muestras, por lo que se pueden utilizar todas aquellas en que se disponga de información. Del total de las 251 muestras que componen a la base de datos, 239 (95%) cuentan con al menos un dato de análisis químico de elemento minoritario (ANEXO VII)

Por su parte, la información isotópica recopilada corresponde al análisis de los isótopos estables deuterio y oxígeno-18, normalmente los más utilizados para estudios de hidrogeoquímica. En este caso, del total de 251 muestras, 110 contienen análisis de deuterio y oxígeno-18, cuya ubicación se muestra en la Figura 7.5.

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. Aunque usualmente vertiente y afloramiento se usan como sinónimos, aquí se ha hecho una distinción, considerando las muestras de tipo vertiente como aquellas que se han tomado desde

afloramientos puntuales, donde el agua aflora directamente desde la roca, y no ha sufrido mezcla con otras aguas ni exposición a condiciones ambientales superficiales. Las muestras de afloramiento corresponden a las que se han retirado desde afloramientos difusos, donde no es posible reconocer el punto inicial del afloramiento, y que posiblemente han sufrido mezcla y exposición por un tiempo no determinado a las condiciones ambientales locales. Las muestras tipo vega corresponden a muestras de agua que se han retirado a partir 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.

7.2 Química General de las Aguas

En este apartado se analizan e interpretan los parámetros físico-químicos, los elementos mayoritarios, y los elementos minoritarios que caracterizan a las aguas, tanto en las muestras superficiales como en las muestras subterráneas de cada cuenca.

El Salar de Aguas Calientes 2 presenta en superficie un conjunto de afloramientos y pequeñas lagunas, que varían su área de manera estacional. Dada la morfología del salar, éste se puede subdividir en tres sectores: sector norte, sector suroeste y sector sureste (recuadros en rojo en la Figura 7.6). Cada sector se caracteriza por presentar vertientes y afloramientos propios. Al sur del salar hay vegetación de tipo bofedal, en el contacto entre éste y la roca volcánica circundante. La información disponible de este sector corresponde al campo de pozos que se ubica hacia el suroeste de la cuenca (Pampa Loma Amarilla). La base de datos filtrada no cuenta con muestras que representen al sector sureste.

La cuenca Laguna Tuyajto se caracteriza por presentar un depósito evaporítico a partir del cual aflora un único cuerpo de agua superficial con forma de riñón. Hacia el este de la laguna, se reconocen abundantes depósitos evaporíticos más antiguos, y vegetación de tipo bofedal hacia el sureste del cuerpo de agua relacionada con las vertientes puntuales y afloramientos difusos que pueden identificarse allí. Hacia el norte de la cuenca se reconocen depósitos sedimentarios tipo conos aluviales, producto de los deshielos y vertientes del Volcán Tuyajto, que alimentan al salar desde ese extremo. Los pozos en esta cuenca son cuatro, y se ubican al este del salar (Figura 7.7).



Figura 7.1: Ubicación de muestras de agua de cuencas piloto Salar de Aguas Calientes 2 y Puntas Negras con registro de elementos mayoritarios completos y error de balance menor o igual a 10%.



Figura 7.2: Ubicación de muestras de agua de cuenca piloto Laguna Tuyajto con registro de elementos mayoritarios completo y error de balance menor o igual al 10%.



Figura 7.3: Ubicación de muestras de agua de cuencas piloto Pampa Colorada, Pampa Las Tecas y Salar El Laco con registro de elementos mayoritarios completo y error de balance menor o igual al 10%.



Figura 7.4: Muestras Laguna Lejía y Salar de Aguas Calientes 3 con elementos mayoritarios completos y error de balance menor o igual a 10%.



Figura 7.5: Muestras de cuencas piloto con datos isotópicos.

La cuenca Salar El Laco se caracteriza por su salar de forma ovalada. Aflora una gran laguna curva en su centro, y pequeños cuerpos de agua hacia sus límites norte y sur. El salar presenta escasa vegetación de tipo hidrófila, asociada a los afloramientos difusos que se reconocen únicamente hacia los costados norte, oeste y sur del depósito salino. No se reconocen vertientes puntuales. Existe un solo pozo perforado en esta cuenca (Figura 7.7).

Las cuencas Puntas Negras, Pampa Colorada y Pampa Las Tecas, son cuencas hidrográficas limitadas por altos topográficos que corresponden a depósitos efusivos del Neógeno y Cuaternario. Estas cuencas presentan depósitos sedimentarios de espesor considerable en sus depresiones a menor cota, que corresponden a la erosión de las mismas rocas que conforman las cuencas. Es aquí donde se han perforado estratégicamente los campos de pozos (Figura 7.7).



Figura 7.6: Imagen Landsat del sector norte del sistema de cuencas piloto. Se especifican (en círculos rosados) las zonas de afloramiento de agua y la ubicación de pozos en las cuencas Salar de Aguas Calientes 2 y Puntas Negras.



Figura 7.7: Imagen Landsat del sector sur del sistema de cuencas piloto. Se especifican (en rosado, círculos) las zonas de afloramiento de agua y la ubicación de pozos en las cuencas Laguna Tuyajto, Pampa Colorada, Pampa Las Tecas y Salar El Laco.

7.2.1 Parámetros Físico – Químicos

Los análisis hidroquímicos recolectados, presentan en general datos de pH y conductividad eléctrica medidos en laboratorio, aunque en algunos casos durante el muestreo en terreno, como fue para todas las mediciones de temperatura. Son estos tres parámetros los que se analizan a continuación, y que se grafican mediante diagramas de caja en la Figura 7.9.

a) pH

Salar de Aguas Calientes 2

Las muestras de agua superficial del Salar de Aguas Calientes 2 presentan un amplio rango de pH que varía entre los 5,0 y 9,7. Sin embargo, se observa que las muestras que se obtienen del sector norte son más ácidas y en general varían su pH entre 5,0 y 6,5, mientras que las muestras provenientes del sector suroeste son más básicas con rangos de pH que en general varían entre 7,0 y 9,0. Esto se debe a las diferencias en los afloramientos de roca que existen entre el norte y sur de la cuenca (Figura 5.2).

Puntas Negras

Las muestras de agua subterránea de la cuenca Puntas Negras son en general de características físico-químicas similares, debido principalmente a la poca distancia entre los pozos perforados en la cuenca, así como a la geología homogénea del sector. El rango de pH se mueve entre 6,1 – 9,4; aunque la mayoría de los valores oscila en torno a un valor neutro de 7,5.

Laguna Tuyajto

Las muestras de agua superficial que corresponden a la cuenca Laguna Tuyajto, cubren un amplio rango de pH que varía entre los valores 4,7 - 8,9; aunque la mayoría de los valores se mantiene entre los 7,0 - 8,0. No se identifica una sectorización geográfica asociada a los valores encontrados, ni una agrupación asociada al origen de las aguas. Por su parte, las muestras de agua subterránea que corresponden a los pozos de esta cuenca, presentan valores de pH muy constantes para la mayor parte del área, con un rango que varía entre los 7,6 - 7,7.

Pampa Colorada y Pampa Las Tecas

Las muestras de agua subterránea de la cuenca Pampa Colorada se mantienen en el rango de los 6,2 - 7,9; valores que representan a aguas neutras.

Las muestras de aguas subterráneas de la cuenca Pampa Las Tecas están en el rango de valores de 6,2 - 8,3; siendo semejantes a los de Pampa Colorada.

Salar El Laco

Tanto las muestras de agua superficial y subterránea de la cuenca Salar El Laco son de pH semejante, variando en un rango de 6,9 - 9,6; pero con la mayoría de los valores concentrados entre los 7,5 - 8,5.

b) Temperatura

Los valores de temperatura con que se trabajó, fueron colectados *in situ*. A pesar de que se trata de extraer valores representativos del lugar de muestreo, se debe considerar que puede haber factores que alteran su valor real. Estos factores pueden ser el tiempo de exposición a condiciones ambientales locales antes de realizar la medición, la mezcla de aguas más cálidas con aguas más frías por efecto del viento, y la profundidad de extracción de la muestra en el caso de aquellas colectadas en cursos superficiales y lagunas, entre otras. Para el caso de muestras de agua subterráneas (pozos, punteras), el tiempo que toma retirar la muestra, función de la herramienta con que se trabaja, permite un enfriamiento distinto de la muestra con el ascenso.

A continuación se describe los rangos observados para las cuencas piloto.

Salar de Aguas Calientes 2

Las muestras de agua superficial del Salar de Aguas Calientes 2 han mostrado temperaturas entre los -1,5 y 25,6 °C, aunque la mayor parte se mantiene entre los 10 y 25 °C. Se trata en general de aguas cálidas, aunque existe un par de excepciones de muestras de laguna, con temperaturas cercanas a los 0 °C. Estos valores se atribuyen al contacto del agua con la atmósfera fría.

El rango de temperaturas para las muestras de agua subterránea en esta cuenca ha variado entre 12,1 y 21,8 °C y se reconoce, en general, una relación directa entre el aumento de temperatura con el aumento en la profundidad de extracción de la muestra.

Puntas Negras

Las aguas subterráneas de la cuenca Puntas Negras tienen temperaturas que han variado entre 12,1 y 36,4 °C, lo que evidencia temperaturas altas. Los valores más altos de aquellos colectados no registraron la profundidad de extracción de la muestra. Los pozos PN-1A y PNPZ-2, que se encuentran aislados hacia el sector suroeste del campo de pozos, presentan las

más altas temperaturas de la cuenca, alrededor de los 30 °C. Estos altos valores de las aguas profundas se deben a la actividad hidrotermal asociada al volcanismo cuaternario, específicamente en el cordón Puntas Negras, que se emplaza hacia el suroeste de la hoya hidrográfica. En particular, el Volcán Puntas Negras hacia el sur del cordón, tiene alrededor del cráter abundantes depósitos de azufre, que evidencian una actividad reciente.

Laguna Tuyajto

Dado que varias de las vertientes y afloramientos de agua asociados a la Laguna Tuyajto son de carácter puntual, éstos pueden identificarse con facilidad y realizar mediciones representativas del agua recientemente aflorada a la superficie. Así, la mayoría de las muestras de este tipo (vertientes, afloramientos y vegas) tienen un rango de temperatura entre los 15 y 33,2 °C, mientras que las de escorrentía y lagunas varían su temperatura entre 1,0 y 17,5 °C. Las temperaturas más bajas corresponden a las muestras de la Laguna Tuyajto. En comparación con las dos cuencas del sector norte del sistema piloto (Salar de Aguas Calientes 2 y Puntas Negras), las vertientes que alimentan a la Laguna Tuyajto presentan temperaturas más altas.

Para las muestras de agua subterránea los valores de temperatura varían entre 15 y 32,3 °C, reconociéndose un aumento de la temperatura con la profundidad de extracción.

Pampa Colorada y Pampa Las Tecas

En la cuenca Pampa Colorada, se han extraído diversas muestras de agua subterránea que representan a las diferentes profundidades del acuífero. Coincide que aquellas muestras que reportan las más altas temperaturas no indican la profundidad a la cual fueron extraídas. Sin embargo, a partir de las muestras que sí reportan ambos valores, se reconoce una relación directa entre la profundidad y la temperatura. El rango de temperaturas varía entre los 20 y 38,7 °C.

Al igual que la cuenca Puntas Negras, las altas temperaturas de las aguas subterráneas de Pampa Colorada se deben a la actividad hidrotermal asociada al volcanismo cuaternario, específicamente en el cordón de Puntas Negras que se emplaza hacia el noroeste de la hoya hidrográfica.

En la cuenca Pampa Las Tecas, las temperaturas varían entre 12,3 y 22,2 °C, lo que evidencia temperaturas inferiores a las reportadas en las muestras subterráneas de la mayoría de las cuencas piloto, indicando una menor influencia geotermal. De todas formas, se reconoce un aumento de la temperatura del agua con la profundidad.

Salar El Laco

El rango de temperatura que caracteriza a las muestras de agua superficial de la cuenca Salar El Laco varía ampliamente entre -3,8 (LAC.F010) y 18,5 °C (LAC.F003). En este caso particular, los valores encontrados no tienen relación directa con el tipo de muestra de agua superficial. Existen dos muestras que presentan altas temperaturas (LAC.F001 con 12,0 °C y LAC.F002 con 16.5 °C), correspondientes a afloramiento y laguna, respectivamente, y que fueron extraídas del sector central del salar, donde se encuentra la laguna más grande.

Por otra parte, las aguas subterráneas de la cuenca Salar El Laco tienen temperaturas entre los 5,5 y 15,8 °C, donde se encuentra los valores más bajos reportados de todas las muestras subterráneas analizadas en las cuencas piloto.

c) Conductividad

La conductividad eléctrica de una muestra está relacionada de forma lineal con su valor de sólidos disueltos totales (SDT, Figura 7.8), es decir, cuando aumentan los elementos disueltos en una cantidad de agua hay más portadores de cargas, lo que implica una mejor conductividad eléctrica. Para el análisis de este parámetro, se han considerado las mediciones hechas en laboratorio. Se debe tener en cuenta el efecto del viento sobre los lugares de muestreo, que puede hacer invertir las direcciones de flujo de los canales y escorrentías de baja pendiente, que inicialmente fluyen en dirección al salar. Esto tiene como efecto la mezcla y consecuente salinización de las aguas cercanas a vertientes y afloramientos.



Figura 7.8: Relación entre el contenido total de sales disueltas y la conductividad eléctrica.

Salar de Aguas Calientes 2

La conductividad medida en las muestras de agua superficial de la cuenca Salar de Aguas Calientes 2 varía entre 3.000 y 25.600 μ S/cm, coincidiendo los valores más altos de con las muestras extraídas desde lagunas o afloramientos adyacentes al salar. La conductividad medida en las muestras de agua subterránea varía entre 3.300 y 50.200 μ S/cm, donde, de manera vaga, se observa que las muestras más profundas reportan mayor conductividad.

Puntas Negras

Excluyendo a las muestras que provienen del pozo PNAR-2 y PNAR-4, la conductividad medida en las muestras subterráneas de la cuenca Puntas Negras varían en el rango de $1.700 - 12.400 \ \mu$ S/cm. En general, las conductividades dependen más de la ubicación del pozo en la cuenca que de la profundidad. Los pozos PNAR-2 y PNAR-4, aislados en el noreste de la cuenca, reportan conductividades muy bajas, oscilando entre 100 y 600 μ S/cm, lo que indica que la recarga proviene principalmente desde este sector.

Pampa Colorada y Pampa Las Tecas

La conductividad medida en las muestras de agua subterránea de la cuenca Pampa Colorada varía entre 3.830 y 22.900 μ S/cm, notándose valores más bajos de conductividad para las muestras más superficiales.

La conductividad medida en las muestras de agua subterránea de la cuenca Pampa Las Tecas varía entre 400 y 11.500 μ S/cm. Los valores más bajos se detectaron para los pozos LTAR-2, PT-1 y PT-5 con valores de conductividad que aumentan con la profundidad, entre los 400 y 800 μ S/cm. Los bajos valores de conductividad para estos pozos ubicados en el centro de la cuenca indican que las aguas analizadas son dulces y que no recorren mayores distancias desde que se infiltran hasta que recargan al acuífero, ni sufren mezcla con aguas más salinas.

Laguna Tuyajto

La conductividad medida en las muestras de agua superficial de la cuenca Laguna Tuyajto varió entre 2.110 y 281.600 μ S/cm, coincidiendo los menores valores con las muestras de vertientes y vegas, que a la vez presentan los valores más altos de temperatura. El mayor valor de conductividad eléctrica corresponde a una muestra de agua de la Laguna Tuyajto, propiamente tal, destacando sobre las colectadas en el resto de las cuencas piloto, lo que se explica por la redisolución de depósitos evaporíticos más antiguos.

Para esta cuenca, la conductividad medida en las muestras de agua subterránea varía entre 7.410 y 15.000 μ S/cm, siendo las más profundas las que reportan valores más altos.



Figura 7.9: Diagramas de Caja de pH, Conductividad y Temperatura

Salar El Laco

La conductividad medida en las muestras de agua superficial de la cuenca Salar El Laco varía entre 962 y 98.700 μ S/cm, coincidiendo los mayores valores con las muestras extraídas al interior del salar. La muestra LAC.F009 presenta un valor extremo de conductividad (98.700 μ S/cm) y corresponde a un afloramiento ubicado en el extremo sur del salar.

Para el caso de muestras subterráneas, los valores de conductividad varían entre 460 y 183.200 μ S/cm. Los valores inferiores se reportaron en el pozo PCAR-2, mientras que los valores elevados corresponden a muestras de punteras, que representan a las napas someras, e indican algún grado de redisolución de sales.

7.2.2 Elementos Mayoritarios

a) 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 existentes en un área. Gráficamente, este tipo de diagramas permite la presentación de muchos parámetros en una combinación de dos diagramas triangulares (para aniones y cationes separados) y un diagrama en forma de rombo que muestra la relación entre los dos grupos de elementos anteriores. Cada muestra está proyectada con un punto en cada uno de los 3 diagramas.

Como se ha mencionado anteriormente, para el análisis de elementos mayoritarios de las muestras, se requiere que todos estos elementos presenten datos, excepto el nitrato (Cl⁻, SO₄⁻², HCO₃⁻, NO₃⁻, Na⁻, K⁻, Mg⁻², Ca⁻²). Para que el análisis e interpretación se haga usando datos confiables, se exige además que el error de balance sea menor o igual al 10 %.

Las muestras utilizadas para los diagramas de Piper son las que se especifican en el apartado anterior, que trata sobre los datos disponibles y tratamiento de la información, y se pueden observar en las Figura 7.1 a Figura 7.4. Los diagramas de Piper de la Figura 7.10 confirman la importancia de eliminar aquellas muestras con error de balance superior al 10 %, dado que estos datos escapan de la tendencia química de las aguas (Figura 7.10, izquierda).

En la Figura 7.11 se grafican las composiciones de todas las muestras colectadas. Las muestras superficiales son en general de composición clorurada-sódica, con proporciones variables de calcio y sulfato, donde las aguas de la cuenca Salar de Aguas Calientes 2 son las que contienen mayores proporciones de estos dos elementos.

Las muestras subterráneas son en general de composición clorurada-sódica. Las de la cuenca Salar de Aguas Calientes 2 tienen un mayor contenido cálcico, mientras que las de la cuenca Puntas Negras son las únicas con contenidos significativos de magnesio. Por su parte, las de la cuenca Pampa Las Tecas, contienen mayores proporciones de bicarbonatos.

b) Diagramas de Stiff

Además de indicar las composiciones de las aguas, los diagramas de Stiff consideran la concentración de las muestras de agua y son muy útiles para su representación espacial en un mapa, así como para entender las variaciones composicionales y de aumentos de concentración a lo largo de los sentidos de flujo o que atraviesan sistemas hídricos específicos (salares, campos geotermales, formaciones geológicas particulares, etc).

Estos diagramas son polígonos que sirven para identificar fácilmente a la familia de agua que se tiene en una determinada fuente. Estos polígonos se encuentran divididos por una línea vertical, quedando los aniones (iones con cargas negativas) del lado izquierdo y los cationes (iones positivos) del lado derecho. Todas las concentraciones de los iones se encuentran expresadas en miliequivalentes por litro (meq/L) y la escala gráfica corresponde al ancho de las líneas horizontales, es decir, cuanto más ancho es un diagrama, más mineralizada se encuentra el agua a la que representa.

Para facilitar y mejorar la representación gráfica de los diagramas de Stiff, se han escogido a las muestras más representativas de cada cuenca. Esto es, en el caso de que existan muestras de parecida composición, concentración y ubicación en la cuenca, se ha escogido a una sola de ellas para ser graficada.

La base de datos cuenta con suficientes datos químicos que corresponden a las cuencas Laguna Lejía y Salar de Aguas Calientes 3. Se ha decidido incorporar esta información al presente capítulo, dado que son cuencas que limitan al oeste de las cuencas Salar de Aguas Calientes 2 y Laguna Tuyajto, respectivamente.

Cada diagrama de Stiff se colorea según la composición química del agua que se está muestreando. Dado que las concentraciones de las muestras de agua varían considerablemente según el tipo de fuente o el lugar de la cuenca que se está analizando, se han utilizado diferentes escalas gráficas para dibujar estos diagramas, reduciendo o ampliando los valores de concentración de ciertas muestras para permitir una mejor representación gráfica en el mapa. La reducción (o amplificación) de las concentraciones de estas muestras se realiza de modo de no alterar la representación visual y mantener una consecuencia entre el tamaño de los diagramas y sus concentraciones. Además, la intensidad del color de cada muestra es proporcional a la concentración de cada muestra. De este modo, a mayor intensidad del color,











mayor es la concentración de la muestra, y viceversa. La simbología de cada figura indica de manera específica los coeficientes de reducción y amplificación, según sea el caso.

Las muestras que representan las composiciones de las aguas mediante diagramas de Stiff fueron sobrepuestas en mapas (Figura 7.12), con el fin de facilitar la interpretación de los datos. Los elementos mayoritarios en las aguas proceden principalmente de procesos de alteración de rocas y de redisolución de sales. Estos procesos, sumados a la evaporación, llevan a un enriquecimiento de los elementos en las aguas, de modo que el agua se satura de algunos de éstos favoreciendo la precipitación de minerales. La precipitación de una sal, bajo ciertas condiciones ambientales dadas, se produce cuando la concentración de las especies en solución es tal que el producto de solubilidad es igual o superior a la constante de equilibrio. Cuando ambas funciones son iguales, la condición es de equilibrio y la solución se denomina saturada, mientras que cuando el producto de solubilidad es mayor que la constante de equilibrio, la condición es de desequilibrio y la solución se denomina sobresaturada. Normalmente, lo que se observa es que las sales precipitan cuando la solución está sobresaturada.

c) Composición de las Aguas y su Distribución Espacial: Diagramas de Piper y Stiff

Los datos hidroquímicos de cada cuenca piloto se analizan a continuación por separado, presentando diagramas de Piper y de Stiff. Para el caso de las cuencas que presentan datos subterráneos y superficiales, se presentan además de los diagramas conjuntos de todos los datos, los diagramas de Piper para cada tipo de fuente.

Se presenta además una figura por cuenca, que grafica los diagramas de Stiff sobre un imagen de Modelo de Elevación Digital (DEM), que permite visualizar la composición, concentración y evolución de las aguas.

Salar de Aguas Calientes 2

Las aguas superficiales de la cuenca Salar de Aguas Calientes 2 son en su mayoría cloruradassódicas y algunas de ellas cloruradas-cálcicas. Su composición varía de medianamente sulfatadas a cloruradas, conteniendo proporciones cálcicas entre bajas e intermedias. Las muestras más cálcicas se detectan para las aguas superficiales que caracterizan al sector suroeste del salar, en Pampa Loma Amarilla. Se observa una relación entre el tipo de fuente y su composición química, siendo las muestras de lagunas las menos sulfatadas (Figura 7.13).


Figura 7.12 Muestras hidroquímicas que se han utilizado para el análisis químico de elementos mayoritarios mediante diagramas de Stiff.

La composición química de los elementos mayoritarios de las aguas subterráneas de esta cuenca es clorurada-cálcica. Estas aguas muestran una estratificación, dado que a mayor profundidad están altamente concentradas y enriquecidas en calcio. Un lente de agua subterránea salobre (<5.000 mg/L) fluye hacia el Salar de Aguas Calientes 2 sobre agua subterránea salina (hasta 60.000 mg/L, Figura 7.14).

La única muestra que tiene una composición química diferente es la AC2.F012, de composición bicarbonatada-sódica y que está ubicada en el sector occidental de la cuenca. Dicha muestra corresponde a una vertiente que aflora de rocas pertenecientes a la ignimbrita Cajón, en el sector del Cordón Alto Toro Blanco, y es una de las principales alimentadoras del salar en ese sector.

Puntas Negras

Las aguas subterráneas de la cuenca Puntas Negras clasifican todas como cloruradas-sódicas, pero con relativamente altas proporciones de calcio, y proporciones de magnesio variables entre bajas e intermedias (Figura 7.15).

No se puede realizar un análisis que incorpore la variable de profundidad de extracción de la muestra dado que la mayoría de las muestras analizadas no cuentan con este dato. En general puede afirmarse que las muestras son poco concentradas, independientemente de la profundidad de muestreo (Figura 7.16).

Laguna Tuyajto

La composición química de prácticamente todas las muestras de agua que pertenecen a la cuenca Laguna Tuyajto, es clorurada-sódica. La excepción es para la muestra TUY.F031, que corresponde a un afloramiento de agua en el sector este de la laguna, de composición cloruradacálcica (Figura 7.18).

Las aguas superficiales de la cuenca Laguna Tuyajto tienen una composición clorurada, con una componente catiónica que varía de cálcica a sódica, lo que depende del tipo de fuente que se analiza. Las vertientes y afloramientos son de composición más cálcica, mientras que las de escurrimientos superficiales y la laguna son de composición sódica. Las muestras superficiales al norte de la cuenca presentan concentraciones inferiores que las ubicadas en el sur, indicando que la dirección del flujo de recarga parte desde el cordón Chalviri en el norte, en dirección a la depresión. Las muestras de la Laguna Tuyajto son altamente concentradas, lo que se hace notar en el tamaño de los diagramas de Stiff que se muestran en el 20% de su tamaño real (Figura 7.17). Los escasos datos de muestras de agua subterránea indican que éstas son de composición clorurada-sódica. Se reconocen altas concentraciones para muestras subterráneas alejadas de la laguna, que representan al sector oriental de la cuenca (Figura 7.17). No se reconoce estratificación en la composición o en la concentración de las muestras subterráneas.







Figura 7.14: Diagramas de Stiff para la cuenca Salar de Aguas Calientes 2. Izquierda: ubicación. Derecha: tipo de muestras.







Figura 7.16: Diagramas de Stiff correspondientes a la cuenca Puntas Negras. Izquierda: ubicación. Derecha: tipo de fuente muestreada.





Pampa Colorada

La composición química de las aguas de la cuenca Pampa Colorada es clorurada-sódica. Se observa que todas las muestras son de composición muy similar, independiente de la ubicación geográfica del pozo o de la profundidad de extracción de la muestra (Figura 7.19).

Las aguas subterráneas por su parte, muestran una estratificación en la concentración química (Figura 7.21). Las muestras que representan profundidades superiores a los 150 m, tienen concentraciones mayores que las más superficiales. Cabe destacar que para iguales profundidades, las muestras que representan al sector este de la cuenca son más concentradas que las que representan al sector oeste.

Pampa Las Tecas

La composición química de las aguas subterráneas de la cuenca Pampa Las Tecas es en general clorurada-sódica, con proporciones variables de calcio y bicarbonato, entre bajas e intermedias (Figura 7.20). Existen dos excepciones: la muestra TEC.T012, de composición bicarbonatada-sódica, ubicada en el centro de la cuenca y con concentraciones muy bajas; y la muestra TEC.T009.1, de composición clorurada-magnésica, ubicada más al este de la cuenca y con concentraciones también muy bajas (Figura 7.20).

No se ha podido establecer una relación entre la composición y la ubicación del pozo ni una relación entre la evolución de las composiciones químicas y las direcciones de flujo asociadas a la piezometría. Tampoco se puede establecer una relación entre composición y profundidad dado que sólo un pozo presenta más de una muestra (TEC.T003.3/3.4) para distintas profundidades, indicando un aumento en la concentración con la profundidad. (Figura 7.22). Las muestras de agua que representan al sector norte, limitando con la cuenca Pampa Colorada, están más concentradas que las del resto de la hoya.

Salar El Laco

La composición química de las aguas de la cuenca Salar El Laco es clorurada-sódica (Figura 7.23). Las muestras superficiales alejadas del depósito evaporítico, son de menor concentración. Las muestras de afloramiento contienen mayores proporciones de calcio en comparación con las muestras de laguna (Figura 7.24).

Las aguas subterráneas extraídas a partir del pozo PCAR-2 son de baja concentración y mayor proporción de calcio, independiente de la profundidad de muestreo. Las muestras de laguna son altamente concentradas en el Salar El Laco. Se hace notar que el tamaño de los diagramas de Stiff que representan a estas muestras, se han disminuido al 20% de su valor real para la representación en la figura.





Figura 7.18: Diagramas de Stiff correspondientes a la cuenca Laguna Tuyajto. Izquierda: ubicación de las muestras. Derecha: tipo de fuente.



Figura 7.19: Diagrama de Piper para todas las muestras subterráneas de la cuenca Pampa Colorada manteniendo igual color y diferente distintivo para indicar las varias profundidades de un mismo pozo.

Se observa que las muestras del sector del Cerro Overo, al norte de la cuenca, tienen mayores contenidos en calcio, mientras que las del sector de la Loma Las Torres, al sur, son menos cloruradas y tienen proporciones mayores de sulfatos y bicarbonatos.

Laguna Lejía

Las tres muestras tomadas en la Laguna Lejía tienen un quimismo muy distinto al resto de las cuencas presentadas anteriormente. Las aguas de esta laguna son de composición sulfatadasódica, mientras que la única muestra de afloramiento, es de composición bicarbonatada-sódica (Figura 7.25). Esta última composición se correlaciona con una muestra tomada en el margen occidental de la cuenca Salar de Aguas Calientes 2.



Figura 7.20: Diagrama de Piper para el total de muestras subterráneas de la cuenca Pampa Las Tecas manteniendo igual color y diferente distintivo para indicar las diferentes profundidades de un mismo pozo.

Las muestras que fueron extraídas del costado oeste de la laguna son muy dulces, especialmente si se comparan con las muestras que se retiran del costado este de la laguna, que presentan concentraciones salinas altas. Esto indicaría la dirección de flujo, con recarga en el oeste de la laguna y flujos hacia el oriente (Figura 7.25).

En general, el aporte del sulfato proviene de la disolución de sales sulfatadas, principalmente yeso y anhidrita, o del lavado de terrenos formados en ambiente marino. Sin embargo, pareciera que, dado que la Laguna Lejía tiene un fuerte control estructural asociado a una falla de orientación NNE-SSW (que controla también a las lagunas Miscanti y Miñiques, más al sur), es probable que el origen sea la oxidación de sulfuros, que se encuentran ampliamente distribuidos en las rocas ígneas.

Cabe destacar que el color de las aguas de la laguna es pardo-amarillento y muy diferente al color de todas las otras lagunas de la Puna de Atacama. Las aguas tienen un característico e intenso olor a azufre.



Figura 7.21: Diagramas de Stiff correspondientes a la cuenca Pampa Colorada. Izquierda: ubicación de las muestras. Derecha: tipo de fuente.



Figura 7.22: Diagramas de Stiff correspondientes a la cuenca Pampa Las Tecas. Izquierda: ubicación. Derecha: tipo de fuente

Salar de Aguas Calientes 3

La composición química de las mayor parte de las aguas de la cuenca Salar de Aguas Calientes 3 es clorurada-sódica. La excepción es para dos muestras de afloramientos, en el costado este del Salar de Talar, que son de composición sulfatada-cálcica, y para una muestra de vertiente en el sector norte del Salar de Aguas Calientes 3, de composición clorurada-cálcica (Figura 7.26).

Las muestras de agua ubicadas hacia el este de la cuenca, son muy salinas. Se reconoce una estratificación de las aguas, dado que, a medida que aumenta la profundidad de extracción de la muestra, aumenta el grado de concentración (Figura 7.26).

d) Relación con la Geología

En términos generales, la geología superficial del sector donde se emplazan las cuencas piloto, es homogénea. La geología superficial del sector se resume como una secuencia de depósitos volcánicos y sedimentarios, de edad Neógeno–Cuaternario, que se ubican estratigráficamente sobre un basamento de rocas plegadas pre-miocenas, que sólo afloran en cerros isla ubicados preferentemente hacia el este del sector de la Puna. Las rocas volcánicas consisten en sendos depósitos ignimbríticos dispuestos formando extensas mesetas inclinadas preferentemente hacia el este. Estas rellenan depresiones morfoestructurales, y estratovolcanes de gran tamaño, compuestos por capas alternantes de lavas y piroclastos, con distintos grados de erosión (Figura 7.27).

Los altos topográficos, cadenas de volcanes o volcanes aislados que generan los depósitos efusivos, son los que dan lugar a la morfología particular de esta zona, que consiste en un conjunto de pequeñas cuencas hidrográficas semiaisladas. Los depósitos sedimentarios cuaternarios, son el producto de la erosión de las formaciones volcánicas, y se depositan preferentemente en los sectores topográficamente más bajos de las cuencas (Figura 4.4).

La geología de subsuperficie apunta a que el acuífero principal de la zona de estudio está constituido por ignimbrita fracturada, con intercalaciones de horizontes meteorizados y depósitos lávicos. Las interconexiones del flujo de aguas subterráneas estarían restringidas por zonas de baja permeabilidad, ubicadas en los márgenes de las cuencas.

Tanto los diagramas de Piper como de Stiff indican que las muestras de aguas tomadas en las cuencas piloto tienen composiciones químicas muy similares, siendo casi todas cloruradassódicas. Las aguas tienden a enriquecerse en sus concentraciones de elementos mayoritarios a medida que avanzan en su dirección de flujo natural.







Figura 7.24: Diagramas de Stiff correspondientes a la cuenca Salar El Laco. Izquierda: ubicación. Derecha: tipo de fuente.



Figura 7.25: Diagramas de Stiff correspondientes a la cuenca Laguna Lejía. Izquierda: ubicación. Derecha: tipo de fuente.



Figura 7.26: Diagramas de Stiff correspondientes a la cuenca Salar de Aguas Calientes 3. Izquierda: ubicación. Derecha: tipo de fuente.

Existen variaciones verticales en las concentraciones químicas de las aguas, donde se observa una estratificación de las mismas, que permite reconocer un aumento en la concentración en función a la profundidad. La alta salinidad de las aguas profundas podría ser producto de la mineralización de las aguas durante una circulación lenta por el acuífero, que ayudada por la anomalía termal de ciertas cuencas en particular, acelera la disolución de especies minerales.

La composición química clorurada-sódica es característica de sistemas hídricos cerrados, debido a que el cloro y el sodio son elementos que preferentemente permanecen en solución. El origen de estos elementos proviene de los silicatos presentes en las rocas volcánicas y, dado que presentan muy altas solubilidades aunque están poco concentrados en las rocas, pueden alcanzar grandes concentraciones en las aguas al contrario de otros elementos que anteriormente podrían encontrarse en estado de saturación. Ya en los salares, generalmente los últimos minerales en precipitar serán los que contienen cloro y sodio en su estructura química.

Como referencia general, se presenta en la Tabla 7.3 (ignimbritas) y Tabla 7.4 (lavas) análisis químicos de muestras de rocas volcánicas del sector de la Puna de Atacama, para conocer los elementos (normalmente mayoritarios) que podrán ser puestos en solución a partir de los distintos procesos químicos que pueden afectar a los minerales (rédox, ácido-base, precipitación-disolución, etc.). Estos elementos mayores (98-99% del total de la roca) se expresan como óxidos, y en porcentaje del peso del total de la muestra (%wt).

%wt	Msg.1	Msg.2	Msg.3	Pla.1	Pla.2	Pla.3	Pla.4	Pla.5	Plpc.1	Plpc.2	Plpc.3	Qt.1
SiO ₂	71,96	69,72	71,68	66,69	68,5	61,61	57,5	69,75	71,7	70,18	70,04	65,43
Al_2O_3	14,7	13,75	12,96	15,91	14,34	16,85	16,47	14,43	14,66	14,6	14,83	16,14
Fe ₂ O ₃	2,13	1,49	1,37	3,18	2,9	4,04	4,73	1,67	1,81	1,61	1,36	2,62
MgO	0,4	0,53	0,36	0,83	1,06	1,61	2,45	0,6	0,46	0,5	0,56	1,73
CaO	1,86	1,62	1,54	3,36	5,36	5,15	3,75	2,62	1,69	1,54	1,85	3,82
Na ₂ O	4,11	2,93	2,98	3,61	3,01	3,23	2,9	2,8	4,49	3,75	4,17	3,74
K_2O	3,96	4,24	4,17	3,52	1,18	3,03	2,45	3,92	3,7	3,59	3,31	3,11

Tabla 7.3: Análisis Químico de Ignimbritas en la Puna de Atacama, II Región.

Msg.: Ignimbrita Guaitiquina; Pla.: Ignimbrita Atana; Plpc.: Ignimbrita Pampa Chamaca; Qt.: Ignimbrita Tuyajto. **Fuente:** [Modificada de Tabla 3 de la Hoja Río Zapaleri, Gardeweg y Ramírez, 1985]

Así, la hidrogeoquímica de las aguas que se encuentran en cuencas evaporíticas, se caracterizan por un aumento paulatino en la concentración de sales disueltas, a medida que se desciende desde las zonas de recarga hasta el depocentro donde son evaporadas. En el área de trabajo, tres de las cuencas piloto presentan salares activos y, al ser endorreicas y estar sometidas a condiciones de aridez, los flujos de agua que ingresan a ellas interactúan con la

geoquímica de las rocas y depósitos. Posteriormente estas aguas son sometidas a un intenso proceso de evaporación.

%wt	Msv,1	Msv,2	Msv,3	Plv.1	Plv.2	Plv.3	Plv.4	Qv.1	Qv.2
SiO_2	53,45	60,17	61,6	69,89	58,07	57,88	63,31	51,89	66,27
Al_2O_3	14,19	16,64	16,64	15,02	18,61	16,4	16,16	16,13	14,81
Fe_2O_3	4,07	3,89	2,47	2,35	2,41	3,39	3,04	1,99	2,24
MgO	9,09	2,42	2,09	0,55	2,65	3,86	1,92	6,38	1,33
CaO	7,89	5,83	5,32	2,03	6,7	6,69	4,53	9,05	3,74
Na ₂ O	3,57	4,45	4,0	4,12	2,57	3,59	3,39	3,29	3,65
K_2O	1,4	2,14	2,51	3,76	2,48	1,75	2,91	1,49	3,22

Tabla 7.4: Análisis Químico de Lavas de los Conjuntos de Volcanes de la Puna de Atacama.

Msv.: Conjunto de Volcanes I; Plv.: Conjunto de Volcanes II; Qv.: Conjunto de Volcanes III.

Fuente: [Modificada de Tabla 4 de la Hoja Río Zapaleri, Gardeweg y Ramírez, 1985]

Los parámetros que miden la concentración de sales disueltas, son indicadores de si la muestra ha sido tomada cerca de la zona de recarga o si lleva un buen tramo recorrido. En general, los diagramas de Stiff permiten visualizar la dirección de flujo del agua, a medida que la proporción de los elementos aumenta o disminuye.

El análisis hidroquímico de las aguas subterráneas muestra una estratificación de las aguas que permite reconocer la presencia de dos tipos de flujos: uno más superficial con bajas concentraciones en elementos mayoritarios, y otro más profundo, con altas concentraciones de elementos mayoritarios. El estrato superior responde a flujos locales, de carácter superficial, e influenciados por las recargas estacionarias, puntuales y superficiales. El estrato inferior responde a flujos regionales, más profundos, e influenciados por mayores trayectos recorridos por el agua a través de rocas volcánicas y los acuíferos en general.

Los tipos de agua son generalmente uniformes en las diversas áreas, lo que sugiere que no existen sistemas de flujo complejos y que los acuíferos son en general homogéneos y continuos. Sin embargo, es posible reconocer variaciones en la proporción de elementos mayores relacionadas a la existencia de zonas de recarga local.

Las altas concentraciones salinas que se detectan para las muestras superficiales de la Laguna Tuyajto y las lagunas del Salar El Laco, en comparación a las del Salar Aguas Calientes 2 por ejemplo, son producto de la lixiviación de antiguas evaporitas que aumentan considerablemente la salinidad del agua. Hacia el costado este de la Laguna Tuyajto, se reconocen pequeñas terrazas que evidencian antiguos depósitos evaporíticos.





Figura 7.27: Geología superficial y diagramas de Stiff de las cuencas piloto de la II Región.



Figura 7.27: Geología superficial y diagramas de Stiff de las cuencas piloto de la II Región.

A continuación, se realiza un análisis para las particularidades químicas detectadas en las cuencas piloto. De manera complementaria, se analizan de manera general los datos químicos de las cuencas Laguna Lejía y Salar de Aguas Calientes 3.

Salar de Aguas Calientes 2

En general, las aguas de la cuenca Salar de Aguas Calientes 2 tienen proporciones levemente mayores de calcio y sulfato que aquellas de las otras cuencas estudiadas.

Coincide que las aguas subterráneas salinas de mayor profundidad, y las muestras que corresponden a vertientes y afloramientos, son de composición clorurada-cálcica, y presentan mayores proporciones de sulfato. Siguiendo la dirección de flujo de las aguas subterráneas, desde sur a norte, se refleja el aporte cálcico de las aguas de flujo regional en las muestras de la laguna que aflora en el extremo suroeste del salar. La columna estratigráfica generalizada para el sector, indica una correlación con rocas volcánicas pertenecientes a la ignimbritas Tuyajto, Cajón, Pampa Chamaca y Atana. Según los análisis geoquímicos realizados en la Carta Geológica de Chile (Hoja Río Zapaleri), la Ignimbrita Atana contiene altos porcentajes de calcio, al igual que las rocas pertenecientes a los Conjuntos de Volcanes II y III (Tabla 7.3 y Tabla 7.4). El sulfato tiene origen hidrotermal asociado a volcanismo reciente, hacia el suroeste de la cuenca, en el Cordón de Puntas Negras.

La vertiente que corresponde a la muestra AC2.F012, tiene composición bicarbonatada-sódica, y aflora sobre el Cordón Alto de Toro Blanco, en el límite de esta cuenca con la cuenca Laguna Lejía, y compuesta por un afloramiento de rocas débilmente soldadas de la Ignimbrita Cajón. La vertiente se encuentra alejada del salar por lo que no se ve influenciada por mezcla de aguas o redisolución, y su composición refleja el quimismo de las aguas de recarga local, todavía dulces y sin grandes concentraciones de elementos disueltos.

Puntas Negras

Las aguas subterráneas de la cuenca Puntas Negras son cloruradas-sódicas, pero se caracterizan por presentar proporciones mayores en magnesio y calcio hacia el norte. Esto se debe principalmente a que las muestras de este sector reflejan la recarga local que proviene desde los altos ignimbríticos (Alto de Caballo Muerto, Altos de Lari), y que contienen altos porcentajes de estos elementos.

Las muestras que representan al sector suroeste de la cuenca son cloruradas-sódicas, aunque más concentradas que las del norte, indicando un mayor aporte de elementos mayoritarios por parte de los depósitos volcánicos del Conjunto de Volcanes II, que afloran en este sector de la cuenca.

Laguna Tuyajto

Las aguas de esta cuenca son cloruradas-sódicas. El afloramiento que corresponde a la muestra TUY.F031 es de la misma composición, dado que está alejado de la laguna y no está contaminada con el efecto de la cuña salina.

La composición marcadamente clorurada-sódica y las altas concentraciones de las aguas subterráneas hacia el márgen de la cuenca, insinúan una conexión entre esta hoya y sus vecinas, Pampa Colorada y Pampa Las Tecas. Las muestras cercanas a la Laguna Tuyajto presentan altas salinidades producto de la migración salina desde la misma laguna. En este punto se presentan concentraciones muy altas, lo que indica una lixiviación de antiguas evaporitas que aumentan considerablemente la salinidad del agua. Las líneas de costa y depósitos lacustres que se identifican en el mapa geológico, hacia el este de la laguna, respaldan esta hipótesis.

Pampa Colorada

Las aguas subterráneas de la cuenca presentan altas concentraciones salinas, justificando la existencia de flujos regionales con aportes salinos subterráneos que provienen de la cuenca Salar El Laco.

Pampa Las Tecas

Las aguas subterráneas de la cuenca presentan muy bajas concentraciones salinas, que se relacionan con una recarga local, superficial y directa, reflejada en la composición bicarbonatada-sódica de las aguas. La muestra TEC.T009.1 es de composición clorurada-magnésica y obtiene su aporte magnésico de rocas volcánicas con altos contenidos en este elemento, pertenecientes al Conjunto de Volcanes I (Tabla 7.4).

Para iguales profundidades, las aguas que representan el norte de la cuenca son más concentradas que las del sur, lo que sugiere aportes salinos de un flujo regional subterráneo desde la cuenca Pampa Colorada.

Salar El Laco

Las muestras de agua subterránea y afloramientos de la cuenca Salar El Laco tienen concentraciones bajas. Si se comparan las concentraciones de los afloramientos de las diferentes cuencas evaporíticas, se observa que las de ésta son menores que las observadas en Salar de Aguas Calientes 2 y Laguna Tuyajto. En particular, las muestras de afloramientos al norte de la cuenca, se relacionan a trayectorias intermedias del flujo de las aguas de recarga,

con aporte cálcico que proviene de las rocas volcánicas pertenecientes a los Conjuntos de Volcanes II y III.

7.2.3 Elementos Minoritarios

Dado el carácter endorreico de las cuencas altiplánicas, es posible registrar concentraciones mayores de elementos minoritarios y traza a las habituales para otras cuencas. Esto se debe principalmente al incremento paulatino en la concentración de sólidos disueltos, por efecto de la evaporación y la no circulación de las aguas.

En la base de datos confeccionada se reconoce de manera reiterada la presencia anómala de valores altos de arsénico, litio y boro, relativo a las concentraciones que habitualmente se reconocen en la naturaleza. En este sentido y para un primer análisis, se filtró la información de manera de estudiar aquellos análisis con valores de conductividad, para normalizar las concentraciones de elementos minoritarios. La Figura 7.28, Figura 7.29 y Figura 7.30 muestran las concentraciones de estos elementos minoritarios con respecto a la conductividad medida en laboratorio. Los gráficos del arsénico, boro y litio indican una relación lineal entre el aumento de concentración y la conductividad, con ciertas diferencias que se detallan a continuación.

El arsénico arroja un comportamiento más disperso, donde el incremento de este elemento con la salinidad de las aguas no resulta claramente lineal. El aumento del litio en cambio, está muy relacionado con el aumento general del total de sólidos disueltos en el agua, a excepción de algunos puntos con concentraciones anómalas mayores de las esperadas (muestras subterráneas de la cuenca Puntas Negras). Las concentraciones de litio en Puntas Negras tienen un origen asociado a la disolución de rocas volcánicas ricas en este elemento, en el sector suroeste de la cuenca.

Respecto del boro, no se contó con información de este tipo en muestras subterráneas de las cuencas Salar de Aguas Calientes 2 y Puntas Negras. Para este elemento, existe también un incremento lineal de su concentración con la conductividad, pero pueden distinguirse vagamente dos grupos. Un grupo representa a las muestras menos concentradas y se les asocia una recta de mayor pendiente, mientras que el otro grupo representa a las más salinas, que disminuyen su proporción entre concentración de boro y conductividad.

Los mapas de puntos escalados (Figura 7.31 a Figura 7.33) permiten reconocer los sectores de las cuencas que presentan mayores concentraciones, de acuerdo al color y tamaño del símbolo mostrado, que son proporcionales a la concentración del elemento. A continuación se describe para los principales elementos minoritarios detectados.

<u>Arsénico</u>

Se detectan altas concentraciones de arsénico para aguas superficiales ubicadas al oeste del Salar de Aguas Calientes 2, hacia el oeste de la Laguna Tuyajto y al norte del Salar El Laco. Estas concentraciones se mantienen constantes e inferiores a 0,5 mg/L para las muestras de agua subterránea de las diferentes cuencas. La excepción de muestra subterránea que presenta una alta concentración corresponde a una muestra de puntera en la cuenca Salar El Laco (Figura 7.31).



Figura 7.28: Diagrama que muestra la tendencia del contenido de arsénico con la conductividad eléctrica del agua.

<u>Boro</u>

Las muestras sólo presentan concentraciones altas de boro para las aguas superficiales ubicadas al oeste del Salar de Aguas Calientes 2 y oeste del Salar El Laco. La base de datos no contiene datos subterráneos de boro para las cuencas piloto del norte, y sólo se observan valores anómalos en el Salar El Laco (punteras, Figura 7.32).

Existen diversos estudios que evidencian las altas concentraciones de boro que se reportan para las rocas ignimbríticas neógenas pleistocénicas y andesitas cenozoicas, que pertenecen a Los Andes Centrales y que se emplazan en la Puna (Kasemann et al., 2000; Schmitt et al., 2001). Los afloramientos ignimbríticos son mayores para las cuencas Salar de Aguas Calientes 2 y Salar El Laco, lo que explica las mayores concentraciones de boro para las muestras de salmuera en estas cuencas.



Figura 7.29: Diagrama que muestra la tendencia del contenido de boro con la conductividad eléctrica del agua.

<u>Litio</u>

A excepción de una muestra de laguna en el norte del Salar de Aguas Calientes 2, se observan altas concentraciones de litio únicamente para las aguas superficiales de la cuenca Laguna Tuyajto. Las muestras de vertientes y afloramientos puntuales se distinguen de aquellas de afloramientos difusos, escurrimientos y lagunas dado que los primeros presentan concentraciones más bajas de litio. La mayoría de las muestras de agua subterránea presentan concentraciones inferiores a 5 mg/L (Figura 7.33).

Se concluye que las muestras superficiales asociadas a los salares son las que presentan las mayores concentraciones de arsénico, boro y litio.

Las altas concentraciones de litio en la cuenca Laguna Tuyajto, en comparación a las otras cuencas evaporíticas, es otra evidencia para postular redisolución de antiguas evaporitas en la cuenca.



Figura 7.30: Diagrama que muestra la tendencia del contenido de litio con la conductividad eléctrica del agua.



















7.3 Datos Isotópicos y Relación con la Química

La utilidad de los isótopos ambientales en los estudios hidrogeológicos está asociada al fraccionamiento isotópico, una acción por la cual los distintos isótopos estables de un elemento se pueden separar unos de otros por una serie de procesos físico-químicos, térmicos o bio-geoquímicos. Cuando ellos reaccionan formando compuestos, las moléculas que resultan pueden ser distintas unas de otras debido a los isótopos particulares que ellas contienen.

Los contenidos de los isótopos estables pesados, como oxígeno-18 (¹⁸O) y deuterio (²H o D), son los más utilizados como trazadores del origen de las aguas subterráneas, dado que sus contenidos se consideran conservativos una vez que el agua ha entrado en el acuífero. Esto es, que sus contenidos no se ven afectados por las interacciones del agua con la matriz del acuífero. Las características conservadoras de los isótopos estables (¹⁸O y ²H o D) permiten deducir el origen del agua y, por consiguiente, la reconstrucción de su historia química.

La utilidad de los isótopos ambientales en los estudios hidrogeológicos está asociada al fraccionamiento isotópico, una acción por la cual los distintos isótopos estables de un elemento se pueden separar unos de otros por una serie de procesos físico-químicos, térmicos o bio-geoquímicos. Cuando ellos reaccionan formando compuestos, las moléculas que resultan pueden ser distintas unas de otras debido a los isótopos particulares que ellas contienen.

Los contenidos de los isótopos estables pesados, como oxígeno-18 (¹⁸O) y deuterio (²H o D), son los más utilizados como trazadores del origen de las aguas subterráneas, dado que sus contenidos se consideran conservativos una vez que el agua ha entrado en el acuífero. Esto es, que sus contenidos no se ven afectados por las interacciones del agua con la matriz del acuífero. Las características conservadoras de los isótopos estables (¹⁸O y ²H o D) permiten deducir el origen del agua y, por consiguiente, la reconstrucción de su historia química.

La relación entre las concentraciones de los isótopos se expresa en por mil o desviación en por mil (‰) respecto a un patrón. El patrón de referencia usado es el V-SMOW (Vienna-Standard Mean Ocean Water) que representa el valor medio de dicha relación en el agua de mar.

Como los cambios debido al fraccionamiento son muy pequeños, la abundancia de isótopos puede ser evaluada como una desviación positiva o negativa de acuerdo a la ecuación:

 $\delta = \frac{R_{(MUESTRA)} - R_{(V-SMOW)}}{R_{(V-SMOW)}}$

Aquí, δ se expresa en por miles (‰) y R es la proporción isotópica particular (p. ej.: ¹⁸O/¹⁶O) para la muestra y el estándar. Un valor de $\delta^{18}O = -20$, por ejemplo, significa que la muestra se ha empobrecido un 20‰ de ¹⁸O con respecto al estándar.

Relación δD – δ18O y Recta Meteórica Local

Las cantidades de δ^{18} O y δ D de cualquier muestra de agua de lluvia se relacionan por una recta llamada Línea Mundial de las Aguas Meteóricas (LMAM o MWL, en inglés), definida por Craig (1961), cuya ecuación es:

$\delta D = 8 \times \delta^{18} O + 10\%$

El término 10‰ se denomina exceso de deuterio, y se usa frecuentemente como índice de evaporación del agua. Las precipitaciones generadas a partir de una nube formada por la evaporación del agua del mar se sitúan a lo largo de la LMAM. Hay procesos que modifican los puntos de la línea, sobre todo la evaporación y la influencia geotermal, que modifican el contenido isotópico del agua, lo que da lugar a una nueva recta de distinta pendiente.

Análisis Isotópico

La base de datos con que se ha trabajado contiene 110 muestras con análisis de deuterio (²H) y oxígeno-18 (¹⁸O), que representan tanto a las aguas superficiales como las subterráneas. La ubicación geográfica de los puntos de muestreo se observa en la Figura 7.5.

Para el análisis de los datos se trabajó con la relación $\delta^2 H/\delta^{18}O$, utilizando como referencia la recta meteórica mundial (MWL) de Craig (1961) y la recta meteórica sin exceso de deuterio. Los resultados se grafican en la Figura 7.34, donde se observa que la mayoría de los datos se alinean entre estas dos rectas. Los rangos que controlan los valores de $\delta^2 H$ y $\delta^{18}O$ son acotados, por lo que los puntos que se representan en una nube no permiten aproximar una tendencia para cada cuenca.

La mayoría de los valores de δ^{18} O oscilan entre -9,5 y -11,2‰, y los de δ^{2} H se mantienen entre los -78 y -84‰. Una figura adicional (Figura 7.35) permite una mejor visualización de los datos, mostrando mayor detalle de la zona que concentra las muestras. Las excepciones de muestras que no se ubican entre las rectas MWL y MWL sin deuterio, es para la mayoría de las muestras subterráneas que corresponden a la cuenca Pampa Las Tecas.

En las muestras superficiales que corresponden a ríos, esteros y lagunas, se observa un cambio en la pendiente de la recta, debido a una disminución de la relación $\delta^2 H / \delta^{18} O$ producto de la evaporación (Figura 7.35).



Figura 7.34: Relación $\delta 2H/\delta 180$ en muestras superficiales y subterráneas de las cuencas piloto de la II Región de Chile.



Figura 7.35: Relación para un rango acotado de $\delta^2 H/\delta^{18}O$ en muestras superficiales y subterráneas de las cuencas piloto de la II Región de Chile.

Los datos analizados de pozos y manantiales normalmente se alinean paralelos a estas rectas, pues su recarga proviene de las precipitaciones que se han infiltrado. Sin embargo, esto no

ocurre dado que se produce evaporación en la zona no saturada de los sectores de recarga, mostrando un desplazamiento. Aravena et al. (1999) y Clark y Fritz (1997) señalan que la sublimación de la nieve en zonas áridas genera un cambio isotópico de este tipo.

En la Figura 7.34 los datos indican la presencia de dos grupos de aguas: un primer grupo que exhibe un desplazamiento reducido respecto de la MWL, con empobrecimientos isotópico de $\delta^{18}O < -8$ y otro grupo que exhibe un empobrecimiento de $\delta^{18}O > -7$. El primer grupo se interpreta como aguas con una significativa recarga local y un reducido fraccionamiento debido a la evaporación. En contraste, el segundo grupo se alinea a lo largo de una recta que intercepta la MWL en un punto más empobrecido desde el punto de vista isotópico. Las aguas de este grupo se pueden interpretar como recargadas a mayor altura que las del primero (sublimación y o infiltración lenta al acuífero con evaporación desde la zona vadosa).

La recarga local, representada por las muestras del primer grupo, se produce principalmente en los sectores centrales y de menor altura de las cuencas. Estas muestras constituyen la mayor parte de los datos disponibles en todas las cuencas y, de manera general, en los pozos.

Dados que los rangos identificados se encuentran acotados, se interpreta que se está representando a un mismo acuífero de carácter regional, y que atraviesa todo el sistema piloto. Este acuífero de grandes dimensiones se alimenta de una recarga asociada principalmente al cordón volcánico de Puntas Negras, con una alta componente de sublimación. Los flujos, tanto en dirección al norte como al sur, se originarían en esta área de gran altura.

Las muestras subterráneas que corresponden a las cuencas Laguna Tuyajto, Salar El Laco y en menor grado Salar de Aguas Calientes 2, se alinean sub-paralelas a las rectas, siguiendo un comportamiento esperado. En general se encuentran desplazados de la línea de agua meteórica en la dirección de un enriquecimiento en ¹⁸O.

A valores de deuterio entre -85 y -82‰, las muestras subterráneas se enriquecen progresivamente en isótopos pesados de ¹⁸O, partiendo con Puntas Negras y continuando con Pampa Colorada, Salar de Aguas Calientes 2, Laguna Tuyajto y finalmente Las Tecas. Las muestras con composiciones todavía más pesadas que se alejan de la composición de la recarga, enriqueciéndose en isótopos pesados de ²H y ¹⁸O, corresponden a aguas de lagunas y vertientes que drenan aguas cuya circulación está más expuesta al fenómeno de la evaporación.
8 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

El objetivo de este capítulo es caracterizar los acuíferos de las cuencas del sector Pampa Colorada, que corresponde al sistema piloto de la II Región de Antofagasta. 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 el sector Pampa Colorada no ha sido explotado, por lo que se considera que corresponde a un sistema en condiciones naturales 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 zona de estudio se caracteriza por cuencas endorreicas, formada en un ambiente volcánico moderno y un clima de extrema aridez, con desarrollo de pampas que se encuentran a cotas mínimas cercanas a los 4.000 msnm. En varias de estas pampas se desarrollan salares y lagunas, donde no se observan afluentes superficiales, salvo en sus bordes debido a afloramientos de agua subterránea, que alimentan vegas y bofedales.

Los acuíferos se alojan mayoritariamente en rocas volcánicas y volcanoclásticas fracturadas, compuestas por flujos de lava e ignimbritas de composición andesítica a riodacítica, con intercalaciones menores de relleno sedimentario, originadas durante periodos de poca o nula actividad del volcanismo. Esto ha condicionado los límites de las cuencas hidrogeológicas, las que presentan un desarrollo más amplio que el de las cuencas hidrográficas estudiadas, con flujos profundos de carácter regional que se extienden fuera de sus límites.

Los sectores mayormente explorados corresponden a las depresiones o zonas bajas de las cuencas, donde se encuentra el mayor potencial hidrogeológico. Esto, sumado a razones de tipo logístico y técnico como el acceso, profundidad de las aguas y operatividad de los métodos de trabajo, ha impedido el mejor reconocimiento subsuperficial en lo límites entre cuencas superficiales, para cuantificar de manera precisa los flujos entre ellas.

La zona también está condicionada por la presencia de la caldera La Pacana, cuyo límite sur alcanza parte de la cuenca Salar de Aguas Calientes 2. Su presencia se manifiesta en las Formaciones principalmente ignimbríticas y otras coladas de lava, además de la afección de las rocas producto del hidrotermalismo.

Se han identificado 6 unidades hidrogeológicas principales en la zona de estudio, en base a una clasificación geológica de las rocas y rellenos que conforman los perfiles estratigráficos. Los acuíferos están condicionados por la permeabilidad primaria de las rocas y capas de poco espesor de sedimentos, sin embargo, es preponderante la permeabilidad secundaria del sistema, debida al fracturamiento. El basamento no fue detectado con los pozos que se han perforado, así como tampoco con los sondeos geofísicos. Su profundidad se ha considerado en los estudios de referencia como superior a los 400 m desde la superficie del terreno.

Las recargas y descargas del sistema piloto se identifican como las entradas y salidas para efectuar los balances hídricos de largo plazo. La recarga se produce por la infiltración de las precipitaciones, en mayor medida líquidas, que caen en la cuenca, particularmente con una rápida infiltración en los depósitos sedimentarios. Respecto de las descargas, existen numerosas de las cuencas altiplánicas del norte de Chile que no tienen explotación en el presente, siendo el caso de las cuencas piloto de esta Región. Las descargas de estas cuencas cerradas se producen en mayor proporción a través de la evaporación desde lagunas, salares y zonas aledañas con napas someras. También existen descargas a través de vertientes y flujos subterráneos hacia cuencas vecinas, desde las que también pueden recibir recarga.

La recarga de las cuencas se ha abordado considerando que los recursos disponibles en ellas provienen de las precipitaciones como primera fuente, y que éstas se infiltran o escurren dependiendo principalmente de las características geológicas y geomorfológicas del terreno. Los resultados del esquema tratado se comparan con aquellos que se abordan en los antecedentes que se revisaron, donde se reconoce la presencia de flujos subterráneos regionales, ausencia de salidas superficiales y un sistema en el que resulta más práctico y preciso cuantificar las salidas para estimar las entradas del sistema en el largo plazo.

Considerando la información piezométrica e hidroquímica se han establecido dos sistemas de flujo subterráneo. El primero llamado grupo norte, que está conformado por las cuencas Salar de Aguas Calientes 2, Laguna Lejía, Pampa Puntas Negras y otras menos exploradas al este y oeste de éstas. El segundo grupo llamado sur, que comprende a las cuencas Laguna Tuyajto, Pampas Colorada y Las Tecas, y Salares El Laco y Aguas Calientes 3 o Talar.

8.1 Geometría Acuífera y Unidades Hidrogeológicas

En este apartado se trata sobre las unidades hidrogeológicas y la geometría acuífera de las cuencas piloto de la Región de Antofagasta. Esta descripción se ha realizado usando los antecedentes disponibles, que han sido revisados y sintetizados exponiendo los resultados más relevantes en relación a los reservorios de agua subterránea.

El subcapítulo se estructura con una descripción de la información utilizada, las limitaciones para la caracterización de subsuperficie y luego una descripción de la litoestratigrafía de las cuencas en estudio. En otra parte se presentan los datos geofísicos disponibles, una caracterización de la geometría de las unidades subsuperficie y, finalmente, una correlación entre estas unidades y su permeabilidad relativa dentro del sistema.

8.1.1 Información a partir de Pozos Profundos

Del catastro de obras de captación citado en la Ref. 18 (ver ANEXO VII), se recopiló información de 66 pozos cuyas descripciones litoestratigráficas se encuentran en el EIA Pampa Colorada (Water Management Consultants, 2006), y en el informe del Proyecto Mundo (GeoAguas Consultores, 2007). Estos corresponden a las Ref. 14 y Ref. 13, respectivamente, puestas en el capítulo de revisión de antecedentes.

Los pozos identificados en las cuencas piloto se ubican generalmente en las llanuras aluviales, donde se reconocen depósitos sedimentarios que rellenan las partes topográficamente más bajas de las hoyas hidrográficas. La profundidad total de los sondajes suma 11.127 metros.

La descripción litoestratigráfica recopilada durante la perforación de cada pozo permite reconocer las unidades de rocas y sedimentos que existen bajo el nivel de terreno. A partir de esta información para cada perforación, se puede interpretar la geología de subsuperficie, que permite conocer la disposición y distribución de las unidades geológicas y reconocer su geometría. A pesar de los numerosos sondajes construidos con fines exploratorios y de explotación, ninguno de ellos reconoce un basamento impermeable, a pesar de alcanzar profundidades superiores a los 200 m en varios casos.

Para la reconstrucción geológica de subsuperficie se han considerando los pozos ubicados en las cuencas piloto que cuentan con un registro litoestratigráfico completo. De esta forma, se han excluido del análisis los piezómetros multinivel, identificados con los prefijos ACN y LTJ, así como los pozos de observación PC-1 y PC-2, debido a que no aportan información estratigráfica. Así, se consideraron 47 pozos, que suman un total de 10.322 metros perforados.

La mayor parte de los pozos se construyeron usando la técnica de perforación mediante circulación de aire reverso y doble tubo (DTRC), que permiten rescatar una muestra que conserva de manera parcial las características originales de la unidad de roca. Los pozos cuyo nombre culmina en DC, por ejemplo PNDC-1 (ANEXO VII), corresponden a perforaciones de tipo diamantina para investigación, que permiten obtener información litológica precisa que complementa a aquella recolectada mediante otros métodos.

8.1.2 Limitaciones para la Caracterización de Subsuperficie

En general, se espera que el modelo geológico de subsuperficie esté compuesto por las mismas unidades geológicas principales que afloran en superficie, y que se han descrito en el capítulo 1. En este marco, identificar y separar las unidades geológicas de subsuperficie puede resultar una tarea compleja, debido a dos motivos principales. En primer lugar, la similitud del material extraído dificulta la correlación con las diferentes unidades geológicas. En la prospección se espera recuperar principalmente fragmentos de roca volcánica que daten desde el Mioceno, y que correspondan a diferentes tobas que representan flujos ignimbríticos que se diferencian principalmente según el grado de consolidación, mineralogía, tipo de matriz, contenido en líticos, *fiammes*, y edad; y a lavas de distinta edad y composición similar. En segundo lugar, el método de perforación de la mayoría de los pozos (DTRC) no permite el rescate de testigo, por lo que se pierden características importantes en las descripciones litológicas. Se suma el hecho de que las perforaciones han sido realizadas por diferentes empresas contratistas, lo que tiene como consecuencia descripciones distintas. En muchos casos, las descripciones litológicas carecen de información para los minerales formadores de roca, color de la roca, caracterización de cristales, caracterización de matriz, alteración de minerales, entre otras características relevantes para poder agrupar a las tobas en unidades geológicas que se puedan correlacionar con las diferentes unidades ignimbríticas que afloran en la superficie de la Puna de Atacama.

8.1.3 Caracterización Litoestratigráfica de Cuencas Piloto

En este apartado se describen de manera general las diferentes unidades litoestratigráficas que se reconocen bajo la superficie de cada cuenca piloto, unificando los datos colectados en los pozos. Estas descripciones analizadas de manera conjunta permiten entender la geología de subsuperficie de la zona de estudio, lo que para una etapa posterior contribuye a diferenciar y describir las unidades hidrogeológicas.

Todas las perforaciones indican la presencia de una unidad superior de carácter sedimentario, seguida de diversos estratos de tobas, que en algunas ocasiones presentan intercalaciones

sedimentarias de horizontes erosionados/meteorizados de arenas y/o gravilla, e intercalaciones volcánicas de lavas y/o brechas.

Es importante resaltar que en ninguna de las descripciones litológicas de las perforaciones realizadas en la zona de estudio se reconoce la presencia de alguna unidad de roca que pudiera corresponder al basamento impermeable propiamente tal. Tampoco se identificaron en profundidad niveles salinos que pudieran corresponder a depósitos evaporíticos más antiguos. Por otra parte, se debe mencionar que el nivel arcilloso que presenta el pozo PNAR-3 es de carácter local, ya que no hay presencia de este tipo de depósito sedimentario en ningún otro pozo.

Salar de Aguas Calientes 2

Los pozos en la cuenca del Salar de Aguas Calientes 2, están alineados en dirección NNW-SSE, sobre las pampas Amarilla y Loma Amarilla norte, hacia el sector suroeste de la cuenca, y hacia el sur del salar (Figura 8.1).

Dependiendo de la ubicación de los pozos, éstos perforan a un nivel poco potente de relleno aluvial, compuesto por gravas volcánicas insertas en una matriz arenosa y limosa, provenientes de la erosión de los depósitos volcánicos del cordón de Puntas Negras. Bajo este nivel sedimentario, se reconocen diversos tipos de tobas de composición química variable, proporciones diferentes de contenido en plagioclasa, anfíbol, ojos de cuarzo, biotitas oxidadas, feldespato potásico y líticos andesíticos, y porcentajes variables de matriz cinerítica o cristalina. Se reconocen en algunos pozos, intercalaciones de horizontes de arenas (LAAR-1, LAAR-2) con evidencias de óxidos de hierro.

Dada la geología superficial de la cuenca y la ubicación de los pozos, se espera que las tobas perforadas se puedan correlacionar con las ignimbritas Tuyajto, Cajón, Toconao y/o Atana.

La Ignimbrita Toconao no aflora en la superficie delimitada por las cuencas piloto, pero se describe como la que subyace y proviene de la misma fuente magmática que la Ignimbrita Atana. Ésta podría encontrarse bajo la superficie de la cuenca Salar de Aguas Calientes 2, donde se reconoce la caldera La Pacana, a la cual se asocian estos dos flujos ignimbríticos (de Silva et al., 1988; Lindsay, 1999, Lindsay et al., 2001a).

La Ignimbrita Toconao es una toba riolítica, con notables variaciones verticales en su grado de soldamiento. Corresponde a una toba blanco-grisácea o parda clara, débilmente soldada, con fragmentos abundantes de pómez (25%) capilares, de color pardo claro, de hasta 4 cm de longitud, y pequeños clastos líticos, grises, y de tobas gris-rosadas oscuras. Los mega-fenocristales son escasos y corresponden a plagioclasa y biotita cobriza orientada.

COPIA 645000 660000 675000 Simbología Pozos con estratigrafía Cuencas Puna de Atcama Cuencas Piloto Límite Chile/Argentina A-0 7395000 7395000 LA-1 LAAR-2 LA-2 LADC-2 LA-3 LAAR-PNAR-4 PNAR-3 PNPZ-1 PNAR-2 PN-9 PN-8 7380000 7380000 PNDC-1 PN-2 Es. PN-1A PN-6 NPZ-2 PN-5 PNAR PC-3 PZN-4 7365000 7365000 PCDC-3 PC-2 PA-2 7-3 PA-4 PC-4 DC-5 PCAR-2 LTPZ-5A PAAR-3 PT-6 -LTDC-4 --LTPZ-6A LTPZ-5B PAAR-1 7350000 7350000 LTPZ-6B PT-4 LTAR-2 PT-3 LTAR-1 PT-5 675000 645000 660000

Figura 8.1: Ubicación de pozos con litoestratigrafía y mapa geológico de superficie de la Puna de Atacama, modificado de las Hojas Toconao (Ramírez y Gardeweg, 1982) y Río Zapaleri (Gardeweg y Ramírez, 1985), escala 1:250.000.

460625

Puntas Negras

La mayor parte de los pozos en esta cuenca se ubican sobre la Pampa Puntas Negras, hacia el centro de la superficie de la hoya hidrográfica. Los pozos denominados con el prefijo PNAR, son de mayor profundidad y se distribuyen sobre sectores topográficamente más altos, tanto en el norte (PNAR-2/3/4) como en el sureste de la cuenca (PNAR-1) (ANEXO VII).

En general, los pozos que se ubican en el sector bajo de la cuenca tienen hacia el techo un relleno aluvial que corresponde a los depósitos sedimentarios de la cuenca, y que se compone de arenas y gravas de origen volcánico y de forma angular, insertas en una matriz arenosalimosa. Bajo la cobertura aluvial, se identifican diversas tobas de composición química variable, proporciones diferentes de contenido en cristales de cuarzo, biotita, plagioclasa, anfíbol, hematita, feldespato potásico, epidota y líticos, y porcentajes variables de matriz cinerítica o cristalina. Se detectan escasas intercalaciones locales de lavas (PNPZ-2, PNAR-1), horizontes intensamente alterados donde predominan los óxidos de Fe (PNPZ-1), y horizontes sedimentarios (PNDC-1, PNAR-3). Se reconocen brechas de origen volcánico en el pozo profundo PNDC-1.

Se espera que las tobas correspondan a las ignimbritas Tuyajto y Pampa Chamaca, y que las intercalaciones de lava se correlacionen con el conjunto de volcanes del Plioceno y Mioceno.

Laguna Tuyajto

En la cuenca Laguna Tuyajto se cuenta con algunos pozos profundos que se ubican de manera general alineados diagonalmente al oriente de la laguna, en dirección NNE-SSW. Estas obras de captación cubren el sector central y sur de la hoya hidrográfica. Para el tratamiento de la información litoestratigráfica se ha incorporado del pozo PAAR-2, ubicado en la cuenca Salar de Aguas Calientes 3.

Los pozos se caracterizan por presentar una cobertura aluvial compuesto por gravas y arenas oligomícticas de fragmentos de tobas y lavas, e insertos en una matriz de arena y poco limo. Bajo este nivel sedimentario, se reconocen a diversos tipos de tobas, de composición química variable, proporciones diferentes de contenido en cristales de cuarzo, plagioclasa, biotita y líticos, y porcentajes variables de matriz cinerítica o micro-cristalina. Hacia el sector suroeste de la cuenca, donde están los pozos PAAR-1 y PAAR-2, las tobas están silicificadas, en algunos casos presentan fenocristales de anfíbol, y se caracterizan por las reiteradas intercalaciones con potentes estratos de lavas y brechas andesíticas. El pozo PADC-5 presenta un potente nivel andesítico intermedio.

Además de los abundantes afloramientos volcánicos asociados a los Conjuntos de Volcanes I, II y III, es importante notar la presencia de afloramientos de rocas que pertenecen a las ignimbritas Tuyajto y Patao.

Pampa Colorada

Los pozos en la cuenca Pampa Colorada están alineados en dirección NW-SE, sobre la Pampa Amarilla sur. Este sector corresponde a la llanura aluvial de la cuenca, donde se depositan los sedimentos que descienden desde el cordón Puntas Negras. La hoya se caracteriza por un gran cono aluvial ubicado al norte, y que transporta sedimentos desde el cordón Puntas Negras hacia las partes topográficamente más bajas.

Básicamente, la geología de subsuperficie se compone por una cubierta sedimentaria aluvial, que puede alcanzar importantes espesores para los pozos que se ubican sobre la incisión del cono aluvial ubicado al norte de la cuenca (PC-5 y PCAR-1). Esta cubierta sedimentaria se compone de gravas y arenas polimícticas subredondeadas, y clastos tobáceos y lávicos. Subyace a esta capa otra distinta, formada de diferentes tobas de ceniza de composición química variable y proporciones diferentes de contenido en cristales de cuarzo, biotita oxidada, plagioclasa, anfíbol y líticos. Hay estratos potentes que se componen por lavas y brechas andesíticas, con cristales de plagioclasa y anfíbol (PCPZ-4, PCAR-1, PCDC-3), y horizontes erosionados compuestos por arenas de origen volcánico (PCDC-3).

La geología superficial de la cuenca indica la presencia de afloramientos pertenecientes a la Ignimbrita Pampa Chamaca, y que las potentes intercalaciones de lava se deben correlacionar con los conjuntos de volcanes del Plioceno y Mioceno.

Pampa Las Tecas

Los pozos de Pampa Las Tecas se encuentran prácticamente todos agrupados y localizados en el sector norte de la cuenca. En general, estos sondajes se han construido sobre una potente capa de depósitos sedimentarios, próxima al límite con la cuenca Pampa Colorada.

La cuenca se caracteriza por tener las mayores potencias de depósitos sedimentarios entre las cuencas piloto. Este relleno aluvial se compone de gravas de color pardo y origen volcánico. Bajo la cubierta sedimentaria, se reconocen diversas tobas que varían en su composición química entre andesítica y dacítica, con proporciones variables de cristales de cuarzo, biotita oxidada, plagioclasa, anfíbol y líticos, y porcentajes variables de matriz cinerítica o cristalina. Se reconocen intercalaciones de lava en los pozos LTPZ-5A/5B. El pozo LTAR-2 presenta hacia el final de la perforación un estrato compuesto por una brecha volcánica de 80 m de espesor. Las tobas de mayor profundidad se presentan silicificadas en los pozos LTAR-2 y

LTDC-4. El pozo LTAR-1 presenta en sus niveles intermedios un estrato de 60 m de espesor compuesto por una intercalación rítmica de lavas y tobas de composición andesítica.

En esta cuenca, afloran las ignimbritas Pampa Chamaca y Guaitiquina hacia el límite oriental de la cuenca, mientras que hacia el sector sur abundan los estrato-volcanes y secuencias de lava del Mioceno, pertenecientes al Conjunto de Volcanes I.

Salar El Laco

Sólo se cuenta con información litológica de un pozo (PCAR-2), ubicado hacia el extremo suroeste de la cuenca, cercano al límite sureste de Pampa Colorada.

El sondaje consiste en un relleno aluvial compuesto por gravas de origen volcánico. Subyacen al relleno, tobas de composición química variable, presencia de minerales de cuarzo, biotitas oxidadas, plagioclasa y anfíbol, con alto contenido lítico andesítico. Existe un horizonte meteorizado, a unos 150 m bajo la superficie, compuesto por arenas de origen volcánico.

8.1.4 Datos Geofísicos

Para la elaboración del EIA Pampa Colorada (WMC, 2006) se llevó a cabo una campaña geofísica, utilizando el método de transiente electromagnético (TEM), entre noviembre de 2004 y enero de 2005. La campaña fue realizada con el fin de obtener más información sobre los materiales de subsuperficie en el área de estudio, particularmente en los límites entre las cuencas hidrográficas. Durante las exploraciones iniciales realizadas en el sector de la Puna de Atacama, GeoAguas (2007) también llevó a cabo un número limitado de sondeos TEM en septiembre del 2006 y febrero del 2007 (ver Figura 8.2 con los perfiles del EIA Pampa Colorada). A continuación se presenta una compilación de las definiciones, resultados y conclusiones más importantes que se obtienen a partir de los mencionados trabajos de terreno.

Los métodos eléctricos suelen medir conductividad/resistividad en superficie al aplicar una corriente eléctrica al suelo. Los sondeos TEM permiten mapear la resistividad eléctrica aparente de la tierra debajo de una configuración de bobinas (circuitos cerrados) transmisoras y receptoras. Esta respuesta es controlada por las propiedades del medio, su humedad y las diferencias relativas de conductividad que posean los distintos materiales. La señal observada en este caso, se mide usando un circuito cerrado receptor coincidente con el transmisor, ya que esta configuración se adapta mejor al 'acoplamiento' con estructuras estratificadas horizontales y es un método estándar para el mapeo de reconocimiento de la resistividad eléctrica en dos dimensiones (2D).

La resistividad de una formación disminuye principalmente en función del aumento de la saturación, la porosidad (primaria o de fracturamiento), la salinidad del fluido en ella, así

como con la alteración y el contenido de arcilla. Además, el modelo de resistividadprofundidad usado mediante el proceso de inversión no es único. En cualquier área de exploración, sólo es posible resolver los efectos relativos de cada uno mediante la comparación con sondajes.

Geofísica WMC (WMC, EIA Pampa Colorada, 2006)

Se realizaron 273 sondeos TEM que cubren alrededor de 120 km. En el trabajo de exploración, se usó un tamaño de circuito cerrado de 200 x 200 metros y los sondeos se llevaron a cabo separados en tramos de entre unos 200 y unos 800 m a lo largo de las líneas de perfiles. En los márgenes de las cuencas se usó una separación de sondeos de 200 m, para lograr una mejor resolución para la evaluación de flujos entre cuencas. Al aplicar este método en este entorno de resistividad característico y con el rango de tiempo de registro empleado, pueden resolverse bordes con significativos contrastes de resistividad, que varían en un rango de profundidad de 60 a 500 m.

Los resultados TEM en conjunto con la litología de los sondajes sugieren que la saturación, la porosidad y la salinidad de los fluidos son los factores predominantes, y es probable que las zonas más favorables para la extracción de agua sean aquellas que muestran resistividades intermedias, indicando una alta saturación, una salinidad relativamente baja y un bajo contenido de arcilla (por ende, una mejor permeabilidad). Sin embargo, las zonas de resistividad intermedia también podrían corresponder a formaciones con bajo rendimiento de agua y alta salinidad.

Se han definido las 5 unidades geoeléctricas en el área, que se describen a continuación. Las capas 4 y 5 se encuentran sólo en Pampa Colorada, Las Tecas y Amarilla.

Unidad 1. Capa superior de alta resistividad (>100 ohm-m) correlacionada con la zona vadosa, un acuífero superior de baja permeabilidad, bajo almacenamiento y/o agua subterránea dulce, que no está bien resuelta por los sondeos TEM debido a la poca profundidad y a la resistividad relativamente alta.

Unidad 2. Exhibe resistividades intermedias, del orden de 10 a 50 ohm-m y más comúnmente en el rango de 25 a 50 ohm-m, que se correlacionan con roca fracturada con un bajo contenido de arcilla (mejor permeabilidad), un buen almacenamiento y una buena calidad del agua. Cuando esta segunda capa muestra resistividades del orden de 10 a 25 ohm-m indica agua más salina o una roca más alterada, rica en arcilla. El espesor de esta capa varía de 50 a 400 m.



Figura 8.2: Ubicación de perfiles geofísicos realizados en los antecedentes.

Unidad 3. Muestra resistividades menores a 10 ohm-m. Se ha bombeado agua salina desde esta zona, pero las bajas resistividades pueden deberse tanto a la alteración y producción de arcillas como a este tipo de agua. Dada la baja cantidad de arcilla interceptada en los sondajes de investigación, es probable que la salinidad del agua domine la resistividad en esta unidad.

Unidad 4. La capa más profunda corresponde al basamento de resistividad relativamente alta (>100 ohm-m) y se resuelve sólo en algunos perfiles. No es posible efectuar estimaciones de la profundidad en la parte superior de esta unidad de manera confiable mediante sondeos TEM, aunque se puede estimar en general que se encuentra alrededor de los 300 - 500 m.

Unidad 5. Existe otra capa en los márgenes de las cuencas que generalmente muestra resistividades de 50 a 100 ohm-m. Esta capa puede interpretarse como una zona acuífera o acuitardo de baja permeabilidad y bajo almacenamiento.

Considerando el sistema piloto separado en 2 partes, de acuerdo a las características mostradas, se plantea un análisis conjunto para el sector norte, formado por las cuencas Salar de Aguas Calientes 2 y Puntas Negras, y otro para el sector sur que contiene las hoyas Laguna Tuyajto, Pampa Colorada, Pampa Las Tecas y Salar El Laco.

Para el sector norte se concluye con respecto a los sondeos TEM que existe una buena correlación de los datos con la información litológica de los pozos. El acuífero está compuesto principalmente por la unidad de tobas inferiores, mientras que las tobas de profundidad intermedia no están resueltas por los sondeos TEM como un acuífero (tratado más adelante en Caracterización de Unidades de Subsuperficie). El acuífero es relativamente homogéneo y tiene una buena extensión lateral, especialmente en Puntas Negras. Hacia la base de las tobas inferiores se produce una disminución de la conductividad, que puede correlacionarse con una menor permeabilidad/almacenamiento; el basamento no está resuelto en forma clara, es decir, es probable que el acuífero tenga un espesor mayor a 400 m. Los límites hidrográficos al este de Puntas Negras generarían una divisoria de aguas subterráneas, es decir, la cuenca hidrográfica coincidiría con la cuenca hidrogeológica, sin embargo, podrían producirse flujos más profundos debido a diferencias piezométricas.

Para el sector sur se concluye con respecto a los sondeos TEM que existe una buena correlación de los datos con la información de pozos. El acuífero es relativamente homogéneo y tiene una buena extensión lateral, especialmente en Pampa Las Tecas. Se producen las mayores variaciones en Laguna Tuyajto y Pampa Colorada, donde existen zonas de baja resistividad que pueden correlacionarse con la migración de aguas subterráneas salinas desde los salares locales y la laguna salina de Tuyajto. El basamento no se resuelve con claridad, lo que implica que el acuífero puede tener un espesor superior a 400 m. Los datos TEM indican

una continuidad de las formaciones prospectivas y el nivel de las aguas subterráneas en los límites de las cuencas, lo que sugiere flujo entre las pampas Colorada y Las Tecas, así como entre Las Tecas y Laguna Tuyajto. El flujo entre las cuencas Pampa Colorada y Laguna Tuyajto, también factible de ocurrir con los antecedentes descritos, podría estar limitado por el reducido espesor de los acuíferos. Un potencial flujo salino desde El Laco a Pampa Colorada no está claramente definido con la geofísica, dado que se observa una divisoria de aguas subterráneas en el límite de las cuencas. Un gran espesor de agua subterránea dulce se da bajo la divisoria superficial entre ambas cuencas, sin embargo, el agua subterránea salina en el acuífero más profundo de Pampa Colorada estaría influenciada por el agua del Salar El Laco, afectada por evapoconcentración.

Geofísica EMSA (Proyecto Mundo, GeoAguas Consultores, 2007)

Se realizaron 131 sondeos TEM que cubren alrededor de 60 km en un total de 16 perfiles. Los resultados de estos perfiles se complementan con los de aquellos obtenidos a partir de 7 perfiles geofísicos ejecutados por WMC, entre noviembre de 2004 y enero de 2005.

Los trabajos efectuados por EMSA estuvieron orientados principalmente a investigar las condiciones de subsuperficie en las divisorias de aguas de las cuencas hidrográficas del sector sur. Para esto se realizaron perfiles longitudinales entre cuencas y perfiles transversales para definir secciones de paso. Se identifican dos unidades geoeléctricas contrastantes en su respuesta resistiva. Ningún perfil geofísico registra resistividades que indiquen la presencia de un basamento de rocas impermeables, sino que las resistividades tienden a disminuir insinuando un posible aumento de la salinidad y/o temperatura de los fluidos contenidos en las rocas.

Unidad Superior. Presenta resistividades entre 100 – 10.000 ohm-m, rango que se correlaciona con materiales no saturados que afloran en el área. Esta capa está conformada principalmente por rocas volcánicas – volcanoclásticas de distinta composición y edad, considerando también a los materiales sedimentarios modernos no saturados, que en algunos sectores tienen menor resistividad que el rango descrito.

Unidad Inferior. Presenta valores de resistividad inferiores a 50 ohm-m y está integrada por rocas volcánicas – volcanoclásticas fracturadas y saturadas. En las proximidades a los salares, esta unidad está conformada por sedimentos saturados de granulometría variable.

Los perfiles que conectan a las cuencas Salar El Laco con Pampa Colorada y Pampa Las Tecas muestran una continuidad de la unidad geoeléctrica inferior. Los perfiles transversales realizados en los límites de las cuencas anteriormente mencionadas han definido secciones de conexión entre ellas, cuyos límites laterales no se han identificado por la imposibilidad que

entrega la topografía de realizar una prospección más extensa. Dentro de estas secciones de conexión, existen sectores marcadamente conductivos, producto de variaciones en el grado de fracturamiento de la roca, lo que implica flujos preferenciales en zonas saturadas. Los perfiles se caracterizan en general por resistividades muy bajas hacia la base de la unidad conductiva.

Adicionalmente, se realizaron perfiles geofísicos para determinar la geometría de las secciones de paso desde la cuenca Laguna Tuyajto hacia las cuencas Salar de Aguas Calientes 3 y Salar de Incahuasi. Los perfiles TEM N–S, que caracterizan la sección de descarga hacia la cuenca Salar de Aguas Calientes 3, tienen anchos similares, con un promedio de 1.500 m y una profundidad de penetración de 400 m. Por su parte, los perfiles TEM E–W, que caracterizan la sección de descarga hacia la cuenca Salar de Incahuasi, tienen un ancho variable entre 1.000 y 4.000 m.

8.1.5 Caracterización de Unidades de Subsuperficie

Bajo la superficie de los campos de pozos se distingue de manera general un nivel superior aluvial sedimentario, al cual subyacen niveles tobáceos que podrían correlacionarse con cualquiera de las ignimbritas descritas en cada cuenca (capítulo 1). Los niveles tobáceos se encuentran intercalados ocasionalmente por horizontes sedimentarios de espesor considerable, y por depósitos de lavas y/o brechas.

Las ignimbritas se han diferenciado en estudios anteriores según sus características petrográficas (contenido y tipo de cristales y matriz), presencia y tipo de pómez o *fiammes*, grado de soldamiento, distribución areal, posición estratigráfica y edades radiométricas. Si no se cuenta con descripciones petrográficas detalladas, se hace difícil correlacionar la litología descrita en los diferentes pozos con las unidades geológicas identificadas anteriormente.

El sistema de cuencas piloto se encuentra inserto en un sector de la Puna que genera interés debido a que allí se emplazan los depósitos asociados a la caldera La Pacana, y que ha sido motivo de diversos estudios petrológicos, estratigráficos, geoquímicos y estructurales (Gardeweg y Ramírez, 1987; Lindsay et al., 2001a, b; Schmitt et al., 2001, 2002). Es por esto que las ignimbritas Atana y Toconao, que se relacionan al evento eruptivo de La Pacana, han sido rigurosamente estudiadas, a diferencia del resto de las ignimbritas del sector de la Puna, de las cuales poco se sabe.

Para definir las unidades de subsuperficie se analizan en conjunto los datos litoestratigráficos de perforaciones, así como los datos geofísicos que corresponden al sector norte (Salar de Aguas Calientes 2, Puntas Negras) y el sector sur (Laguna Tuyajto, Pampas Colorada y Las Tecas, Salar El Laco) del sistema de cuencas piloto.

La información presentada en el EIA Pampa Colorada (WMC, 2006) fue revisada, corroborada y corregida cuando se estimó pertinente, para presentar las cinco unidades litológicas principales (A, B, C, D y E) y cinco unidades secundarias (L1, L2, horizontes meteorizados/erosionados, brecha volcánica, y una tobas cristalina) en los diversos sondajes. La Unidad A corresponde a depósitos aluviales. Las Unidades B, C y D corresponden a diversos tipos de tobas. La Unidad E corresponde a una intercalación de lavas andesíticas y tobas, en algunos casos silicificadas y que sólo se reconoce en la zona sur, en Pampa Colorada, Pampa Las Tecas y Salar El Laco.

Se reconocieron además horizontes erosionados y meteorizados entre las tobas, los que están mejor desarrollados en la zona norte y especialmente en Puntas Negras. Asimismo, se han identificado dos unidades adicionales de flujos de lava andesítica (L-1 y L-2) en varios sondajes. Existen también brechas volcánicas en algunos pozos, que podrían estar relacionadas con la base de los flujos ignimbríticos. Se reconocen localmente tobas cristalinas (PNDC-1), que no se correlacionan con ninguna de las unidades anteriores. En general, la geología es más compleja en la zona sur que en la zona norte y la correlación entre las unidades existentes en las diferentes cuencas de la zona sur se hace más difícil.

La Figura 8.3 presenta las columnas estratigráficas tipo, tanto del sector norte como del sector sur del sistema de cuencas piloto. La Figura 8.4 muestra la ubicación de los perfiles que se han reconstruido a partir de la información litoestratigráfica y geofísica conjunta, y para distintas secciones en la zona de estudio. Estos perfiles, además de otros complementarios, se presentan en la Figura 8.5, Figura 8.6 Figura 8.7, Figura 8.8, Figura 8.9 y Figura 8.10.

Unidad A: Depósitos aluviales (Qal)

Esta unidad está formada por sedimentos no consolidados, principalmente de tamaño de grava, y su composición varía de manera transicional, de litologías mixtas en la parte superior a un tipo litológico único y volcánico hacia la base. Existe un contacto gradacional entre la base de la unidad y la parte superior de las rocas volcánicas subyacentes y, en las áreas en las cuales las rocas volcánicas subyacentes están moderadamente meteorizadas a muy meteorizadas hacia el techo, el contacto es difícil de establecer. La unidad incluye a gravas compuestas de tobas multicomposicionales y fragmentos de lava en una matriz de arena, con limo y arcillas en áreas localizadas.

Esta unidad representa la parte superior de la secuencia estratigráfica y es probable que se haya desarrollado durante un receso de la actividad volcánica debido a la meteorización y erosión de las rocas volcánicas preexistentes (tobas y lavas). Los flujos generados por las precipitaciones locales han transportado los sedimentos hacia los centros de las cuencas o áreas topográficamente bajas (pampas). Los fragmentos angulares se encuentran en las partes marginales de las pampas, aumentando el redondeamiento de los fragmentos hacia el centro de las cuencas. Debido al limitado tamaño de varias de las hoyas hidrográficas, se ha producido la depositación de material generalmente grueso, con una permeabilidad moderada a alta. La excepción es para la cuenca Pampa Colorada, que aunque tiene un menor tamaño, es posible reconocer material fino que podría restringir la infiltración en esta área. Esto se debe a la alteración arcillosa de las rocas volcánicas en este sector.



[Modificado de WMC, EIA Pampa Colorada, 2007]

Figura 8.3: Columnas estratigráficas generalizadas para el sistema de cuencas piloto sectores norte y sur.

Los mayores espesores de esta capa superficial se encuentran en el centro de Pampa Las Tecas (64 - 80 m) y en la zona norte de Pampa Colorada (82 m). En el centro de Pampa Colorada el

espesor es entre 18 y 40 m. La unidad está poco desarrollada en Puntas Negras, donde su espesor varía entre 2 y 27 m.

En Laguna Tuyajto, el espesor es variable y se encuentra entre 20 y 64 m, mientras que en Salar de Aguas Calientes 2 varía entre 17 y 45 m. Tanto en el margen del Salar de Aguas Calientes 2 como de la Laguna Tuyajto, la unidad está poco desarrollada. En el primero se identificó un espesor máximo de 13 m.

Unidad B: Toba lítica de composición andesítica

Esta toba se encuentra parcialmente soldada y alterada por óxidos de hierro y está compuesta de plagioclasa y cristales de cuarzo más alguna biotita oxidada, lo que da a la roca una apariencia andesítica. En algunos sondajes, se evidencia un horizonte de arena con un espesor aproximado de 6 m (LAAR-1), separando esta unidad de la Unidad C subyacente, lo que sugiere un evento erosional durante un periodo ausente de actividad volcánica. La matriz está compuesta por cenizas de color gris a rojo pardusco, por efecto de los óxidos de hierro. Se correlaciona con las ignimbritas más recientes.

La extensión de esta unidad está restringida en la zona norte a 2 sondajes, uno del Salar de Aguas Calientes 2 y otro de Puntas Negras. El espesor máximo de 90 m se registra en LAAR-1. En la zona sur se reconoce en Laguna Tuyajto esta unidad, intercalada con lavas andesíticas, y con potencias que alcanzan los 91 m de espesor (PADC-5).

Unidad C: Toba cristalina de composición andesítica y dacítica

Esta unidad corresponde a un depósito de ignimbrita compuesto por tobas andesíticas y dacíticas. En los perfiles geofísicos, los valores de resistividad disminuyen al aproximarse al fondo de la unidad.

La toba dacítica está compuesta de cristales, fragmentos líticos y una matriz de ceniza, cuyos porcentajes relativos varían de un lugar a otro. Los minerales félsicos son principalmente plagioclasas vidriosas y tabulares y, en menor medida, ojos de cuarzo con una granulometría que varía de 1 a 4 mm. Los minerales máficos son principalmente biotitas oxidadas y unos pocos anfíboles localizados. Los fragmentos líticos son volcánicos, con una morfología subangular a angular y tamaños que varían de 1 mm a 6 cm, principalmente de color rojo pardusco y café grisáceo, probablemente correspondiente a una composición andesítica. También existen algunos fragmentos localizados de pómez. La matriz puede ocupar casi el 60% del volumen de la roca en algunos lugares y está totalmente compuesta de cenizas con granulometrías que van de tamaño fino a muy fino. Muestra un color blanco pardusco cuando no está alterada, variando a pardo anaranjado, pardo rojizo, pardo rosáceo y pardo amarillento cuando está alterada por óxidos de hierro tales como la limonita, la hematita y la jarosita.

La toba andesítica está compuesta principalmente de cristales tabulares de plagioclasa lechosa y biotitas negras. La matriz está compuesta de cenizas muy finas de color café rojizo. El tamaño de los fragmentos líticos varía de 1 a 3 mm y están compuestos principalmente por fragmentos angulares andesíticos y de pómez.

Esta unidad está presente en todos los sondajes, excepto en PCAR-1, en Pampa Colorada. En la zona norte, alcanza un espesor entre 71 m (PNPZ-2) y 162 m (PNAR-3) en Puntas Negras, con mayores valores hacia el centro de la cuenca. En Salar de Aguas Calientes 2, la unidad se adelgaza hacia el salar, alcanzando un espesor de 30 m en LAAR-2. La Unidad C se extiende sobre la Unidad D y un horizonte erosionado/meteorizado que se encuentra entre ellas.

En Pampa Colorada y también en El Laco (PCAR-2) se encuentra en el centro de la cuenca, donde alcanza un espesor entre 90 m (PCPZ-3) y 258 m (PCAR-2). Hacia el noroeste se adelgaza, llegando a 48 m en PCPZ-4 y extendiéndose sobre la Unidad L-1. En El Laco, se extiende sobre la Unidad D, separado por un horizonte erosivo de arenas (2 m), con una potencia de 258 m. En Laguna Tuyajto varía entre los 32 m cerca de la laguna (PAAR-1) y 260 m (PADC-5), y subyace a las ignimbritas cuaternarias. En Pampa Las Tecas, alcanza un espesor entre 38 y 92 m, con mayores valores hacia el centro de la cuenca. Se extiende sobre la Unidad E.

Unidad D: Toba cristalina de composición riodacítica

La Unidad D está compuesta por una toba cristalina riodacítica, con una base riolítica que varía transicionalmente a dacítica hasta la parte superior de la unidad. Exhibe un color gris anaranjado brillante, que varía a gris verdoso en la base de la unidad debido a alteración clorítica más generalizada. La roca presenta muchos ojos de cuarzo (1 a 4 mm), biotitas oxidadas localmente (1 a 3 mm) y anfíboles localizados y subordinados. También se encuentran presentes fragmentos líticos menores, principalmente de composición andesítica, que pueden alcanzar los 5 cm. Presenta una matriz cristalina compuesta principalmente de cuarzo, plagioclasa y feldespato potásico subordinado, que se vuelve más cinerítico hacia la parte superior de la unidad. Exhibe valores de resistividad constante, generalmente con valores menores que la Unidad C.

Esta unidad se encuentra presente en todos los sondajes del sector norte, con un espesor generalmente mayor que 110 m. La base sólo se identificó en PNDC-1 a una profundidad de 394 m, con un espesor total de 224 m. En este sector, se extiende sobre una brecha volcánica que podría estar asociada a su base y sobre una toba andesítica cristalina, con otra brecha volcánica en su base. En la zona sur, sólo se encuentra en Laguna Tuyajto, en el pozo PADC-5, con un espesor de 41 m.

Unidad E: Lavas y tobas de composición andesítica

Esta unidad corresponde a la base de la secuencia volcánica del área. Sólo se identificó en los sondajes perforados en la zona sureste. En Pampa Las Tecas, presenta espesores máximos que varían entre 84 m (LTPZ-6A) y 170 m (LTDC-4). En Salar El Laco se identifica en el pozo PCAR-2, a los 150 m de profundidad, y con un espesor de al menos 72 m.

Unidad L1: Lavas de composición andesítica (correlacionadas con los Estrato- Volcanes II, Plv)

Esta unidad está compuesta de una lava andesítica gris oscuro, que muestra finos cristales de hornblenda. La roca también muestra una epidotización moderada y una ligera cloritización y sericitización. Esta unidad sólo aparece en la parte sur de Pampa Puntas Negras, en el sondaje PNAR-1, donde alcanza un espesor de 109 m.

Unidad L2: Lavas de composición andesítica (correlacionadas con los Estrato- Volcanes I, Msv)

Esta unidad está compuesta de lavas andesíticas con cristales de plagioclasa en una matriz pardo rojizo que varía a gris. El color de la roca depende del tipo de alteración. Esta unidad se reconoce en la cuenca Pampa Colorada (PCAR-1) alcanzando espesores entre los 118 y 130 m, y en la cuenca Laguna Tuyajto, con espesores que varían entre 35 y 60 m.

Horizontes erosionados/meteorizados

Corresponde a los niveles sedimentarios que se identifican localmente en profundidad entre las unidades volcánicas, y que están mejor desarrollados en la zona norte. Los horizontes se componen por arenas medias a finas y/o gravillas, compuestas por cristales de cuarzo redondeados, con buena esfericidad y presencia de óxidos de Fe, que evidencian la meteorización. Está bien desarrollada en la zona norte en los pozos LAAR-1 (6 m), PNPZ-1 (8 m) y PNDC-1 (5 m), y en El Laco en el pozo PCAR-2 (2 m).

Brechas volcánicas

Se reconocen en el sistema de cuencas piloto depósitos volcánicos de brechas que no se incorporan a las unidades anteriormente descritas. Estas unidades de brecha, se distinguen en la zona norte, específicamente en los sondajes PNAR-3 y PNDC-1. En la zona sur en tanto, se reconocen brechas volcánicas en PAAR-1, en la base de una unidad de lava y hacia la base de las perforaciones de los pozos PCDC-3, LTAR-2, y LTPZ-6A, las que se correlacionan con la Unidad E, y que podrían estar relacionadas con la base de los flujos ignimbríticos.



Figura 8.4: Ubicación de los perfiles geológicos en el sistema de cuencas piloto.

8.1.6 Unidades Hidrogeológicas y Permeabilidades Relativas

Las unidades hidrogeológicas se definen usando la geología de subsuperficie y considerando su potencial para almacenar y transmitir agua. De este modo, las unidades se agrupan, asignándoles coeficientes cualitativos relativos de permeabilidad. Como consideración para las unidades ignimbríticas reconocidas a nivel de subsuperficie en la zona de estudio, un mismo tipo de este grupo geológico puede presentar distintos grados de soldamiento, porosidad y fracturamiento, razón por la cual no se encuentra una relación directa entre permeabilidad y litología. En estudios anteriores es común que se describa el acuífero principal de la zona de estudio como una única y potente unidad hidrogeológica compuesta por depósitos volcánicos neógenos, que transmiten agua por porosidad secundaria (fracturamiento) y que preferentemente almacenan agua en horizontes erosionados.

Las unidades hidrogeológicas se definen combinando toda la información disponible, incluyendo los datos litológicos, geofísicos, e hidráulicos recopilados y analizados en el presente informe. La permeabilidad y el almacenamiento están controlados por la porosidad primaria, porosidad secundaria y por el desarrollo de horizontes meteorizados/erosionados entre las diferentes unidades volcánicas. Considerando estos aspectos se han definido 4 categorías de permeabilidades relativas y cualitativas para las diferentes unidades geológicas reconocidas en las cuencas del sistema piloto: baja, media-baja, media-alta, alta, las que guardan coherencia con lo presentado en la estimación de la recarga. A continuación se describen las referidas permeabilidades relativas y las unidades que las componen en superficie.

Permeabilidad Baja ($10^{-9} - 10^{-5}$ m/d): Se asocia esta permeabilidad a las rocas volcánicas ubicadas en los márgenes de las cuencas, y que restringen parcialmente el flujo de agua subterránea entre las cuencas hidrográficas. También se otorga este rango a las lavas que intercalan localmente con los potentes depósitos ignimbríticos (lavas L1 – L2). Las intercalaciones de lavas y tobas andesíticas, localmente silicificadas, que corresponden a la Unidad E caen también en este grupo.











Figura 8.7: Perfil esquemático de Pampa Colorada.





Permeabilidad Media – Baja (10^{-4} - 10^{-3} m/d): Caracteriza a las rocas ignimbritas del Plioceno superior - Cuaternario (Unidad B), no fracturadas y más jóvenes, y las ignimbritas fracturadas que reportan valores bajos de resistividad (techo Unidad C, base Unidad D). Se incorpora también a este grupo la toba cristalina reconocida en la perforación PNDC-1.

Permeabilidad Media – Alta $(10^{-2} - 10^{-1} \text{ m/d})$: Describe a la unidad acuífera principal, compuesta por las ignimbritas fracturadas (base unidad C, techo Unidad D), y también a las brechas volcánicas identificadas localmente en la base del acuífero principal (PNDC-1 y PCDC-3).

Permeabilidad Alta ($10^{-1} - 10 \text{ m/d}$): Corresponde a la zona de relleno aluvial Cuaternario y a los horizontes inter-volcánicos erosionados/meteorizados de arena y gravilla.

Las perforaciones arrojan como resultado un acuífero principal de permeabilidad media – alta, compuesto por rocas volcánicas, principalmente tobas. Su permeabilidad es casi netamente secundaria, asociada a un fuerte control estructural por parte de las rocas volcánicas que lo componen. Dado que el basamento hidrogeológico no fue identificado por las perforaciones de investigación, así como tampoco por la exploración geofísica, se asume que los acuíferos locales tienen al menos 400 m de espesor.

Un acuífero de alta permeabilidad, aunque de menor importancia que el anterior en términos de potencia, se correlaciona con los depósitos sedimentarios profundos, que están limitados a capas de poco espesor entre algunos estratos volcánicos depositados durante periodos erosivos de baja actividad magmática en superficie.

También se reconocen acuíferos sedimentarios de alta permeabilidad y baja potencia, en las áreas cercanas a los salares y lagunas salinas. Los depósitos aluviales se encuentran saturados únicamente en los márgenes de la Laguna Tuyajto y los salares Aguas Calientes 2 y El Laco, debido a la intersección entre el nivel freático con la superficie del terreno en los sectores de menor cota.

A las rocas volcánicas que componen los altos topográficos, que hacen de divisoria de aguas de las cuencas endorreicas, se les asocia una permeabilidad baja, como es el caso de las lavas, y media – baja en el caso de las ignimbritas. Esta característica permite cierto grado de infiltración que aporta a la recarga, pero es de menor importancia, así como lo son los flujos entre cuencas por estas zonas.

Para reconocer la distribución espacial de las diferentes unidades hidrogeológicas, se presentan perfiles hidrogeológicos que agrupan y grafican las diferentes unidades de roca reconocidas en las cuencas piloto, según el grado de permeabilidad que se les ha asociado (Figura 8.9 y Figura 8.10). Los perfiles muestran además las cotas de la napa y la salinidad del acuífero, destacando la presencia de salmueras y aguas muy salinas en profundidad, y que los análisis hidrogeoquímicos han corroborado.







Figura 8.10: Perfil hidrogeológico del sector sur del sistema de cuencas piloto. Arriba: perfil E-W que cruza las cuencas Pampa Las Tecas, Laguna Tuyajto y Salar de Aguas Calientes 3. Abajo: perfil E-W que cruza las cuencas Pampa Colorada y Salar El Laco.

8.2 Piezometría de Acuíferos

Exploraciones Mundo S. A. (EMSA) realizó monitoreos mensuales continuos de sus pozos, los que fueron construidos durante el periodo otorgado por la autoridad para explorar los recursos de la zona. Las mediciones con que se cuentan abarcan desde mayo de 2003 hasta julio de 2004, salvo limitaciones producto de precipitación nival que cerrara los accesos. Water Management Consultants (WMC) complementó la información en el periodo noviembre de 2004 – abril de 2005, agregando algunas punteras durante el tiempo que realizó pruebas de bombeo en el área. El monitoreo fue luego retomado el año 2006 por EMSA.

En el plazo analizado, los niveles estáticos se pueden considerar constantes, ya que las variaciones que presentan son despreciables y no muestran una tendencia. A nivel diario en cambio, se presentan algunas variaciones de pocos centímetros, las que se han atribuido a cambios de presión y/o efectos de marea. Variaciones más importantes de carácter estacional se han asociado a ciclos de recarga y descarga natural del sistema.

Las aguas subterráneas se encuentran a menor profundidad en las partes bajas de las cuencas altoandinas y, debido a la abrupta topografía de la zona, al alejarse de estos sectores la profundidad de la napa aumenta significativamente. Los rangos de profundidad observados en los periodos anteriormente descritos se presentan a continuación.

- Loma Amarilla (sur Salar de Aguas Calientes 2): 12 a 136 m.
- Puntas Negras: 40 a 130 m.
- Pampa Amarilla: 25 a 118 m.
- Pampa Colorada: 68 a 170 m.
- Pampa Las Tecas: 83 a 187 m.

De acuerdo a la piezometría, existe una continuidad en las napas dentro del área de estudio. Los gradientes en las zonas bajas de las cuencas Puntas Negras, Pampa Colorada y Pampa Las Tecas son bajos, lo que indica una alta permeabilidad del medio. La diferencia de niveles piezométricos entre estas zonas y aquellos de las cuencas que se encuentran a cotas menores, varían en el orden de 50 a 150 m. La Tabla 8.1 y las Figura 8.11 (sector norte) y Figura 8.12 (sector sur) muestran la ubicación de los pozos, niveles medidos en ellos y sus cotas.

Pozo	Ubicación	Coordenadas UTM (PSAD 56)		Cota terreno	Cota napa	Prof. Napa
		Norte (m)	Este (m)	(msnm)	(msnm)	(mbnt)
ACN-1A	Loma Amarilla	7.397.895,00	643.432,00	4.202,16	4.200,78	1,38
ACN-1B	Loma Amarilla	7.397.885,00	643.535,00	4.202,39	4.200,79	1,60
ACN-1C	Loma Amarilla	7.397.896,00	643.437,00	4.202,05	4.200,78	1,27
ACN-2A	Loma Amarilla	7.397.689,00	644.034,00	4.201,17	4.199,94	1,23
ACN-2B	Loma Amarilla	7.397.687,00	644.039,00	4.201,13	4.199,93	1,20
ACN-2C	Loma Amarilla	7.397.687,00	644.044,00	4.201,13	4.199,92	1,21
ACN-3A	Loma Amarilla	7.397.175,00	644.697,00	4.201,87	4.200,98	0,89
ACN-3B	Loma Amarilla	7.397.174,00	644.692,00	4.201,77	4.201,05	0,72
ACN-3C	Loma Amarilla	7.397.173,00	644.687,00	4.202,02	4.201,18	0,84
LA-0	Loma Amarilla	7.395.588,00	645.217,00	4.219,75	4.207,21	12,54
LA-1	Loma Amarilla	7.394.080,00	644.466,00	4.234,36	4.210,96	23,40
LA-2	Loma Amarilla	7.393.190,00	645.194,00	4.248,04	4.213,70	34,34
LA-3	Loma Amarilla	7.391.251,00	646.336,00	4.304,89	4.216,67	88,22
LAAR-1	Loma Amarilla	7.388.880,00	648.364,00	4.352,42	4.216,88	135,54
LAAR-2	Loma Amarilla	7.394.197,00	644.993,00	4.241,95	4.208,55	33,40
LADC-2	Loma Amarilla	7.393.139,00	645.409,00	4.251,44	4.213,68	37,76
PN-1A	Puntas Negras	7.379.393,00	658.068,00	4.361,20	4.321,85	39,35
PN-2	Puntas Negras	7.380.329,00	658.018,00	4.362,43	4.321,40	41,03
PN-5	Puntas Negras	7.379.247,00	659.147,00	4.355,92	4.321,77	34,15
PN-6	Puntas Negras	7.379.813,00	659.248,00	4.366,14	4.321,66	44,48
PN-8	Puntas Negras	7.380.970,00	658.374,00	4.374,64	4.321,72	52,92
PN-9	Puntas Negras	7.381.034,00	657.973,00	4.374,06	4.321,82	52,24
PNAR-1	Puntas Negras	7.378.686,00	661.521,00	4.451,44	4.321,83	129,61
PNAR-2	Puntas Negras	7.384.776,00	660.767,00	4.445,98	4.321,72	124,26
PNAR-3	Puntas Negras	7.383.662,00	656.456,00	4.407,35	4.320,74	86,61
PNAR-4	Puntas Negras	7.384.162,00	657.730,00	4.450,78	4.321,09	129,69
PNDC-1	Puntas Negras	7.380.424,00	658.933,00	4.369,28	4.321,29	47,99
PNPZ-1	Puntas Negras	7.381.107,00	658.132,00	4.376,51	4.321,71	54,80
PNPZ-2	Puntas Negras	7.379.267,00	658.125,00	4.364,55	4.322,03	42,52
PC-1obs	Pampa Colorada	7.358.058,00	652.540,00	4.283,56	4.195,49	88,07
PC-2obs	Pampa Colorada	7.358.057,54	652.539,85	4.261,49	4.194,45	67,04
PC-1	Pampa Colorada	7.357.059,00	654.028,00	4.283,64	4.194,84	88,80
PC-2	Pampa Colorada	7.358.054,00	652.526,00	4.261,99	4.194,34	67,65
PC-3	Pampa Colorada	7.357.511,00	653.109,00	4.269,07	4.194,87	74,20

Fuente: [Modificado de WMC, EIA Pampa Colorada (2006), GeoAguas Consultores (2007)]

	Ubicación	Coordenadas U	Coordenadas UTM (PSAD 56)		Cota terreno Cota napa P	
Pozo		Norte (m)	Este (m)	(msnm)	(msnm)	(mbnt)
PC-4	Pampa Colorada	7.356.340,00	655.253,00	4.291,52	4.193,90	97,62
PC-5	Pampa Colorada	7.356.708,00	654.652,00	4.291,97	4.194,51	97,46
PCAR-1	Pampa Colorada	7.356.584,00	654.612,00	4.364,14	4.194,65	169,49
PCAR-2	Pampa Colorada	7.356.418,00	660.098,00	4.312,48	4.234,44	78,04
PCDC-3	Pampa Colorada	7.357.068,00	653.899,00	4.281,96	4.194,53	87,43
PZ-3	Pampa Colorada	7.356.530,00	654.771,00	4.290,75	4.193,79	96,96
PZN-4	Pampa Colorada	7.357.388,00	653.155,00	4.270,49	4.194,84	75,65
DC-5	Pampa Amarilla	7.353.419,00	647.075,00	4.088,51	4.038,18	50,33
LJJ-1A	Pampa Amarilla	7.354.254,00	645.275,00	4.038,26	4.037,26	1,00
LJJ-1B	Pampa Amarilla	7.354.253,00	645.277,00	4.038,40	4.037,23	1,17
LJJ-1C	Pampa Amarilla	7.354.251,00	645.281,00	4.038,28	4.037,25	1,03
LTJ-2A	Pampa Amarilla	7.351.746,00	644.878,00	4.036,85	4.035,83	1,02
LTJ-2B	Pampa Amarilla	7.351.749,00	644.878,00	4.036,98	4.035,82	1,16
LTJ-2C	Pampa Amarilla	7.351.752,00	644.878,00	4.037,09	4.035,81	1,28
PA-2	Pampa Amarilla	7.355.454,00	649.013,00	4.169,96	4.051,80	118,16
PA-4	Pampa Amarilla	7.355.522,00	648.505,00	4.161,40	4.051,04	110,36
PAAR-1	Pampa Amarilla	7.348.212,00	643.170,00	4.069,05	4.024,66	44,39
PAAR-2	Pampa Amarilla	7.351.716,00	641.359,00	4.017,29	3.992,32	24,97
PAAR-3	Pampa Amarilla	7.351.655,00	646.820,00	4.075,80	4.037,52	38,28
SIAR-1	Salar Incahuasi	7.344.353,00	642.151,00	4.049,04	3.986,88	62,16
LTAR-1	Pampa Las Tecas	7.351.271,00	652.955,00	4.275,70	4.089,19	186,51
LTAR-2	Pampa Las Tecas	7.351.626,00	652.490,00	4.288,97	4.111,67	177,30
LTDC-4	Pampa Las Tecas	7.352.930,46	654.591,54	4.183,70	4.099,26	84,44
LTPZ-6A	Pampa Las Tecas	7.352.930,00	654.592,00	4.187,82	4.102,23	85,59
LTPZ-6B	Pampa Las Tecas	7.352.940,00	654.803,00	4.185,90	4.099,15	86,75
LTPZ-5A	Pampa Las Tecas	7.353.115,00	654.770,00	4.182,11	4.099,44	82,67
LTPZ-5B	Pampa Las Tecas	7.352.744,00	654.266,00	4.181,77	4.097,97	83,80
PT-1	Pampa Las Tecas	7.352.737,00	654.192,00	4.181,56	4.098,70	82,86
PT-3	Pampa Las Tecas	7.351.035,00	654.874,00	4.213,60	4.099,47	114,13
PT-4	Pampa Las Tecas	7.352.249,00	655.000,00	4.203,48	4.099,49	103,99
PT-5	Pampa Las Tecas	7.350.049,00	654.911,00	4.230,98	4.099,73	131,25
PT-6	Pampa Las Tecas	7.353.071,00	654.938,00	4.188,44	4.098,96	89,48

Fuente: [Modificado de WMC - EIA Pampa Colorada (2006), GeoAguas Consultores (2007)]



Figura 8.11: Pozos y cota de la napa (msnm) en sector norte del área de estudio



Figura 8.12: Pozos y cota de la napa (msnm) en sector sur del área de estudio

Los datos de nivel en la Tabla 8.1 corresponden a mediciones realizadas en marzo de 2005 para las pampas Loma Amarilla, Colorada, Amarilla y Las Tecas, mientras que para Puntas Negras corresponden a mediciones realizadas en diciembre de 2004. Los valores de cota de terreno están corregidos del EIA Pampa Colorada (WMC, 2006), de acuerdo a los datos entregados por GeoAguas Consultores (2007).

Las diferencias aproximadas de cota media en los niveles entre las depresiones son:

- 100 m entre Pampas Puntas Negras y Loma Amarilla (cuenca Salar de A. Calientes 3).
- 150 m entre Pampas Colorada y Amarilla (cuenca Laguna Tuyajto).
- 100 m entre Pampas Colorada y Las Tecas.
- 50 m entre Pampas Las Tecas y Amarilla (cuenca Laguna Tuyajto).
- 40 m entre Laguna Tuyajto y Salar de Aguas Calientes 3.
- 50 m entre cuenca Laguna Tuyajto y portezuelo a Incahuasi (SIAR-1).
- 40 m entre Pampa Colorada y El Laco.

Aún cuando singularidades topográficas puedan producir una discontinuidad hidrogeológica entre cuencas, debido a la manifestación de cuerpos (cuasi)impermeables en el relieve, no se descarta un flujo de agua subterránea de tipo regional, aunque más profundo, debido a las diferencias piezométricas mostradas.

Los gradientes que se aprecian en esta área, indican los flujos entre las cuencas que se describen a continuación. Dados los considerables desniveles de agua subterránea monitoreados en los pozos, la conexión entre las cuencas se produciría a través de zonas de baja permeabilidad y/o de secciones reducidas y mayor permeabilidad.

- Desde Pampa Puntas Negras hacia Pampa Loma Amarilla y al norte. Estas dos últimas corresponden a la cuenca Salar de Aguas Calientes 2.
- Pampa Colorada a Pampa Las Tecas y Amarilla (cuenca Laguna Tuyajto).
- Pampa Las Tecas a Pampa Amarilla (cuenca Laguna Tuyajto).
- Pampa Amarilla (cuenca Laguna Tuyajto) a cuencas Salar de Incahuasi y Salar de Aguas Calientes 3.

Considerando estos antecedentes, es posible separar las cuencas del sistema piloto estudiado en 3 grupos, como función de la dirección de los escurrimientos subterráneos.

Un primer grupo, al norte, incluye las cuencas Puntas Negras y Aguas Calientes 2 (con subcuenca Loma Amarilla), cuyos flujos son preferencialmente hacia el N y NW, con zona de

descarga la Laguna Aguas Calientes 2, al SW del salar. (Figura 8.13). Un segundo grupo, al sur, lo constituyen las cuencas Pampa Colorada, Pampa Las Tecas y Laguna Tuyajto (Pampa Amarilla), cuyos escurrimientos se dirigen hacia la principal zona de descarga, la Laguna Tuyajto. Finalmente, un tercer grupo está conformado por la cuenca Salar El Laco, que estaría semi-aislado, aunque podrían producirse flujos subterráneos por diferencia de densidad desde aquí hacia Pampa Colorada.

La mayor cota del agua subterránea en el área de estudio se encuentra en la cuenca Puntas Negras (~4.320 msnm). Los niveles piezométricos en su depresión son similares, mostrando una pendiente del orden de $2,5x10^{-4}$. Más al norte, el gradiente se incrementa, del mismo modo que la topografía del sector. En la transición de las cuencas Puntas Negras – Aguas Calientes 2, se verifica un gradiente cercano a $1,0x10^{-2}$, que disminuye hacia la zona de descarga.

En el sector sur, los mayores gradientes ocurren entre la cuenca Pampa Colorada y las cuencas Pampa Amarilla $(2,8x10^{-2})$ y Pampa Las Tecas $(1,6x10^{-2})$. Los menores gradientes ocurren en los sectores bajos de las cuencas (pampas). En este grupo de hoyas hidrográficas, el flujo subterráneo general queda definido por los aportes desde El Laco hacia las Pampas Las Tecas y Colorada, la que también aporta subterráneamente a Las Tecas y a la cuenca de Tuyajto (Pampa Amarilla). Finalmente, Laguna Tuyajto descarga subterráneamente hacia las cuencas Salar de Incahuasi y Salar de Aguas Calientes 3 (Figura 8.13).

En la Tabla 8.2 se presentan los gradientes calculados usando la información de los pozos que allí se indican.

Desde cuenca / zona	Hacia cuenca / zona	Pozos usados	Gradiente
Puntas Negras	Loma Amarilla	PNAR-3 – LAAR-1 PNAR-4 – LAAR- 1	1,04 x 10 ⁻²
Loma Amarilla	Laguna A. Calientes 2	LAAR-1 – ACN-1A	1,57 x 10-3
Pampa Colorada	Pampa Amarilla	PCDC-3 – PA-2	2,77 x 10-2
Pampa Colorada	Pampa Las Tecas	PCDC-3 - PT-3	1,56 x 10-2
Pampa Las Tecas	Pampa Amarilla	PT-3 - PA-2	6,49 x 10-3
Laguna Tuyajto	S. Aguas Calientes 3	LTJ-2A – PAAR-2	1,24 x 10-2
Laguna Tuyajto	S. Incahuasi (norte)	PAAR-1 – SIAR-1	9,47 x 10-3
Pampa Puntas Negras		Pozos pampa	2,63 x 10-4
Pampa Colorada		Pozos pampa	7,17 x 10-4
Pampa Las Tecas		Pozos pampa	7,54 x 10-4
Pampa Amarilla		Pozos pampa	2,30 x 10 ⁻³

Tabla 8.2: Gradientes calculados en y entre las cuencas de la zona de estudio.



Figura 8.13: Dirección flujos subterráneos en Sector Pampa Colorada de acuerdo a cotas y densidad.
8.3 Constantes Elásticas

Para caracterizar el acuífero se utilizan los conceptos de transmisividad y coeficiente de almacenamiento, que representan sus constantes elásticas. El primero de éstos es una medida de la cantidad de agua que puede ser transmitida horizontalmente por el acuífero a través de un ancho unitario, dentro del espesor saturado y con un gradiente también unitario. Este parámetro se calcula como el producto de la conductividad hidráulica (K) y el espesor saturado del acuífero (b):

 $T = K \cdot b$ (unidades L²/T)

En algunos casos también se utiliza únicamente la conductividad hidráulica (K, unidades L/T), que es una medida de la habilidad de un fluido para moverse a través de los espacios interconectados de los sedimentos o rocas. Ésta depende tanto del fluido como del medio.

Por otra parte, el coeficiente de almacenamiento (S, adimensional) representa el volumen de agua por unidad de superficie que un elemento permeable absorbe o libera de su almacenamiento cuando hay un cambio unitario en la carga hidráulica. Valores típicos de acuíferos libres varían en el orden de 0,02 a 0,30, mientras que los de acuíferos confinados suelen ser menores o iguales a 0,005 (Fetter, C. W., 2001).

Debido a la diversidad de información encontrada en los antecedentes, la caracterización de las propiedades hidráulicas se realizó en dos etapas:

- **1.** Analizando datos de pruebas de bombeo realizadas por EMSA durante la habilitación de 18 pozos, obtenida de los expedientes de los derechos solitados a la DGA.
- **2.** A partir de la recopilación de información de estudios realizados en la zona, en particular el EIA Pampa Colorada (WMC, 2006) y el informe del Proyecto Mundo (GeoAguas, 2007).

1. Análisis de pruebas de bombeo (DGA - PUC)

El análisis desarrollado por DGA – PUC (DIHA) corresponde a una revisión de los cálculos de parámetros hidráulicos realizado por Exploraciones Mundo S.A. (EMSA), al momento de la habilitación de los pozos.

En aquellos pozos en que no se consideraron apropiados los ajustes para la obtención de los parámetros hiráulicos, se analizaron las pruebas de bombeo de gasto constante y/o gasto variable disponibles, cuyos datos corresponden a: i) depresión observada en el pozo de

bombeo al extraer un caudal constante, y ii) depresiones máximas estabilizadas que provocan en la napa distintos caudales de extracción.

Para el primer caso se analizaron los datos de la prueba de bombeo de gasto constante en que la extracción de agua proviene exclusivamente del acuífero y no existe recarga. Para esto se utilizó el software AquiferTest v.4.2 mediante el cual se ajustaron los datos que permiten obtener los parámetros de interés, usando modelos propuestos según el tipo de acuífero.

Para el segundo caso, se analizaron las pruebas de gasto variable, estimando unicamente la transmisividad (de esta forma no es posible calcular el coeficiente de almacenamiento). Para estos efectos se utilizó la ecuación presentada a continuación (Groundwater and Wells, 2nd ed., p.1.021, 1986). En el ANEXO II se muestran los ajustes.

$$T\left[\frac{gpd}{ft}\right] = 1.500 \cdot \frac{Q[gpm]}{s[ft]},$$

o lo que es igual a:

$$T\left[\frac{m^2}{d}\right] = 1,042 \cdot \frac{Q[m^3/d]}{s[m]} \quad \text{y} \quad K\left[\frac{m}{d}\right] = \frac{T[m^2/d]}{L[m] - NE[m]}$$

donde:

- K: conductividad hidráulica del acuífero
- L: profundidad del pozo
- NE: nivel estático de la napa.
- Q: mayor caudal de la prueba de gasto variable
- s: depresión observada en el pozo para el mayor caudal de la prueba de gasto variable

A partir de esta información es posible concluir que:

• En Pampa Loma Amarilla, al sur del Salar de Aguas Calientes 2, los valores de conductividad hidráulica varían entre 0,1 y 1,2 m/d y los de transmisividad entre 15 y 110 m²/d. Esta zona es la que presenta menores valores de permeabilidad y transmisividad en el sector, lo que se verifica por el alto gradiente hidráulico y la gran diferencia de los niveles de la napa en la zona.

Con la información recopilada de pruebas de bombeo en estos pozos no fue posible estimar valores para el coeficiente de almacenamiento.

- En Pampa Puntas Negras se estimaron valores de permeabilidad que van de 0,1 a 3 m/d y transmisividades entre 20 y 440 m²/d. En esta zona se estimó valores para el coeficiente de almacenamiento, los que variaron entre 0,1% y 3%.
- En Pampa Colorada se registraron conductividades hidráulicas que van de 0,6 a 2,8 m/d y valores de transmisividad entre 65 y 315 m²/d; el bajo rango de permeabilidad se verifica con el alto gradiente hidráulica de la zona ($\sim 10^{-2}$).

Con la información recopilada de pruebas de bombeo en pozos del sector no fue posible estimar valores para el coeficiente de almacenamiento.

- En Pampa Amarilla, al noreste de la Laguna Tuyajto, es donde se presentan los mayores valores de permeabilidad en la zona de estudio, con valores que varían entre 2,5 y 4,5 m/d lo que verifica las pequeñas diferencia del nivel de la napa. La transmisividad se estimó entre 217 y 406 m²/d y el coeficiente de almacenamiento no fue posible determinarlo a partir de la información de pruebas de bombeo.
- En Pampa Las Tecas se registraron valores de conductividad hidráulica entre 1,5 y 3 m/d y transmisividades entre 100 y 320 m²/d. No se pudo determinar valores de coeficiente de almacenamiento a partir de las pruebas de bombeo en pozos de la zona.

En el ANEXO II se encuentra el detalle de las propiedades hidráulicas estimadas en cada pozo.

2. Datos reportados en información de antecedentes recopilados

EMSA construyó y realizó pruebas de bombeo a 22 pozos en el área de estudio (ver Figura 3.8), cuya duración varió entre 12 y 63 horas. Durante el programa desarrollado por MEL para la elaboración del EIA Pampa Colorada (WMC, 2006) no se construyeron nuevos pozos de bombeo, aunque sí punteras para el monitoreo de ensayos de bombeo de larga duración, realizados en las áreas que presentaban mayor potencial, con el fin de evaluar los posibles límites e interferencias en los acuíferos. Estas zonas consideran las cuencas Pampa Colorada, Las Tecas y Puntas Negras. Las conclusiones se detallan a continuación.

- Las pruebas de bombeo de gasto variable mostraron depresiones significativas para los caudales probados, indicio de un acuífero en roca fracturada con flujo turbulento alimentando los pozos.
- Durante el periodo de bombeo en las pruebas cortas (~3 días) no se observaron depresiones bruscas originadas por el alcance de barreras impermeables. El radio de

influencia de los pozos operando alcanzó los 850 m, lo que corrobora que las unidades hidrogeológicas presentan una continuidad y alta permeabilidad.

- En las pruebas de largo plazo en Pampa Colorada, Las Tecas y Puntas Negras, planteadas para operar durante 30 días con altos caudales (cercanos a 200 L/s por cuenca, aunque por algunas fallas se redujeron en ciertos casos), se confirmó una continuidad en los acuíferos, aunque sin afectar a las cuencas vecinas (ver Figura 3.11).
- La transmisividad promedio en las cuencas estudiadas varía de 1.360 a 7.750 m²/d, lo que refleja que los acuíferos tienen una alta permeabilidad, en particular los de Pampa Puntas Negras y Pampa Colorada.

Water Managment Consultants Ltda. (WMC) en el EIA Pampa Colorada (2006) presenta la caracterización hidrogeológica de las cuencas en estudio. En ésta reportan resultados de la interpretación de pruebas de bombeo, cuyos datos de base también fueron usados por GeoAguas Consultores para el Proyecto Mundo (2007). Sus interpretaciones se describen a continuación.

- En Pampa Puntas Negras, los valores de transmisividad varían entre 6.000 y 10.000 m²/d, encontrándose ocasionalmente algunos sectores con valores en torno a los 600 m²/d.
- En Pampa Loma Amarilla, al norte de Puntas Negras y sur del Salar del Aguas Calientes 2, se estimaron valores de transmisividad entre 500 y 1.500 m²/d, aunque se registraron pozos con valores menores a este rango (100 m²/d). La conductividad hidráulica en el sector norte de la cuenca varía entre 5 y 15 m/d. Los menores valores registrados en el sistema piloto fueron en Loma Amarilla.

El sector sur del sistema piloto se caracterizó de la siguiente forma:

- En Pampa Colorada los valores de conductividad hidráulica varían entre 14 y 59 m/d, con promedios en torno a los 40 m/d. Esto se verifica por el bajo gradiente natural registrado en al zona (~10⁻⁴). Los valores de conductividad hidráulica se traducen en altos valores de transmisividad, que van de 1.400 a 6.400 m²/d y promedios en torno a los 5.000 m²/d.
- En Pampa Las Tecas se encuentran conductividad hidráulica entre 7 y 37 m/d, con promedios en torno a los 18 m/d. Esto se verifica por el bajo gradiente natural registrado en al zona (~10⁻⁴). Estas permeabilidades determinan transmisividades que van de 795 a 3.160 m²/d, con un promedio cercano a los 1.550 m²/d.

- En Pampa Amarilla se presentan los menores valores de conductividad hidráulica del sector sur de las cuencas piloto, con valores que van de 9 a 16 m/d, que además determinan mayores valores de gradiente hidráulico (~10⁻³). Los valores de trasmisividad registrados en esta zona varían entre 849 y 1.080 m²/d.
- En las zonas entre cuencas se encuentran desniveles topográficos, que conectan los cerros del sector, los que se han llamado portezuelos. Dichos senos constituyen las zonas a través de las cuales las cuencas se conectan hidrogeológicamente.

La permeabilidad de estos sectores se evaluó como alta, debido a la influencia del control estructural en este parámetro y la presencia de distintos contactos de unidades geológicas.

El coeficiente de almacenamiento se obtuvo de la interpretación de los ensayos de bombeo, que en algunos casos no dispusieron de pozos de observación para caracterizarlo apropiadamente. A continuación se describe los valores recopilados de la revisión y análisis de los antecedentes.

- El valor de S determinado analíticamente para Puntas Negras varió en un rango de 0,2% a 6%, con los valores mayores ubicados en el centro de la cuenca (depresión), los que se reducen hacia los márgenes. Estos valores son típicos de acuífero libre a semiconfinado.
- En las cuencas del sector sur, los coeficientes de almacenamiento varían entre 0,0015% y 6,5%. En Pampa Colorada se registraron valores entre 0,0015% y 6,5% y en Pampa Las Tecas, entre 0,01% y 18%, valores que representan el comportamiento de un acuífero libre a semiconfinado. En Pampa Amarilla en tanto, los valores reportados variaron entre 0,025% y 0,04%, más característicos de un acuífero confinado.

En El Laco sólo se cuenta con una perforación, realizada para testear la conexión hidrogeológica con Pampa Colorada.

Se observa una alta discrepancia entre los valores estimados en el marco del presente Convenio DGA – PUC/DIHA y los propuestos por WMC (2006) y GeoAguas Consultores (2007), los que en la mayoría de los casos llega hasta uno e incluso dos órdenes de magnitud.

La información de la que se dispuso para el análisis en el presente estudio, correspondió a los datos de ensayos de bombeo con los que se obtuvieron derechos de aprovechamiento, disponibles en los expedientes de pozos en la zona de estudio.

8.4 Conexión con otras cuencas

De acuerdo a la información disponible, se ha planteado en los antecedentes revisados la conexión subterránea tanto entre las cuencas piloto como con sus aledañas. Las relaciones hidrogeológicas entre las cuencas de la Puna de Atacama estudiadas en este informe se dan en la forma de flujos regionales, originados por una continuidad en la litología y/o presencia de estructuras. Tanto los datos isotópicos y químicos, así como las diferencias de cotas sustantivas del agua subterránea avalan este hecho. La evidencia con que se cuenta permite separar, como se ha descrito ya en el apartado 8.2, el sistema piloto de esta Región y sus cuencas vecinas en 3 grupos:

- Grupo Norte, donde se encuentran las cuencas Salar de Aguas Calientes 2 (y su subcuenca Loma Amarilla), Laguna Lejía y Pampa Puntas Negras.
- Grupo Sur, que comprende las cuencas Laguna Tuyajto (y su subcuenca Pampa Amarilla) y las pampas Colorada y Las Tecas. Este segundo grupo está conectado con otra zona, conformada por las cuencas Salar de Aguas Calientes 3 y el sector norte de Incahuasi, a las que descarga.
- Al tercer grupo al que se hace referencia es la cuenca Salar de El Laco, que no presenta evidencias claras de conexión hidrogeológica con otras hoyas hidrográficas, salvo por gradientes de densidad de agua subterránea profunda. Estos flujos serían desde El Laco hacia Pampa Colorada y Las Tecas, lo que es evidenciado también por análisis isotópicos.

De manera general, se puede decir que las cuencas que no tienen laguna, salar, ni presencia de napas someras, y que reciben recarga al igual que las demás cuencas del sector, tienen una descarga que ocurre necesariamente a través de un flujo de agua subterránea. Este es el caso de las Pampas Puntas Negras, Colorada y Las Tecas, que tienen sus depresiones a mayor cota en relación al resto de las hoyas hidrográficas vecinas y cuyas napas son profundas.

Una aproximación de los flujos entre las cuencas de la zona de estudio, que sólo considera las diferencias de densidad de las aguas subterráneas debido a su contenido de sal, se muestra en la Figura 3.4, en la revisión de antecedentes.

Al considerar todas las evidencias para interpretar las conexiones del sistema piloto, los flujos inferidos entre cuencas de los Grupos Norte y Sur se dan de acuerdo a la descripción que se presenta a continuación. La Figura 8.14 muestra gráficamente estas conclusiones.

La estimación de los caudales de traspaso, cuando existía información o datos para estimarlos, se presenta en la secciones 8.5.2 y 8.6.2, donde se tratan las recargas y descargas hacia otras cuencas fuera del sistema piloto.

Grupo Norte

Considerando los datos piezométricos, se infiere un flujo desde Pampa Puntas Negras a Loma Amarilla (cuenca Salar de Aguas Calientes 2) y hacia el norte. Los antecedentes hidroquímicos e isotópicos sustentan la conexión que habría entre las (sub)cuencas. En particular, los datos indican que:

 Puntas Negras y Loma Amarilla presentan similitud en la química de las aguas muestreadas de sus pozos, del tipo cloruradas-sódicas, aunque con mayor concentración de magnesio en la primera y de calcio en la segunda. Los valores de pH y temperatura de las aguas subterráneas también son similares, en particular las del norte de Puntas Negras y las de los pozos al suroeste de Loma Amarilla.

La subcuenca Loma Amarilla está relacionada a su cuenca Aguas Calientes 2 (AC2) del mismo modo, por la similitud que existe entre las aguas de pozos de la primera pampa y las vertientes que afloran en la laguna de la segunda. Isotópicamente, las aguas de algunos pozos de Loma Amarilla se correlacionan altamente con los de Pampa Puntas Negras, siendo ésta su principal procedencia. Otras muestras arrojan evidencias de recarga local, que es similar a la que aflora en las vertientes de AC2, aunque ligeramente evaporadas.

- La conexión entre Puntas Negras y Aguas Calientes 2 se sustenta también en la similitud de elementos comunes y trazas entre pozos de la primera cuenca y vertientes de la segunda, en particular con las aguas de la vertiente sur. De los elementos analizados en este documento, el arsénico es el que presenta mayores semejanzas entre estas fuentes.
- La geofísica realizada entre ambas cuencas muestra que hay un basamento no definido, que podría superar los 400 m de profundidad. El flujo estaría pasando a través de una zona de menor permeabilidad o interpretada con la geofísica como un acuífero más profundo de agua salada escurriendo de sur a norte.
- Del mismo modo, hay una probable conexión subterránea entre Laguna Lejía y Aguas Calientes 2, dada la composición de dos afloramientos muestreados a ambos lados de la divisoria de aguas (Cordón Alto de Caballo Muerto). Sus composiciones son bicarbonatadas sódicas y difieren del común de las muestras analizadas en el resto de ambas cuencas.

460625 COPIA



Figura 8.14: Conexión entre cuencas del sistema piloto de la II Región.

En el EIA Pampa Colorada (WMC, 2006), se estimó un caudal pasante por una sección que pasa por el pozo LA-3, ubicado en Pampa Loma Amarilla (Figura 8.15), que representaría en cierta medida el caudal con que la cuenca Salar de Aguas Calientes 2 sería recargada desde la cuenca Puntas Negras. Al no estar en la transición de ambas cuencas, el perfil transversal también cuantifica aguas recargadas en la parte sureste de la cuenca Salar de Aguas Calientes 2.

Grupo Sur

Otro flujo de carácter regional se produce desde Pampa Colorada hacia Pampa Las Tecas y hacia Pampa Amarilla (cuenca Laguna Tuyajto), y desde Pampa Amarilla a las cuencas Salar de Incahuasi (al sur) y Salar de Aguas Calientes 3 (al oeste). Los flujos están apoyados por los datos TEM, que muestran continuidad en los estratos y niveles del agua subterránea.

En las zonas entre cuencas se encuentran desniveles topográficos, que conectan los cerros del sector, los que se han llamado portezuelos. Dichos senos constituyen las zonas a través de las cuales las cuencas se conectan hidrogeológicamente. La permeabilidad de estos sectores se evaluó como alta, debido a la influencia del control estructural y la presencia de distintos contactos de unidades geológicas.

En el caso de Tuyajto, su descarga a través de flujo subterráneo a las cuencas ubicadas al sur y oeste es apoyada por el pequeño tamaño de su laguna en relación al de la cuenca. En el caso de El Laco, hoya de similar extensión y características morfológicas, tiene una costra de sal más amplia, dentro de la que afloran lagunas que presentan mayores descargas por evaporación. Los antecedentes hidroquímicos de elementos menores y traza muestran que:

- El flujo desde Tuyajto hacia Aguas Calientes 3 se manifiesta en la ocurrencia de Se en las vertientes del sector sureste de esta última cuenca, además de otros componentes que se encuentran presentes en ambas lagunas. Del mismo modo, el agua de los pozos de Pampa Amarilla, en la cuenca de Tuyajto, y las de la Laguna Aguas Calientes 3 presentan similitudes en varios elementos.
- Las aguas subterráneas de Pampa Amarilla (cuenca Tuyajto) y las vegas del sector norte de Incahuasi tienen un número importante de elementos menores y trazas en común. Los datos isotópicos de muestras profundas de pozos en ambas cuencas avalan esta hipótesis, dada su similitud. Del mismo modo, aguas subterráneas de Pampa Amarilla tienen una alta similitud con las de Las Tecas y con las de Pampa Colorada.

460625 COPIA



Figura 8.15: Sección de paso del agua subterránea usada para determinar caudal en Loma Amarilla.

 Los datos isotópicos muestran la relación entre las aguas de Pampa Colorada y Pampa Las Tecas. Esta última recibe un aporte de recarga principalmente de tipo regional, con un aporte mínimo local. A niveles profundos de pozos de producción en Las Tecas, las muestras isotópicas indican que podría existir una conexión con Salar de El Laco, debido a gradientes de densidad (salinidad).

Los datos isotópicos muestran la presencia de un flujo subterráneo regional, detectado en casi todas las cuencas y de manera preferente en los pozos ubicados en los márgenes. Este agua se origina en una recarga a mayores alturas, que se han atribuido principalmente al cordón volcánico Puntas Negras.

No se han estimado los caudales pasantes desde la cuenca Pampa Colorada hacia las cuencas Pampa Las Tecas y Laguna Tuyajto. Sin embargo, sí se han estimado aquellos caudales entre Laguna Tuyajto y sus zonas de descarga en el Salar de Aguas Calientes 3 y el Salar de Incahuasi, los que son tratados en el apartado 8.6.2 donde se discute las descargas hacia otras cuencas.

Salar El Laco

Trabajos de geofísica realizados en el límite entre la cuenca Salar El Laco y las cuencas Pampa Colorada y Pampa Las Tecas (GeoAguas Consultores, 2007) indican que existe una continuidad en la napa, así como en el tipo de material en subsuperficie. Sin embargo, esta continuidad, coherente con la información de los pozos perforados a ambos lados de la ladera en la divisoria de aguas superficiales (Loma Negra), indica que también hay una divisoria de aguas subterráneas. De cualquier modo, las conductividades eléctricas en niveles más profundos de los pozos en ambas cuencas, debidas a la salinidad del agua subterránea, respaldan la idea del flujo regional por gradientes de densidad, el que tendría una dirección este – oeste. Esto se muestra en el perfil de la Figura 8.17, que corresponde al transecto en planta indicado en la Figura 8.16.

Los caudales del flujo regional mencionados en el párrafo anterior, no han sido cuantificados. Se ha documentado que esta cuenca conformaría un sistema cuasi-cerrado, debido a que las descargas que se producen por evaporación desde el salar serían equivalentes a los aportes de recarga recibidos por precipitación, dejando un margen pequeño al flujo subterráneo profundo.

460625 COPIA



Figura 8.16: Transecto longitudinal de lo mostrado en la sección transversal de la Figura 8.17, enseñando la conexión entre las cuencas Pampa Colorada y Salar El Laco.



Figura 8.17: Perfil que muestra la continuidad litológica y de la napa en la sección de cuencas Pampa Colorada y Salar El Laco.

271

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 envergadura 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, que no existe en las cuencas altiplánicas como tal. De igual forma, la recarga desde cursos superficiales también se considera menor respecto a la 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 las cuencas del sistema piloto de la II Región tiene como fuente principal los aportes de la precipitación que se produce en los conos volcánicos que las rodean y que están formados por rocas del Mioceno con una permeabilidad y almacenamiento asociados a su fracturamiento. Dichas zonas sólo constituyen 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 de estas cuencas. Debido al carácter endorreico de estas cuencas, la única descarga que normalmente 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 las cuencas hacia las zonas bajas.

A continuación se realiza una estimación de la recarga media anual a largo plazo, realizada por medio de balances de masa y de coeficientes de infiltración y escorrentía que ponderan las características hidráulicas de las unidades litológicas presentes en las cuencas analizadas. 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 8.18 presenta un esquema de los términos del balance hídrico que se realiza en cada unidad litológica, para la recarga directa y la lateral.

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 8.18: 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 8.18a):

$$PP \cdot A_{RD} = ET + Q + R_D.$$

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 8.18b). 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_1 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):

 $R_L = C_I \cdot C_E \cdot PP \cdot A_{RL}.$

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 8.3.

Tabla 8.3: 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, las cuencas del sistema piloto fueron divididas 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 6.34).

Las unidades litológicas al interior de la cuenca fueron obtenidas de la Carta Geológica de Chile: Hoja Río Zapaleri, escala 1:250.000 (Ramírez y Gardeweg, 1982), y Hoja Toconao, escala 1:250.000 (Gardeweg y Ramírez, 1985).

Además se realizó un trabajo de 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. En la Figura 8.19 se presenta la distribución espacial de las unidades litológicas de las cuencas piloto de la II Región junto con la permeabilidad cualitativa.

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 ubican en la I Región, al interior de la cuenca del Salar de Huasco. La distribución espacial de las unidades litológicas junto con la permeabilidad cualitativa para las subcuencas se presenta en el ANEXO IV. 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 8.4 y Tabla 8.5, respectivamente. Adicionalmente se compara con los resultados obtenidos en otros estudios. El detalle del calculo de la recarga en las subcuencas del Río Piga en Collacagua y Río Collacagua en Peñablanca se presenta en el ANEXO IV.

Fuente	Area	PP	Recarga Mínima		Recarga Media			Recarga Máxima			
_	(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 8.4: Comparación con otros estudios de la recarga anual de largo plazo en Río Piga en Collacagua.

460625 COPIA



Figura 8.19: Unidades litológicas y características hidráulicas presentes en las cuencas del sistema piloto de la II Región.

Fuente	Area	PP	Recarga Mínima		Recarga Media			Recarga Máxima			
_	(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

Tabla 8.5: Comparación con otros estudios de la recarga anual de largo plazo en Río Collacagua en Peñablanca.

Se observa que los valores de recarga en los diferentes estudios para las dos subcuencas de la I Región 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 en las cuencas piloto de la II Región 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 8.6. El detalle del cálculo de esta recarga en las 6 cuencas del sistema piloto de la II Región se presenta en el ANEXO V.

	Área	PP media	Mínima			Media			Máxima		
Cuenca	km ²	mm	mm	L/s	~ % PP	mm	L/s	% PP	mm	L/s	 % PP
Aguas Calientes 2	975	160	14,5	446,9	9,2	18,4	568,0	11,7	22,4	692,9	14,3
Salar El Laco	271	208	21,8	187,5	10,7	27,6	237,3	13,6	33,6	288,3	16,5
Laguna Tuyajto	249	212	15,9	125,4	7,9	20,3	160,1	10,0	24,9	196,2	12,3
Puntas Negras	201	205	16,9	107,5	8,4	21,4	136,7	10,6	26,2	166,9	13,0
Pampa Las Tecas	109	204	21,2	73,5	10,8	26,7	92,4	13,6	32,2	111,5	16,4
Pampa Colorada	58	200	24,2	44,5	12,3	30,5	56,2	15,6	37,0	68,0	18,8

Tabla 8.6: Recarga anual de largo plazo en las cuencas del sistema piloto de la II Región.

WMC (2006) (EIA Pampa Colorada) realizó una estimación de la recarga en el sector de las cuencas del Salar Aguas Calientes 2 y Laguna Tuyajto mediante distintos métodos como modelación hidrológica, estimaciones de descarga de aguas subterráneas y balances de masas de isótopos ambientales. Como resultado de este estudió se determinó que la probable recarga en la zona varía entre el 5% y 20% de la precipitación media anual. En esta misma línea, los resultados que se presentan en la Tabla 8.6 indican que la recarga en la cuencas piloto varía

entre 7,9% y 18,8% de la precipitación media anual, lo cual es similar a lo reportado por WMC (2006). Además, la recarga estimada por WMC (2006) al utilizar el modelo hidrológico HMS en el sistema formado por las cuencas de Pampa Colorada, Pampa La Tecas y Pampa Amarilla (Laguna Tuyajto) varía entre 175 y 375 L/s. Mientras que la recarga de este sistema calculada en el presente estudio varía entre 243 y 376 L/s, mostrando una buena concordancia con las estimaciones realizadas por WMC.

8.5.2 Recarga desde otras cuencas

Considerando lo discutido en el apartado 8.4 "Conexión con otras cuencas" (página 264), se ha reconocido un flujo subterráneo de carácter regional en la zona de estudio, que indica una continuidad hidrogeológica entre las cuencas piloto, en la que también participan algunas de las hoyas hidrográficas vecinas.

Al considerar el grupo de cuencas piloto como una sola unidad – sistema de intercambio abierto de agua subterránea, se han identificado unicamente salidas, que ocurren en el sector sur. Estas salidas corresponden a los aportes recibidos por la cuenca Laguna Tuyajto y que se descargan hacia las cuencas Salar de Aguas Calientes 3 (oeste) y Salar de Incahuasi (sur).

Otros sectores han sido menos estudiados, lo que dificulta reconocer entradas al sistema, en particular en el sector norte. Allí ha sido investigado en detalle hasta la Laguna Aguas Calientes 2, ubicada al sur del salar homónimo. El resto de la zona con mayor humedad en la cuenca, compartida entre una costra de sal y algunas lagunas y cursos superficiales, han sido estudiadas usando imágenes satélites, para medir la respuesta espectral de las superficies con el fin de dimensionar el área ocupada por cuerpos de agua y clasificarlas de acuerdo a un contenido de humedad cualitativo.

De este modo, se concluye que no se reconocen recargas externas al sistema. Las recargas entre las cuencas estudiadas se reconocen conceptualmente, y se han hecho algunas estimaciones sobre su magnitud, que fueron descritas en el apartado 8.4.

8.6 Descarga del Sistema

La descarga de las cuencas se produce en la forma de escurrimientos superficiales o subterráneos, así como 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.

Las cuencas estudiadas en el sistema piloto de la II Región corresponden a cuencas cerradas, por lo que no existen en forma natural descargas de tipo superficial y predominan las descargas por evapotranspiración desde salares, lagunas, vegas y bofedales.

En la actualidad no existen descargas debido a la explotación de los acuíferos en la zona de estudio, sin embargo, a la fecha se encuentran aprobados derechos de aprovechamiento subterráneo por más de 1.000 L/s y solicitudes pendientes por cerca de 400 L/s. En cuanto a derechos de extracción superficial, se han aprobado y se encuentran en ejercicio extracciones por 1,0 L/s, mientras que están en tramitación otros 86 L/s.

A continuación se tratan las descargas de las cuencas, a través de las distintas fuentes, que tienen como objetivo cuantificar las salidas del sistema para efecto de los balances hídricos. Los mecanismos de descarga reconocidos en las cuencas del sistema piloto de la II Región, se han descrito usando la información que se ha levantado a la fecha, la que se ha validado o reinterpretado.

8.6.1 Descarga 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.

De las 6 cuencas que componen el sistema piloto de la II Región, sólo se reconocen descargas por evaporación en las cuencas del Salar de Aguas Calientes 2, Laguna Tuyajto y Salar El Laco. Debido a la ausencia de napas freáticas someras, las hoyas de Puntas Negras, Pampa Las Tecas y Pampa Colorada no presentan evaporación desde los suelos ni desde superficies libres.

En el marco del estudio de evaluación de impacto ambiental "Suministro de Agua Pampa Colorada" (EIA Pampa Colorada, 2006), la empresa Minera Escondida Ltda. encomendó a Water Management Consultants (WMC) la realización de trabajos orientados a evaluar los impactos hidrológicos producto de la extracción de aguas subterráneas en el sector de Pampa Colorada. Como parte de dicho estudio, se realizó una detallada caracterización de las

superficies cubiertas por agua y humedales en las zonas de descarga (salares y lagunas). Dicha caracterización se llevo a cabo mediante el análisis de las siguientes imágenes satelitales Landsat:

- Escena estival: abril 2000 para el Salar de Aguas Calientes 2 y marzo 2002 para las cuencas de Tuyajto y El Laco.
- Escena invernal: agosto 2000 para el Salar de Aguas Calientes 2 y agosto 2002 para las cuencas de Tuyajto y El Laco.

Posteriormente, los resultados obtenidos se refinaron mediante la adquisición de imágenes de alta resolución Quickbird de mayo de 2006.

Las superficies determinadas por WMC concuerdan con estimaciones preliminares realizadas en el presente estudio para contrastar dicha información. De ahí, las áreas correspondientes a superficies de agua libre, vegas y bofedales en las zonas terminales de las cuencas, fueron adoptadas del estudio de referencia.

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.

El coeficiente de ajuste (K_T), se utiliza debido a que los tanques metálicos concentran calor y alteran las condiciones naturales de evaporación desde lagunas o cauces. Este factor depende principalmente de las condiciones ambientales en que se ubique el tanque y la vegetación que lo rodea. La DGA utiliza un coeficiente de tanque de 0,6 para tanques evaporímetros instalados en el Altiplano.

Los tanques evaporímetros usados son Clase A, del U. S. Weather Bureau, para los cuales el coeficiente de tanque empírico tomado por la DGA se adecua a las características climáticas y vegetacionales de la zona. De acuerdo a Shuttleworth (1993), el coeficiente utilizado para

áreas con humedad relativa baja (< 40%) y condiciones de viento moderado (2 - 5 m/s) se mueve en el rango de 0,45 – 0,7; donde 0,6 aparece como un valor apropiado.

Debido a la carencia de información histórica sobre evaporación desde superficies libres en la franja altiplánica de la II Región, ésta fue evaluada mediante los gradientes de evaporación determinados en la Parte III del presente estudio ("Hidrología Regional del Altiplano"). El análisis de los datos de tanques evaporímetros DGA, ubicados en las Regiones XV, I, II y III, fue presentado en el capítulo 6 de este documento (Caracterización Hidrológica), específicamente en la Figura 6.52.

Como se menciona en el párrafo anterior, las mediciones realizadas en la zona son escasas, y corresponden a los tanques evaporímetros operados por GeoAguas Consultores durante el periodo 2006-2007 y una estación meteorológica instalada por WMC el 2005 (estación El Laco), que no poseen más de un año de registro. Esta información aparece como insuficiente para establecer un segundo escenario de evaluación. Para definir un rango de evaporación, se consideró una variación del 10% respecto a las tasas determinadas con el gradiente regional.

Salar de Aguas Calientes 2

La zona de descarga de la cuenca se encuentra a una altura aproximada de 4.200 msnm, a la que corresponde una tasa de evaporación media de tanque de 5,43 mm/día, según la curva de evaporación regional (Figura 6.52). Al corregir por el factor de tanque se obtiene una tasa de evaporación desde superficies libres de 3,26 mm/día, con escenario máximo (+10%) y mínimo (-10%) de 3,58 y 2,93 mm/día, respectivamente. Según el análisis regional de evaporación efectuado por WMC (EIA Pampa Colorada, 2006) la tasa de evaporación en la zona baja de la cuenca es de 3,47 mm/día, valor que se encuentra dentro del rango propuesto.

El área reportada por WMC para superficies de agua en el Salar de Aguas Calientes 2 (AC2) fue de 5,62 km², de los cuales 3,95 km² corresponden al sector sur del salar. Otros cuerpos de agua donde ocurre evaporación son aquellos correspondientes a escurrimientos superficiales. No se identificaron cauces en la zona, a excepción de algunos canales de menor importancia ubicados dentro del salar, los que fueron agregados al área de superficies de agua mencionadas anteriormente.

La Tabla 8.7 muestra una comparación de las descargas estimadas por evaporación desde superficies libres entre el presente estudio y las propuestas por otros autores.

La estimación realizada por el Convenio DGA-UCN-IRD (Risacher et al., 1999) se basó en un área de lagunas de 9 km² y una evaporación potencial de 4,11 mm/día, lo que define un caudal de 428 L/s. La diferencia establecida con el escenario E1 es mayor al 100% y se explica

principalmente por una sobreestimación del área de lagunas. La descarga por evaporación propuesta por WMC (EIA Pampa Colorada, 2006) es un 25% mayor respecto del escenario E1+10% y un 38% mayor respecto del escenario base (E1). En su estimación WMC consideró una tasa de evaporación desde superficies libres de 4,5 mm/día, obtenida de la estación meteorológica El Laco y ecuaciones combinadas de Penman-Monteith.

Estudio	Área (km²)	Lagunas salar
DGA – PUC (DIHA), E1	5,62	211,9
DGA – PUC (DIHA), E1 -10%	5,62	190,7
DGA – PUC (DIHA), E1 +10%	5,62	233,0
DGA-UCN-IRD (Risacher et al., 1999)	9,00	428,1
WMC, EIA Pampa Colorada (2006)	5,62	292,6

Tabla 8.7: Evaporación desde superficies libres en cuenca Salar de AC2 (L/s)

Laguna Tuyajto

La zona de descarga de la cuenca se encuentra a una altura aproximada de 4.035 msnm, a la que corresponde una tasa de evaporación media de tanque de 5,85 mm/día, según la curva de evaporación regional (Figura 6.52). Al corregir por el factor de tanque se obtiene una tasa de evaporación desde superficies libres de 3,51 mm/día, con un escenario máximo (+10%) y mínimo (-10%) de 3,16 y 3,86 mm/día, respectivamente. Según el análisis regional de evaporación efectuado por WMC (EIA Pampa Colorada, 2006) la tasa de evaporación en la zona baja de la cuenca es de 3,7 mm/día, valor que se encuentra dentro del rango propuesto.

El área reportada por WMC para superficies de agua en la cuenca de Laguna Tuyajto fue de 2,39 km². Al igual que en Aguas Calientes 2, no se identificaron cauces en la zona, a excepción de algunos canales de menor importancia ubicados dentro del salar, los que fueron agregados al área de superficies de agua anteriormente descritas. Dichos canales conectan las vertientes que brotan en los márgenes norte y este de la laguna con este cuerpo de agua.

La Tabla 8.8 muestra una comparación de las descargas estimadas por evaporación desde superficies libres entre el presente estudio y las propuestas por otros autores.

GeoAguas Consultores (2007) estimó la evaporación desde superficies libres en 116 L/s, usando una evaporación medida en diciembre de 2006 (4,9 mm/día) y corregida por el cuociente entre este valor y el valor medio anual de largo plazo. El coeficiente resultante fue

de 0,84 y el área de lagunas de 2,42 km². Este resultado establece una diferencia del 33% con respecto al escenario E1.

Por su parte, la estimación realizada por el convenio DGA-UCN-IRD (Risacher et al., 1999), utilizando una tasa de evaporación de 4,11 mm/día, es un 29% superior a la presentada por escenario E1+10%. Al usar el mismo escenario para comparar con los resultados presentados por WMC (EIA Pampa Colorada, 2006), que utilizó una tasa de evaporación de 4,0 mm/día, se tiene un 4% superior.

Estudio	Área (km²)	Lagunas salar
DGA – PUC (DIHA), E1	2,39	87,4
DGA – PUC (DIHA), E1 –10%	2,39	97,1
DGA – PUC (DIHA), E1 +10%	2,39	106,8
GeoAguas Consultores (2007)*	2,42	116,0
DGA-UCN-IRD (Risacher et al., 1999)	2,90	137,9
WMC, EIA Pampa Colorada (2006)	2,39	110,7

Tabla 8.8: Evaporación desde superficies libres en cuenca Laguna Tuyajto (L/s)

* Evaporación correspondiente al mes de diciembre corregido por la evaporación media anual de largo plazo.

Salar El Laco

La zona de descarga de la cuenca del Salar El Laco se encuentra a una altura aproximada de 4.235 msnm, a la que corresponde una tasa de evaporación media de tanque de 5,34 mm/día, según la curva de evaporación regional (Figura 6.52). Al corregir por el factor de tanque se obtiene una tasa de evaporación desde superficies libres de 3,20 mm/día, con un escenario máximo (+10%) y mínimo (-10%) de 2,88 y 3,52 mm/día, respectivamente. El análisis regional de evaporación efectuado por WMC (EIA Pampa Colorada, 2006), asigna una tasa de evaporación de 3,41 mm/día, valor que se encuentra dentro del rango propuesto.

Las áreas de lagunas determinadas por WMC en base al análisis de imágenes Quickbird en el Salar de Aguas Calientes 2 y Laguna Tuyajto corresponden en forma muy aproximada (diferencias menores del 5%) a las áreas obtenidas considerando los índices de humedad medio y alto de las imágenes Landsat. Por lo tanto, el área cubierta por superficies de agua en el Salar El Laco, donde no se realizaron análisis de alta resolución, se determinó para efectos del presente estudio como la suma de las superficies definidas por ambos índices, lo que entrega un área de 1,60 km². No se identificaron cauces superficiales en la zona, a excepción

de algunos canales de menor importancia ubicados dentro del salar, los que fueron agregados al área de superficies de agua.

La Tabla 8.9 muestra una comparación de las descargas estimadas por evaporación desde superficies libres entre el presente estudio y las propuestas por otros autores.

El único antecedente directo de evaporación desde lagunas corresponde al estudio realizado por el convenio DGA-UCN-IRD (Risacher et al., 1999), donde se determina un flujo de 104,6 L/s, lo que equivale a una descarga un 75% mayor que la estimada en el escenario E1. Considerando el área de lagunas definida a través de las imágenes Landsat y las estimaciones realizadas mediante el análisis regional desarrollado por WMC, que hemos llamado escenario WE1, es posible calcular un flujo de evaporación de 63,2 L/s. Si se utiliza la tasa de evaporación obtenida mediante la estación meteorológica El Laco (~4,3 mm/día), el caudal resulta en 79,6 L/s (llamado escenario WE2).

Estudio	Área (km ²)	Lagunas salar
DGA – PUC (DIHA), E1	1,60	59,3
DGA – PUC (DIHA), E1 -10%	1,60	53,4
DGA – PUC (DIHA), E1 +10%	1,60	65,3
DGA-UCN-IRD (Risacher et al., 1999)	2,20	104,6
WMC, EIA Pampa Colorada (2006), WE1	1,60	63,2
WMC, EIA Pampa Colorada (2006), WE2	1,60	79,6

Tabla 8.9: Evaporación desde superficies libres en cuenca Salar El Laco (L/s).

8.6.1.2 Evaporación desde vegas y bofedales

En diversos sectores de las cuencas, 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 potencial en vegas y bofedales, se utilizaron los escenarios evaluados en el apartado anterior, donde la evaporación queda definida por el gradiente regional determinado en el capítulo 6 (Figura 6.52). Así, la tasa de evaporación de tanque en un cierto bofedal *i*, queda determinada por:

$$E_{T(i)} = \left(C_{(s)} - C_{(i)}\right) \cdot \frac{0.933}{365} + E_{T(s)}$$

Donde $E_{T(s)}$ es la evaporación de tanque sobre la superficie del salar obtenida con el gradiente de evaporación regional, $C_{(i)}$ representa la cota del bofedal *i* (msnm), $C_{(s)}$ corresponde a la cota del salar, 0,933 mm/año-metro es la tasa de cambio del gradiente regional de evaporación media anual 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), que 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 y luego la descrita en el párrafo precedente, donde se aplica el factor de corrección K_T . La cota asignada a cada sistema vegetal 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 periodo 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 (0,68), 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.

Salar de Aguas Calientes 2

El área cubierta por vegas y bofedales en la cuenca se determinó a través del trabajo con imágenes satelitales de Google Earth captadas entre febrero y mayo de 2006. La superficie total de vegetación determinada fue de $3,52 \text{ km}^2$, de los cuales 2,91 km² se ubican sobre el salar y 0,61 km² se encuentran en el resto de la cuenca.

El caudal de descarga por evapotranspiración desde vegas y bofedales se estimó en 74,5 L/s para los sistemas ubicados en el salar y en 15,5 L/s para los restantes, ambos considerando el escenario E1. Los flujos mínimos y máximos determinados al interior del salar fueron de 67,0 y 81,9 L/s. Ugarte (2007) evaluó las descargas por evaporación desde vegas y bofedales en la zona sur del salar, donde estimó un flujo de 128 L/s, con un área aportante de 5,6 km², superior a lo determinado por WMC (1,23 km²). Según la superficie de vegetación reportada por WMC, evaporación potencial de 4,5 mm/día y un coeficiente de corrección/reducción de 0,5 (fundamentado por la baja respuesta espectral de la vegetación), es posible proponer una evapotranspiración para la zona sur del salar de 32 L/s, valor que es un 75% menor que el propuesto por Ugarte. La Tabla 8.10 resume esta información.

Estudio	Área veg. salar (km²)	ETc salar (L/s)	Área veg. fuera salar (km²)	ETc fuera salar (L/s)
DGA – PUC (DIHA), E1	2,91	74,5	0,61	15,5
DGA – PUC (DIHA), E1 –10%	2,91	67,0	0,61	13,9
DGA – PUC (DIHA), E1 +10%	2,91	81,9	0,61	17,1
WMC, EIA Pampa Colorada (2006)	1,23	32,0	-	-
Ugarte (2007)	5,0	128,4	-	-

Tabla 8.10: Evaporación desde vegas y bofedales cuenca Salar de Aguas Calientes 2.

Laguna Tuyajto

La superficie total de vegetación determinada en la cuenca Laguna Tuyajto fue de 0,54 km², situándose íntegramente en la zona terminal. No se identificaron vegas y bofedales de importancia en el resto de la hoya hidrográfica.

El caudal de descarga por este concepto se estimó en 14,9 L/s para el primer escenario (E1), y en 13,4 L/s (E1-10%) y 16,4 L/s (E1+10%) para los rangos propuestos. Usando el mismo supuesto que en Aguas Calientes 2 propuesto por WMC (coeficiente de corrección/reducción de 0,5 fundamentado por la baja respuesta espectral de la vegetación), pero considerando un área de 0,5 km², es posible proponer un valor de evapotranspiración para la Laguna Tuyajto, según los datos recopilados por WMC (EIA Pampa Colorada, 2006), de 13 L/s. La Tabla 8.11 presenta un cuadro comparativo con las diversas estimaciones realizadas para esta cuenca. Se observa que la evapotranspiración calculada usando los datos de WMC es del mismo orden de magnitud que la resultante en el escenario E1.

Estudio	Área veg. salar (km²)	ETc salar (L/s)
DGA – PUC (DIHA), E1	0,54	14,9
DGA – PUC (DIHA), E1 –10%	0,54	13,4
DGA – PUC (DIHA), E1 +10%	0,54	16,4
WMC, EIA-Pampa Colorada (2006)	1,29	13,8

Tabla 8.11: Evaporación desde vegas y bofedales cuenca Laguna Tuyajto.

Salar El Laco

La cuenca Salar El Laco posee escasas zonas cubiertas con vegetación del tipo vegas y bofedales, sólo en los márgenes norte y este del salar se presentan algunos sistemas aislados, los que en su conjunto no abarcan más de 0,04 km². Igualmente se han cuantificado los caudales de descarga y se describen sus cuantías a continuación.

Los caudales de descarga para los escenarios evaluados fueron inferiores a 1,0 L/s. La Tabla 8.12 presenta el detalle de los resultados obtenidos. No se cuenta con estimaciones de evapotranspiración en la cuenca efectuadas por otros autores.

Tabla 8.12: Evaporación desde vegas y bofedales cuenca Salar El Laco.

Estudio	Área veg. salar (km²)	ETc salar (L/s)		
DGA – PUC (DIHA), E1	0,034	0,86		
DGA – PUC (DIHA), E1 –10%	0,034	0,77		
DGA – PUC (DIHA), E1 +10%	0,034	0,94		

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 las cuencas del Salar de Aguas Calientes 2, Laguna Tuyajto y Salar El Laco, se construyó una curva regional 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").

La Figura 8.20 presenta un esquema con la ubicación de las zonas de medición y los lugares específicos en cada una. Los círculos de color azul representan puntos donde se midió evaporación superficial, lo que se hizo con estanques plásticos de dimensiones conocidas. Se muestran además, las profundidades del nivel freático asociadas a cada punto, las que oscilan en un rango entre 0,19 y 1,65 m.

Por su parte, la Figura 8.21 muestra la curva de ajuste obtenida para la Región de Antofagasta, donde se observa una buena representación de los datos de terreno. Los valores son presentados como tasas diarias de evaporación desde los suelos, las que fueron normalizadas (divididas) con de las tasas de evaporación desde superficies libres obtenidas durante el mismo periodo de medición.

Las relaciones analíticas que describen la curva propuesta son:

$$E_N = e^{-6.01 \cdot z}$$
 $z < 0.34$
 $E_N = 0.047 \cdot z^{-0.919}$ $z > 0.34$

Donde E_N representa la tasa de evaporación normalizada (sin unidades) y z la profundidad del nivel freático asociado a dicha tasa (m).

El caudal evaporado fue determinado mediante la relación:

$$Q = 11,574 \cdot \sum_{i} A_i \cdot E_i$$

Donde:

- Q es el caudal evaporado desde el suelo (L/s).
- *E_i* es la evaporación (mm/día) para una cierta profundidad (*i*).
- *A_i* corresponde al área (km²) representativa de dicha profundidad (*i*).
- 11,574 es una constante de conversión de unidades.



Figura 8.20: Zonas de medición de evaporación cuencas piloto Región de Antofagasta.



Figura 8.21: Curva evaporación-profundidad de la napa ajustada en la Región de Antofagasta.

Salar de Aguas Calientes 2

Utilizando la curva regional propuesta (Figura 8.21), se estimó la descarga por evaporación en la cuenca Salar de Aguas Calientes 2, para la cual se contó con información de profundidad de la napa en 46 punteras construidas el año 2006 (Ugarte, 2007). Este conjunto de punteras se encuentra restringido al borde sur del salar, específicamente en las cercanías de lagunas y afloramientos. Debido a esto, se considera que la información disponible no es representativa de la situación promedio del salar en toda su extensión.

Luego, para determinar la descarga por evaporación, el salar fue sectorizado en 9 zonas a las que se les asignó una profundidad de saturación única en base a la clasificación del contenido de humedad realizada por WMC (EIA Pampa Colorada, 2006) y a la información directa proporcionada por las punteras. En la Figura 8.22 se muestra la división establecida, la ubicación de las punteras y la gradación del contenido de humedad en el salar, donde el color azul indica un alto porcentaje de humedad, que grada a celeste y finalmente a negro. En la Figura 8.22 (derecha) se presenta también la caracterización de zonas cubiertas por superficies libres adoptada en el presente estudio, donde se observa que gran parte de las punteras instaladas en la Zona 7 (Z7) se ubican próximas a la Laguna Aguas Calientes 2, por lo que pueden subestimar la profundidad real de las napas freáticas en el salar. Las áreas cubiertas por lagunas y cauces, incorporadas en el estudio de evaporación desde superficies libres, no son consideradas en la evaluación de la evaporación desde los suelos.

Considerando las punteras presentes en Z7, se tiene una profundidad del nivel freático promedio de 0,35 m. Realizando el mismo ejercicio en las zonas Z8 y Z9, se obtienen profundidades medias de 0,4 y 0,6 m, respectivamente. Estas profundidades fueron consideradas representativas de la situación media de cada zona.

Las zonas Z5 y Z6 presentan los suelos de menor contenido de humedad, por lo que se les asignó una profundidad de saturación de 1,45 m, equivalente al registro de mayor profundidad, correspondiente a la puntera AC-SW PZ-17.

Las zonas Z1 y Z4 fueron correlacionadas con la profundidad media de las punteras instaladas en la Zona 9, es decir, 0,6 m.

Finalmente, a las zonas Z2 y Z3 se les asignó una profundidad de saturación característica de 0,5 m, equivalente al promedio de las zonas Z8 y Z9.



Figura 8.22: Zonas de isoprofundidad de saturación en el Salar de Aguas Calientes 2. Izquierda: división en zonas para asignar niveles promedio de profundidad del nivel saturado en base a la gradación de respuesta a la humedad (negro: nivel más profundo \rightarrow azul: nivel más somero), calibrado con niveles de punteras en el presente estudio. Derecha: en azul y celeste cuerpos de agua dentro del salar utilizados para estimar descarga desde superficies libres.

La Tabla 8.13 presenta los caudales de descarga asociados a cada zona de evaporación. El escenario E1 define las condiciones medias; escenario E2 corresponde a una disminución del 20% en la profundidad de saturación asignada, y el escenario E3 representa un aumento del 20% de la misma.

Ugarte (2007) evaluó las descargas por evaporación desde los suelos en la zona sur del Salar de Aguas Calientes 2 (Zonas Z7, Z8 y Z9), obteniendo un caudal de 213 L/s. De los 319 L/s estimados en el estudio actual, 136 L/s corresponden a flujos generados en la zona evaluada por Ugarte, representando una diferencia de 36% con respecto a lo planteado por este autor.

En el proceso de calibración del modelo Modflow realizado por WMC (EIA Pampa Colorada, 2006) en la cuenca Salar de Aguas Calientes 2, se determinó una descarga desde los suelos de 188 L/s, lo que equivale a un 40% menos que el valor estimado en el presente estudio.

Zona	Área	Prof.	Evap. E1	Descarga E1	Evap. E2	Descarga E2	Evap. E3	Descarga E3
Lona	(km ²)	(m)	(mm/día)	(L/s)	(mm/día)	(L/s)	(mm/día)	(L/s)
Z1	4,84	0,60	0,24	13,7	0,30	16,9	0,21	11,6
Z2	18,77	0,50	0,29	62,9	0,36	77,2	0,24	53,2
Z3	0,71	0,50	0,29	2,4	0,36	2,9	0,24	2,0
Z4	18,67	0,60	0,24	52,9	0,30	65,0	0,21	44,8
Z5	29,94	1,45	0,11	37,7	0,13	46,3	0,09	31,9
Z6	10,51	1,45	0,11	13,2	0,13	16,2	0,09	11,2
Z7	5,07	0,35	0,40	23,6	0,49	28,9	0,34	19,9
Z8	15,37	0,40	0,36	63,2	0,44	77,6	0,30	53,5
Z9	17,27	0,60	0,24	49,0	0,30	60,1	0,21	41,4
Total	121,15			318,6		391,1		269,5

Tabla 8.13: Descargas por evaporación desde suelos en cuenca Salar de Aguas Calientes 2.

Laguna Tuyajto

Utilizando la curva de evaporación propuesta (Figura 8.21), se estimó la descarga por concepto de evaporación desde napas someras en la cuenca Laguna Tuyajto. Para estos efectos se discretizó la superficie de la laguna y el salar, determinando el área representativa de diferentes profundidades del nivel freático. Esto se efectuó usando la información de profundidad de saturación de 112 calicatas en los márgenes de la laguna (GeoAguas Consultores, 2007). Los datos fueron interpolados para generar curvas de isoprofundidad del nivel saturado, que van en el rango de 0,1 a 2,0 m, abarcando una superficie total (descontadas áreas de lagunas, vegas y bofedales) de 4,56 km². Los datos de las calicatas utilizadas para estos efectos se presentan en el ANEXO I.

La superficie en cada tramo de profundidad de la napa se muestra en la Figura 8.23. A modo de comparación, se ha incluido la superficie correspondiente a lagunas (profundidad 0,0 m). Se observa que las lagunas representan más del 30% de la zona de descarga, mientras que el 50% del área total (sin incluir lagunas ni zonas con vegetación) tiene napas en el tramo 0,0 - 0,1 m bajo el nivel de terreno.

En la Tabla 8.14 se presentan los flujos de descarga por evaporación estimados para las distintas bandas de profundidad y escenarios analizados. Como se observa, las descargas totales desde napas freáticas alcanzan los 70,2 L/s para el escenario E1; 63,2 L/s para el escenario E1-10% y 77,2 L/s para el escenario E1+10%.

GeoAguas Consultores (2007) estimó evaporación desde napas someras considerando una zona plana de 2,1 km², definida por niveles de napa superficiales y franjas periféricas de profundidad variable de 1,2 km². Sus evaluaciones fueron representativas del mes de diciembre y arrojaron un valor de 169 L/s, superando en 2,5 veces el valor propuesto en el escenario E1.

Por su parte, WMC construyó y evaluó un modelo de simulación numérica (Modflow) en la cuenca, estimando una evaporación desde suelos de 74 L/s, que representa un 7% más de lo expuesto el escenario E1.

La Figura 8.24 presenta las curvas de isoprofundidad trazadas en la cuenca de la Laguna Tuyajto.



Figura 8.23: Áreas por bandas de isoprofundidad Laguna Tuyajto.

Salar El Laco

Sólo se dispone de datos de nivel de las aguas subterráneas en 4 puntos al oeste del Salar El Laco (Tabla 8.15), que fue obtenida en la campaña de medición de evaporación efectuada con el domo en la II Región (Parte VII del presente estudio).
Prof		Á maa		E1	E2		E3	
Banda	1101.	Alta	Evap.	Descarga	Evap.	Descarga	Evap.	Descarga
	(m)	(km ²)	(mm/d)	(L/s)	(mm/d)	(L/s)	(mm/d)	(L/s)
0,0-0,1	0,05	1,87	2,599	56,221	2,339	50,599	2,859	61,843
0,1-0,2	0,15	0,42	1,425	6,995	1,282	6,296	1,567	7,695
0,2-0,3	0,25	0,22	0,781	2,029	0,703	1,826	0,859	2,232
0,3-0,4	0,35	0,25	0,428	1,219	0,385	1,097	0,471	1,341
0,4-0,5	0,45	0,14	0,344	0,557	0,309	0,501	0,378	0,612
0,5-0,6	0,55	0,19	0,286	0,641	0,257	0,576	0,314	0,705
0,6-0,7	0,65	0,14	0,245	0,399	0,221	0,359	0,270	0,439
0,7-0,8	0,75	0,13	0,215	0,314	0,193	0,283	0,236	0,346
0,8-0,9	0,85	0,12	0,192	0,255	0,172	0,230	0,211	0,281
0,9-1,0	0,95	0,10	0,173	0,209	0,156	0,188	0,190	0,230
1,0-1,5	1,25	0,53	0,134	0,817	0,121	0,735	0,148	0,899
1,5-2,0	1,75	0,45	0,099	0,514	0,089	0,463	0,109	0,565
Total		4,56		70,171		63,154		77,188

Tabla 8.14: Descargas por evaporación desde suelos en cuenca Laguna Tuyajto.

Tabla 8.15: Profundidad de saturación Salar El Laco.

Dunto	Coordena	adas UTM	Altitud	Prof.
1 unto	Este (m)	Norte (m)	(msnm)	(m)
L1D1	660.387	7.361.648	4.283	0,54
L2D2	660.336	7.361.626	4.277	0,39
L3D1	660.360	7.361.562	4.271	1,36
L4D2	660.364	7.361.582	4.267	0,61

Ninguno de los puntos de la Tabla 8.15 cae dentro del área del salar, luego la carencia de información imposibilita la construcción de un mapa de isolíneas de profundidad de la napa y por consiguiente la clasificación de los suelos del salar según bandas de isoprofundidad del nivel saturado.

Con el fin de establecer valores referenciales de evaporación en el área ocupada por la costra de sal, se han definido tres posibles escenarios para la profundidad media de la napa. El primero considera una profundidad del nivel saturado de 1,0 m y los otros dos se definen como ese valor $\pm 0,2$ m. En los tres casos planteados se considera una profundidad de saturación constante sobre toda la superficie del salar.

La evaporación desde superficies libres adoptada fue de 3,2 mm/día, equivalente al escenario E1 del apartado "evaporación desde cuerpos de agua libre". Las tasas de evaporación para las tres profundidades evaluadas, así como las diferencias porcentuales de descarga respecto del escenario medio, se presentan en la Tabla 8.16. Es importante señalar que los resultados obtenidos son de carácter referencial, debiéndose realizar labores de campo orientadas a caracterizar las profundidades del nivel freático con el fin de mejorar la precisión de las estimaciones propuestas.



Figura 8.24. Curvas de isoprofundidad de la napa en la Laguna Tuyajto.

No se dispone de estimaciones previas de evaporación desde los suelos para la cuenca del Salar El Laco.

Escenario	Prof. napa (m)	Área (km²)	Evaporación (mm/d)	Descarga (L/s)	% Respecto al Escenario base
1	0,8	134,4	0,185	287,6	-19%
2	1,0	134,4	0,151	234,2	0%
3	1,2	134,4	0,127	198,1	15%

Tabla 8.16: Descargas por evaporación desde suelos en cuenca Salar El Laco.

8.6.1.4 Resumen de las descargas por evaporación

Al determinar las descargas de un sistema debe tenerse en consideración el volumen de control sobre el cual se trabajó (salar, acuífero, cuenca superficial). En la Tabla 8.17 se resumen los resultados de evaporación obtenidos en la cuenca del Salar de Aguas Calientes 2, diferenciando las descargas producidas en la zona del salar y las que se presentan en el resto de la cuenca.

WMC (EIA Pampa Colorada, 2006), mediante la modelación hidrogeológica numérica de la cuenca, estimó el flujo de descarga por evaporación desde el salar en 685 L/s, valor que se encuentra dentro del rango propuesto, con una diferencia menor al 10% respecto al valor medio estimado (632 L/s).

Sector	Área (km²)	Caudal (L/s)
Salar		
Lagunas	5,6	190,7 - 233,0
Vegas y Bofedales	2,9	67,0-81,9
Suelo	121,1	269,5 - 391,1
Total salar		527,2-706,0
Resto cuenca		
Vegas y bofedales	0,61	13,9 – 17,1
Total cuenca		541,1 - 723,1

Tabla 8.17: Descargas por evaporación Salar de Aguas Calientes 2.

En la Tabla 8.18 se resumen los resultados de evaporación obtenidos en la cuenca Laguna Tuyajto. Como se observa, no se existen descargas por evaporación de importancia en las afueras del salar. Las descargas estimadas presentan un valor medio de 187 L/s con máximos y mínimos de 173,7 y 200,4 L/s respectivamente.

Sin considerar la evaporación desde sistemas vegetacionales, GeoAguas Consultores (2007) propone una descarga media anual de 257 L/s, un 28% mayor que el caudal máximo estimado en el presente estudio. Por su parte, WMC evaluó las descargas por evaporación en 199 L/s, valor coincidente con el máximo propuesto.

Sector	Área (km²)	Caudal (L/s)		
Salar				
Lagunas	2,39	97,1 – 106,8		
Vegas y bofedales	0,54	13,4 – 16,4		
Suelo	4,56	63,2 - 77,2		
Total salar		173,7 – 200,4		
Resto cuenca				
Vegas y bofedales	-	-		
Total cuenca		173,7 – 200,4		

Tabla 8.18: Descargas por evaporación Laguna Tuyajto.

Las descargas por evaporación en el Salar El Laco están comprendidas entre los 305 y 485 L/s, con un valor medio de 395 L/s (Tabla 8.19). No se cuenta con estudios referenciales que contengan información de descargas a nivel de cuenca ni de salar, sin embargo, al comparar los resultados obtenidos en la cuenca con las descargas estimadas en la hoya Laguna Tuyajto, ambas ubicadas en la misma zona del Altiplano y con superficies similares, se aprecia una diferencia notable, que podrían ser explicados por los caudales subterráneos afluentes y efluentes de estas unidades.

Sector	Área	Caudal
	(\mathbf{km}^2)	(L /s)
Salar		
Lagunas	1,6	53,4 - 65,3
Vegas y bofedales	0,03	0,77 - 0,94
Suelo	134,4	198,1 – 287,6
Total salar		252,3 - 353,8
Resto cuenca		
Vegas y bofedales	-	-
Total cuenca		252,3 - 353,8

Tabla 8.19: Descargas por evaporación Salar El Laco.

8.6.2 Descargas hacia otras cuencas

En los antecedentes revisados se ha descrito la descarga subterránea desde la cuenca Laguna Tuyajto a las cuencas Salar de Aguas Calientes 3 – Talar (al oeste) y Salar de Incahuasi (al sur), donde se concluyen caudales entre 25 y 50 L/s hacia el oeste y entre 40 y 80 L/s al sur. El resumen y los datos usados para estos efectos se presentan en la Tabla 8.20.

Tabla 8.20: Datos utilizados por WMC en el EIA Pampa Colorada (2006) para estimar el flujo desde cuenca Laguna Tuyajto a sus vecinas.

Entre L. Tuyajto y cuenca	Gradiente	Transmisividad (m²/d)	Ancho sección (m)	Caudal (L/s)
S. Aguas Calientes 3	1,7 E-2	250 - 500	500	25 - 50
S. de Incahuasi	9,2 E-3	250 - 500	1.500	40 - 80

En otra aproximación, GeoAguas Consultores (2007) considera una ecuación de flujo no lineal para estimar la descarga hacia otras cuencas, tomando en cuenta condiciones de escurrimiento no laminar a través del acuífero. Esta aproximación fue descrita en la revisión de antecedentes (página 26), y sus resultados se resumen en la Tabla 8.21.

Tabla 8.21: Datos utilizados por GeoAguas Consultores en el Proyecto Mundo (2007) para estimar el flujo desde cuenca Laguna Tuyajto a sus vecinas.

Entre Tuyajto y cuenca	Gradiente Promedio	Ancho sección (m)	T-turbulento (m ² /d)	T-darciano (m²/d)	Caudal (L/s)
S. de A. Calientes 3	0,0203	3.000	169	975	482
Salar de Incahuasi	0,0066	2.500	169	975	152

El supuesto usado por GeoAguas Consultores para la estimación del ancho de la sección, consideró que éste era igual a la mediana del trapecio formado tomando como bases el nivel de la napa y un basamento supuesto, no identificado en la geofísica. Los lados del trapecio corresponden a la extensión de las laderas impermeables de los cerros que definen las divisorias de aguas entre las cuencas (Figura 8.25).

En el caso adoptado por GeoAguas Consultores (2007), el nivel de terreno se ubicaba a unos 4.100 msnm en la parte más baja del portezuelo hacia Aguas Calientes 3, y la geofísica muestra información hasta los 3.700 - 3.600 msnm, es decir, una profundidad que varía entre 300 y 400 m. El basamento, no detectado por los TEM, se asumió a 3.500 msnm. De acuerdo a la metodología utilizada y el material bajo la superficie del terreno en que se realizaron los sondajes, es razonable considerar confiable la información hasta unos 300 - 350 m de

profundidad. El basamento supuesto supera en 100 m el nivel más profundo reportado por la geofísica para la sección tratada (Laguna Tuyajto – Salar de Aguas Calientes 3), lo que se considera poco conservador. La estimación de la profundidad del basamento ciertamente condiciona la longitud de la mediana del trapecio, luego también los caudales que estarían atravesando estos portezuelos.



Figura 8.25: Esquema adoptado por GeoAguas Consultores (2007) para determinar el ancho de la sección de paso del agua subterránea para la descarga desde Tuyajto a sus vecinas.

Haciendo una revisión de la información presentada en los antecedentes, referente a lo descrito en el párrafo anterior, se considera razonable plantear un rango de caudales distinto basado en los análisis del presente estudio. La evaluación se realizó considerando ambos tipos de flujo, lineal y no lineal, para contar con una comparación que permitiera aproximarse al problema bajo las dos perspectivas. Los datos utilizados para los cálculos se presentan en la Tabla 8.22.

Los gradientes hidráulicos estimados corresponden a los presentados en la Tabla 8.2 (página 257), en el apartado que trata la piezometría de los acuíferos. El ancho de las secciones de paso hacia las cuencas en que descarga Laguna Tuyajto fue interpretado de los datos geofísicos (TEM) de las secciones reportadas por las dos referencias principales de la zona de estudio. Estas referencias son el EIA Pampa Colorada (WMC, 2006) y el Proyecto Mundo (GeoAguas Consultores, 2007). Por su parte, los valores adoptados para las transmisividades, tanto para el flujo no lineal (T-turbulento y T-darciano) como para la aproximación de flujo

lineal (T-lineal), fueron adoptados de los mismos estudios de referencia, considerándose apropiados y conservadores.

Entre Tuyajto y cuenca	Gradiente	Ancho sección (m)	T-turbulento (m²/d)	T-darciano (m²/d)	T-lineal (m²/d)
S. de A. Calientes 3	0,0124	500 - 1.500	169	975	250 - 500
Salar de Incahuasi	0,00947	1.000 - 2.500	169	975	250 - 500

Tabla 8.22: Datos utilizados en el presente estudio para estimar el flujo subterráneo desde la cuenca Laguna Tuyajto a sus vecinas.

Finalmente, el caudal que cruza estas secciones de paso se presenta en la Tabla 8.23, donde se reportan los valores mínimos y máximos estimados. Se aprecia que el enfoque no lineal entrega caudales mayores, en que la diferencia es particularmente notoria al obervar los mínimos (unas 3 veces los del enfoque lineal). Se considera razonable para efecto de los balances posteriores, asumir un caudal de descarga entre 30 y 70 L/s hacia el Salar de Aguas Calientes 3 y entre 60 y 100 L/s hacia el Salar de Incahuasi.

Tabla 8.23: Estimaciones del flujo subterráneo desde la cuenca Laguna Tuyajto a sus vecinas usando los enfoques de flujo lineal y no lineal propuesto en los antecedentes.

Desde Tuyajto hacia	Salar de Agu	as Calientes 3	Salar de Incahuasi	
Enfoque	Lineal	No Lineal	Lineal	No Lineal
Caudal mínimo (L/s)	18	53	27	85
Caudal máximo (L/s)	107	159	137	213
Caudal adoptado (L/s)	30 - 70		60 - 100	

8.6.3 Descarga a través de vertientes naturales

Los principales aportes superficiales permanentes a las lagunas Tuyajto y Salar de Aguas Calientes 2 ocurren mediante canales que son alimentados por surgencias puntuales (vertientes), ubicadas en las zonas superiores de descarga, y también difusas a lo largo de los canales. Estas descargas son difíciles de cuantificar debido a la vegetación, forma en que se producen (en particular las difusas), baja pendiente, condiciones de viento, evaporación y ciclos de congelamiento – descongelamiento.

Aún así, de las mediciones realizadas en el marco del EIA presentado por Minera Escondida Ltda. (WMC, EIA Pampa Colorada, 2006), se ha determinado que no ocurren aportes difusos relevantes o significativos durante los meses de verano y otoño. Los aportes permanentes a las lagunas fueron relativamente constantes durante el periodo de monitoreo y se pueden relacionar con la descarga de los acuíferos principales del área. A pesar de contar con estas conclusiones planteadas por MEL, se requiere realizar un monitoreo continuo por un periodo de tiempo más largo, que permita contar con una estadística que lo respalde.

En el estudio hecho a las vertientes que alimentan la Laguna Tuyajto se incluyó la instalación de estaciones de aforo, además de análisis del tamaño de la laguna mediante imágenes satelitales en el periodo 1985 – 2006. El afloramiento de la vertiente que alimenta el humedal Tuyajto norte se encuentra a una cota entre 4 y 5 metros por sobre la cota de la laguna. En la Figura 8.26 se muestra la ubicación de los instrumentos instalados. A continuación se resume la información reportada en los distintos sectores analizados:

- Zona de descarga difusa norte y este: estas zonas se inspeccionaron entre los meses de diciembre de 2006 y junio de 2007, durante el cual se observó que las descargas eran prácticamente nulas. Varios canales secos fueron avistados, que podrían activarse durante periodos de precipitación o deshielos. La zona difusa de descarga norte presenta algunos aportes menores estimados entre 5 y 8 L/s.
- Zona de descarga noreste: el caudal del Canal N (Figura 8.26) está compuesto por el aporte de surgencias termales ubicadas al noreste de la Laguna Tuyajto (30 33° C) y por aportes difusos a lo largo de todo trayecto del canal. Los caudales medidos fluctuaron entre 20 y 70 L/s, aproximadamente. Las variaciones diarias son importantes, alcanzando valores de 40 L/s producto de factores climáticos como viento y evaporación.

460625 COPIA



Fuente: [WMC, EIA Pampa Colorada, 2006]

Figura 8.26: Zonas de aporte superficial y puntos de medición de caudal, niveles y precipitación en Laguna Tuyajto.

Zona de descarga sureste: La zona de descarga sureste se compone de cuatro vertientes ubicadas en la zona superior, que se canalizan en un único canal que entra a la laguna por el sureste. Adicionalmente, existen descargas difusas a lo largo del canal. Las mediciones en el canal sur de Tuyajto (Canal S en Figura 8.26) entre diciembre de 2006 y febrero de 2007 se encontraron entre 36 y 50 L/s. A partir de marzo se produjo un aumento en la variación, que se registró entre 36 y 75 L/s.

Zona	Qprom (*) Sep-Nov (L/s)	Qprom (**) Dic-Mar (L/s)	Qprom (**) Mar-Jun (L/s)
Descarga difusa norte	SD	7	7
Descarga noreste	40	30	35
Descarga sureste	60	44	58
Descarga difusa sur	SD	0	0
Caudal promedio	100	81	100

Tabla 8.24: Resumen de caudales promedio aportantes a Laguna Tuyajto

(*): Mediciones manuales en canal

(**): Mediciones manuales y continuas en estación de aforo

SD: Sin datos

Fuente: [WMC, EIA Pampa Colorada, 2006]

El área promedio de la laguna Tuyajto para el periodo 1985 – 2006, analizada con imágenes satelitales, fue de 2,1 km², con un mínimo de 1,7 km² y un máximo de 2,6 km². La superficie de la laguna es consistente con los años lluviosos o secos registrados en las estaciones Socaire y El Tatio, usadas como referencia. De acuerdo al máximo tamaño reportado y la dependencia de éste con los escurrimientos superficiales alimentados por las precipitaciones, se estima de manera preliminar y considerando los supuestos hechos (extrapolación información estaciones, mediciones no continuas del área de lagunas, precipitaciones locales del tipo pluvial o nival), que los aportes podrían aumentar en un 25% respecto de la situación medida.

En el ANEXO VI se presenta una tabla con las coordenadas de las estaciones de aforo y el periodo en que éstas operaron.

En el modelo conceptual planteado por MEL (2006), las descargas de las vertientes y afloramientos difusos que ingresan a la Laguna Tuyajto, principal zona de descargas de la zona sur, se estimó en 100 L/s.

Al igual que en la Laguna Tuyajto, el EIA Pampa Colorada (WMC, 2006) estudió las vertientes que alimentaban la Laguna Aguas Calientes 2, instalando estaciones de aforo en las vertientes puntuales y tratando de incluir en éstas las difusas, además de examinar el tamaño de la laguna mediante imágenes satelitales en el periodo 1985 – 2006. La diferencia de cota entre la vertiente norte y la laguna es de 2 m. En la Figura 8.27 se muestra la ubicación de los instrumentos instalados por MEL. A continuación se resume la información reportada en los distintos sectores analizados:

- Vertiente O: el caudal medido continuamente en la estación de aforo se encuentra entre un rango de 14 y 22 L/s, notándose un aumento de caudal en el mes de mayo. El menor valor registrado manualmente (10 L/s) corresponde a una medida puntual realizada cerca de las 12:00 del día en septiembre de 2006.
- Zona de descarga sur: esta zona de descarga es la principal alimentación a la laguna de Aguas Calientes 2, que se realiza a través de tres canales que se unen antes del ingreso a la laguna. Los canales sur este y sur oeste recolectan aportes difusos. El canal sur central está formado por aportes difusos y el caudal de la vertiente sur.
 - Vertiente S: la vertiente se encuentra a menos de 50 metros del punto de medición. El rango de valores reportado varía entre 35 y 39 L/s, entre abril de 2006 y junio de 2007.
 - Canal Sur Este: los caudales fueron medidos entre noviembre de 2006 y junio de 2007, con valores que fluctúan entre 50 L/s y 85 L/s.
 - Canal Sur Central: este canal está alimentado principalmente por el caudal de la vertiente S y por aportes difusos. Los caudales diarios registrados se encuentra entre 45 y 60 L/s.
 - Canal Sur Oeste: se realizaron mediciones entre noviembre de 2006 y junio de 2007. Los flujos diarios reportados son entre 2 y 17 L/s.
- Zona de descarga difusa suroeste y sureste: se visitó esta zona entre diciembre de 2006 y junio de 2007, sin observarse aportes importantes, lo que se consideró despreciable en el periodo observado. Canales secos en la zona indican probable actividad durante lluvias o deshielos.
- Vertiente Este: está ubicada a pocos metros del sector este de la laguna. Los caudales medidos variaron entre 7 y 12 L/s, con variaciones diarias del orden de \pm 3 L/s.
- La Laguna Aguas Calientes 2 tiene una superficie promedio de 10,4 km² y salar de 114 km².

460625 COPIA



Fuente: [WMC, EIA Pampa Colorada, 2006]

Figura 8.27: Zonas de aporte superficial y puntos de medición de caudal, niveles y precipitación en Laguna Aguas Calientes 2.

	Zona	Qprom (*) Sep-Nov (L/s)	Qprom (**) Dic-Mar (L/s)	Qprom (**) Mar-Jun (L/s)
Vertiente Oeste		14	16	17
	Vertiente Sur	33	37	34
Descarga Sur	Canal Sur Oeste	10	5	5
	Canal Sur Central	50	55	57
	Canal Sur Este	46	69	65
Descarga difusa suroeste		SD	0	0
Descarga difusa surete		SD	0	0
Vertiente Este		SD	10	6
Caudal promed	io (***)	120	155	145

Tabla 8.25: Resumen caudales promedio aportantes a la Laguna Aguas Calientes 2.

(*): Mediciones manuales en canal

(**): Mediciones manuales y continuas en estación de aforo

(***): En la suma total no se considera la vertiente Sur ya que ésta alimenta al canal sur central

SD: Sin datos

Fuente: [WMC, EIA Pampa Colorada, 2006]

En el ANEXO VI se presenta una tabla con las coordenadas de las estaciones de aforo y el periodo en que éstas operaron.

En el modelo conceptual planteado por MEL (2006), las descargas de las vertientes y afloramientos difusos que ingresan a la Laguna Aguas Calientes 2, principal zona de descargas del Grupo Norte de cuencas, se estimó en 120 L/s.

El análisis mediante piezómetros multiniveles en la vecindad de los afloramientos que alimentan las lagunas Tuyajto y Aguas Calientes 2 indicó que predomina un flujo horizontal en las aguas subterráneas, donde las descargas estarían controladas por la topografía y la presencia de intrusión salina. En Tuyajto existiría una estructura N-S que influiría en la descarga a la laguna.

8.6.4 Descarga a través de obras de captación

La Dirección General de Aguas ha aprobado derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas de uso consuntivo, y de carácter permanente y continuo por un total de 1.025 L/s. Estos derechos fueron otorgados a la empresa Exploraciones, Inversiones y Asesorías Mundo S.A. (EMSA) y se encuentran distribuidos en las cuencas Salar de Aguas Calientes 2, Pampa Puntas Negras, Pampa Colorada, Pampa Las Tecas y Laguna Tuyajto. La Tabla 8.26 presenta el detalle de los derechos subterráneos aprobados en la zona de estudio, separados por cuenca y punto de captación.

En Pampa Las Tecas se encuentran pendientes por resolver solicitudes de derechos de aprovechamiento subterráneo por 177 L/s, mientras que en la cuenca Pampa Colorada están en periodo de tramitación derechos por 205 L/s, todos requeridos por EMSA. Adicionalmente, en la cuenca Laguna Tuyajto se encuentran en estado de tramitación solicitudes de derechos de aprovechamiento superficial de carácter permanente, por 76 L/s.

La cuenca Salar El Laco no presenta descargas mediante obras de captación de aguas subterráneas, ni derechos en trámite. En cuanto a los recursos superficiales, se ha aprobado la extracción permanente de 0,5 L/s a la Compañía Minera del Pacífico, derecho que actualmente se encuentra en ejercicio y es extraido desde una piscina de almacenamiento localizada en el margen oeste del salar. Adicionalmente se encuentra en trámite la solicitud de derechos de aprovechamiento realizada por la Comunidad Indígena de esta zona, la que contempla la extracción de un caudal total de 10 L/s.

Pronietario	Cuence	Coordenadas UTM		Caudal
		Norte	Este	(L/s)
Exploraciones, Inversiones y Asesorías Mundo S.A.	S. A. Calientes 2	7.394.030	644.500	17
Exploraciones, Inversiones y Asesorías Mundo S.A.	S. A. Calientes 2	7.391.230	646.380	27
Exploraciones, Inversiones y Asesorías Mundo S.A.	S. A. Calientes 2	7.395.560	645.240	40
Exploraciones, Inversiones y Asesorías Mundo S.A.	S. A. Calientes 2	7.393.160	645.220	90
	Subtotal cuenca			
Exploraciones, Inversiones y Asesorías Mundo S.A.	Puntas Negras	7.379.790	659.290	3
Exploraciones, Inversiones y Asesorías Mundo S.A.	Puntas Negras	7.379.220	659.180	33
Exploraciones, Inversiones y Asesorías Mundo S.A.	Puntas Negras	7.379.790	659.290	35
Exploraciones, Inversiones y Asesorías Mundo S.A.	Puntas Negras	7.380.270	658.040	45
Exploraciones, Inversiones y Asesorías Mundo S.A.	Puntas Negras	7.380.950	658.400	50
Exploraciones, Inversiones y Asesorías Mundo S.A.	Puntas Negras	7.379.340	658.100	80
Exploraciones, Inversiones y Asesorías Mundo S.A.	Puntas Negras	7.381.000	658.000	142
	Subtotal cuenca			388
Exploraciones, Inversiones y Asesorías Mundo S.A.	Pampa Colorada	7.356.320	655.280	17
Exploraciones, Inversiones y Asesorías Mundo S.A.	Pampa Colorada	7.358.030	652.570	58
Exploraciones, Inversiones y Asesorías Mundo S.A.	Pampa Colorada	7.357.040	654.065	110
Subtotal cuenca				185
Exploraciones, Inversiones y Asesorías Mundo S.A.	Pampa Las Tecas	7.350.020	654.940	13
Exploraciones, Inversiones y Asesorías Mundo S.A.	Pampa Las Tecas	7.352.249	655.000	30
Exploraciones, Inversiones y Asesorías Mundo S.A.	Pampa Las Tecas	7.351.010	654.890	40
Exploraciones, Inversiones y Asesorías Mundo S.A.	Pampa Las Tecas	7.352.710	654.215	80
	Subtotal cuenca			163
Exploraciones, Inversiones y Asesorías Mundo S.A.	L. Tuyajto	7355490	648520	45
Exploraciones, Inversiones y Asesorías Mundo S.A.	L. Tuyajto	7355420	649040	70
Subtotal cuenca				115
	Total			1.025

Tabla 8.26: Derechos de aprovechamiento subterráneo otorgados en Sector Pampa Colorada.

8.7 Balance Hídrico

De acuerdo a lo revisado en éste y los anteriores capítulos, el dominio del estudio consistió en las unidades hidrográficas e hidrogeológicas Salar El Laco, Salar de Aguas Calientes 2, Puntas Negras, Pampa Las Tecas, Pampa Colorada y Laguna Tuyajto. Estas cuencas son 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 de los salares emplazados en sus depresiones, así como a través de flujos subterráneos hacia otras cuencas, ya sea del sistema piloto como fuera de ellas.

Tal como se discutió en el apartado 8.5, la recarga se ha abordado considerando tanto los aportes a las propias cuencas por efecto de la precipitación, como aquella que proviene desde cuencas vecinas, a través de escurrimientos subterráneos. La principal fuente de renovación de las aguas de los acuíferos es la precipitación que consituiría percolación profunda, que se estimó 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 estaciones de aforo en una cuenca altiplánica de la Región de Tarapacá (Salar del Huasco). 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 inexistente o muy pobre para algunos parámetros. 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 síntesis, se discretizó toda la superficie de control (cuencas superficiales) en 5 zonas asignándoles permeabilidad de muy baja a alta (Figura 8.28). En particular, las zonas de depósitos sedimentarios están dominadas por una permeabilidad alta, como son los rellenos aluviales en las pampas Colorada, Las Tecas, Amarilla, El Laco, Pili, Chamaca y los alrededores de la Laguna Tuyajto (ver Figura 4.5 en página 58). Por otra parte, las zonas con costra de sal, así como aquellas con rocas volcánicas erosionadas e ignimbritas cuaternarias se clasificaron con una permeabilidad media a baja. La parte central de la cuenca Salar de Aguas Calientes 2 y el sector austral del Grupo Sur de cuencas piloto tiene predominancia de esta característica. Otra que área que destaca por su baja permeabilidad corresponde a las rocas volcánicas no erosionadas, que dominan el Cordón de Puntas Negras y sus alrededores, al

suroeste del Salar de Aguas Calientes 2, la mitad occidental de Puntas Negras y el norte de las cuencas Laguna Tuyajto y Salar El Laco.

Por otra parte, en los depocentros de algunas cuencas se han desarrollado salares de grandes proporciones, donde se concentran las descargas por evaporación desde lagunas y napas freáticas cercanas a la superficie. Otras descargas corresponden a aquellas por evapotranspiración desde bofedales y, de manera general, desde sistemas vegetacionales hidrófilos, que se encuentran saturados o parcialmente saturados durante todo el año.

Una característica particular de esta área es el flujo regional de agua subterránea, que conecta hidrogeológicamente a las cuencas endorreicas que tienen divisorias de aguas superficiales bien definidas. Estos flujos han sido estudiados mediante la construcción de pozos de investigación, sondeos geofísicos, análisis químicos e isotópicos de muestras de agua y la piezometría. La interpretación conjunta de la información permite plantear una continuidad hidrogeológica en ciertos sectores, que ha conllevado a separar la zona de estudio en 3 grupos: el Grupo Norte, que contiene a las cuencas Salar de Aguas Calientes 2 y Puntas Negras; el Grupo Sur, que contiene a las cuencas Laguna Tuyajto, Pampa Colorada y Pampa Las Tecas; y un tercer grupo, semiaislado, conformado por el Salar El Laco.

Los apartados siguientes resumen algunos de los aspectos tratados hasta esta parte del informe para las cuencas piloto de la Región de Antofagasta. Entre otros aspectos se establecen los balances de las cuencas, tomando en cuenta las recargas y descargas estimadas para cada una, entre los que se citan los derechos de aprovechamiento de agua aprobados por la DGA. Como se ha mencionado en otras partes de este capítulo, el volumen de control considerado para el estudio está conformado por las cuencas superficiales y subterráneas.

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.

460625 COPIA



Figura 8.28: Unidades litológicas y características hidráulicas presentes en las cuencas del sistema piloto de la II Región.

8.7.1 Grupo Norte: Salar de Aguas Calientes 2 y Puntas Negras

La pendiente del terreno de las cuencas de este grupo está orientada hacia sus depresiones, la Pampa Puntas Negras y el Salar de Aguas Calientes 2, emplazados aproximadamente en el centro de la superficie definida por sus divisorias de agua. En Puntas Negras no se aprecian escurrimientos superficiales, mientras que en la orilla del Salar de Aguas Calientes 2 se observan algunos escurrimientos de vertientes que lo alimentan, siendo el mayor el Río Pili, al noreste.

Por su parte, los escurrimientos subterráneos se han estudiado usando la información piezométrica de los pozos, que indica un flujo desde Puntas Negras hacia el sur. En esta cuenca la napa tiene una baja pendiente, que luego aumenta en el sector de Pampa Loma Amarilla, en la cuenca Salar de Aguas Calientes 2 para volver a decaer antes de llegar al salar homónimo. En esta última hoya hidrográfica se ha estudiado subsuperficialmente sólo la zona sur (Pampa Loma Amarilla), realizandose pozos de investigación en diamantina, perforaciones de aire reverso y sondajes geofísicos. A las aguas extraidas de dichas perforaciones se le han realizado análisis químicos e isotópicos que repaldan el paso del agua subterránea de una cuenca a la otra.

Las precipitaciones, tanto líquidas como sólidas, caen mayormente en las partes altas de las cuencas (cordones de Puntas Negras, Alto de Toro Blanco y Alto de Lari, los principales) y escurren para infiltrarse en las zonas de mayor permeabilidad. La Figura 8.29 muestra estos patrones de flujo, que como se mencionó, han sido revisados en los capítulos precedentes.

La recarga de las cuencas en régimen natural fue estimada en 568 L/s para Aguas Calientes 2 y en 137 L/s para Puntas Negras, sin cuantificarse otras entradas a este acuífero, aunque se dispone de datos que respaldan un caudal desde Laguna Lejía hacia el oriente (AC2).

Las descargas de agua subterránea quedan definidas por las descargas por evaporación desde lagunas, napas someras en el área del salar y sistemas vegetacionales mixtos alimentados por afloramientos de agua subterránea. A esto se debe agregar los derechos aprobados que se encuentren en explotación, cuando esta información se encuentra disponible.

El Grupo Norte es considerado como una sola unidad de control para efectos del balance hídrico, establecido en toda la superficie de las cuencas y sus acuíferos (Tabla 8.27). Se considera la descarga a través de obras de captación como nula, debido a que no habría uso de los derechos aprobados por la DGA debido a la falta de una aprobación ambiental para ello. El término de discrepancia para el escenario medio (siguiendo la nomenclatura del Balance Hídrico de Chile) es de 10% respecto de las entradas (73 L/s), lo que puede atribuirse a varios factores detallados a continuación.

460625 COPIA



Figura 8.29: Patrones de flujo superficial y subterráneo en las cuencas del Grupo Norte del sistema piloto de la Región de Antofagasta.

Entradas (IN)	Mínimo (L/s)	Medio (L/s)	Máximo (L/s)
Recarga por precipitación	554,4	704,7	796,8
Desde otras cuencas	-	-	-
Total entradas	554,4	704,7	769,8
Salidas (OUT)			
Evaporación*	541,1	632,1	723,1
Extracciones**	-	-	-
Hacia otra cuenca	-	-	-
Total salidas	541,1	632,1	723,1
	12.2		
Balance (IN – OUT)	13,3	72,6	73,7
Porcentaje de discrepancia †	2%	10%	9%

Tabla 8.27: Entradas y salidas del Grupo Norte de cuencas del sistema piloto II Región.

* Considera los flujos desde cuerpos de agua libre, vegetación y napas freáticas someras, todos en A. Calientes 2. ** Considera las captaciones subterráneas y superficiales.

[†] Resultado del balance con respecto al valor de las entradas al sistema.

Visto en términos de las incertidumbres con que se trabaja, el porcentaje de discrepancia aparece como razonable, sin embargo, se plantean algunas posibles situaciones que acoten las fuentes de error, las que pueden aplicar de forma conjunta o separada, dependiendo de cuál o cuáles sean el origen de la discrepancia.

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, el porcentaje de la precipitación que se transforma en percolación profunda al acuífero para el escenario promedio es de alrededor de 11%, valor que es razonable para una hoya hidrográfica de las características antes mencionadas.

Se reconoce una falencia en la falta de información hidrometeorológica, principalmente aquella necesaria para la estimación de los valores medios de precipitación de largo plazo. Las isoyetas trazadas responden a un análisis de carácter regional, que utilizan información de estaciones ubicadas desde la costa a la precordillera, además de los datos disponibles de

estaciones en Argentina. Las estaciones operativas en la zona de estudio propiamente tal, corresponden a las instaladas para la elaboración del EIA Pampa Colorada (WMC, 2006) y otros estudios de GeoAguas Consultores, así como aquellas funcionando en el marco del presente estudio. Ninguna de dichas estaciones cuenta con una longitud de registro apropiado de información para caracterizar la zona. Por lo demás, dichas estaciones monitorean unicamente la precipitación líquida, teniendo gravitancia en la zona la caída de nieve durante los meses del invierno en el hemisferio sur.

A pesar de lo expuesto en el párrafo anterior, interesa recalcar que la estimación de recarga en el área de estudio, para la cual se usaron los datos sobre los que se discute, reflejan valores en lo sumo razonables para un área de las características de estas cuenca endorreica de la Puna de la Región de Antofagasta.

Finalmente, se debe tener en cuenta que, a pesar de que existan elementos que permitan justificar en alguna medida la diferencia de los valores expresados, existe cierta incertidumbre asociada a los cálculos de los parámetros que intervienen en el balance, aún en los casos en que se dispone de información hidrometeorológica de larga data. El elemento que se cree aporta mayor incertidumbre para las cuencas estudiadas es la descarga por evaporación, dado que en la cuenca Salar de Aguas Calientes 2 no se contó con información de punteras en la amplia zona con presencia de napas someras.

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 (Grupo Norte de cuencas piloto), 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 8.27 son positivos, el almacenamiento en la cuenca estaría aumentando, con lo cual los niveles de la napa se estarían incrementando conllevando un aumento en la evaporación. Al observar los niveles piezométricos en los pozos, se perciben variaciones interanuales, sin embargo, estos cambios no son significativos en el plazo con que se cuenta de registros, y puede asumirse que éstos permanecen constantes. Las imágenes satelitales históricas respaldan lo expuesto anteriormente, observando variaciones que son función de la estacionalidad, así como de condiciones de sequía o humedad que tienen cierta dependencia temporal asociada a la memoria de las series de precipitación.

Si se estuviera en el caso de un equilibrio dinámico en vías de establecerse, se estaría produciendo –como se mencionó anteriormente- un aumento de la evaporación (Figura 8.21).

Para verificar esta condición se sugiere mantener el monitoreo en los pozos y punteras construidos por WMC y GeoAguas Consultores en la zona, aunque a priori y con los datos disponibles, se asume que no hay cambios en el almacenamiento.

Situación 3: Salidas subterráneas no considerados hacia otras cuencas. En el apartado 8.4 se discute sobre la conexión con otras cuencas, separando el sistema piloto en tres grupos, como se ha abordado este mismo apartado. La cuenca Salar de Aguas Calientes 2 se ha estudiado mayoritariamente en su mitad austral, salvo por imágenes satelitales Landsat y Quickbird a la costra de sal y lagunas que afloran en su interior. Con la información disponible no fue posible establecer una conexión con otras cuencas fuera del Grupo Norte. Por el contratrio, la información con que se cuenta indica un aporte desde la cuenca Laguna Lejía, que iría en el sentido opuesto de este razonamiento.

Por otra parte, en la cuenca Puntas Negras, los antecedentes muestran que la divisoria de aguas superficiales con su cuenca al este (Salar del Rincón) sería también una divisoria de aguas subterráneas, sin embargo, no se ha descartado completamente un flujo a mayor profundidad.

Situación 4: Extracciones actuales son mayores a lo supuesto. Una cuarta situación posible es que del sistema se esté extrayendo agua, lo que con la información de que se dispuso no ocurre.

8.7.2 Grupo Sur: Laguna Tuyajto, Pampa Colorada y Pampa Las Tecas.

Al igual que en el Grupo Norte, la pendiente del terreno de las cuencas endorreicas de este grupo está orientada hacia sus depresiones, donde se encuentran los sectores que dan el nombre a las hoyas hidrográficas. En Pampa Colorada y Pampa Las Tecas no se aprecian escurrimientos superficiales, y en Laguna Tuyajto se ven algunos aportes de vertientes que nacen en su orilla, donde se observan algunos escurrimientos que fueron discutidos en el apartado 8.6.3 (página 302).

Por su parte, los escurrimientos subterráneos se han estudiado usando la información piezométrica de los pozos, que indica un flujo desde Pampa Colorada hacia Pampa Las Tecas y Pampa Amarilla (Laguna Tuyajto). Pampa Las Tecas también aporta agua subterránea hacia la cuenca Laguna Tuyajto, mientras que esta última descarga subterráneamente hacia las cuencas Salar de Aguas Calientes 3 y Salar de Incahuasi. En Pampa Las Tecas y Colorada la pendiente de la napa es baja, lo que se correlaciona bien con la permeabilidad reportada para las unidades de subsuperficie. La información de sondajes geofísicos y de muestras de agua de los pozos, a las que se han realizado análisis químicos e isotópicos, apoyan la idea del flujo regional, con dirección preferentemente de este a oeste. En profundidad, este flujo tiene un contenido de sal notoriamente más alto, que se origina en las cuencas con presencia de salares (El Laco, Tuyajto, Aguas Calientes 3 y Capur en Figura 3.4, pág.22).

Las precipitaciones caen mayormente en las partes altas de las cuencas (Cordón Chalviri, cerros Overo, del Imán y La Cantera, así como en el Volcán Puntas Negras) y escurren para infiltrarse en las zonas de mayor permeabilidad. La Figura 8.30 muestra estos patrones de flujo, que como se mencionó, han sido revisados en los capítulos precedentes. También allí se presentan los flujos de agua subterránea de la cuenca Salar El Laco.

La recarga de las cuencas en régimen natural fue estimada en 160 L/s para Laguna Tuyajto, 92 L/s para Pampa Las Tecas y en 56 L/s para Pampa Colorada. Por su parte, las descargas de agua subterránea quedan definidas por la evaporación desde cuerpos de agua libre, napas someras y sistemas vegetacionales mixtos alimentados por afloramientos de agua subterránea en la cuenca Laguna Tuyajto. Las otras dos cuencas sin presencia de estas condiciones descargan de forma subterránea, como se mencionó anteriormente. A esto se debe agregar los derechos aprobados que se encuentren en explotación, cuando esta información se encuentra disponible.

El Grupo Sur es considerado como una sola unidad de control para efectos del balance hídrico, establecido en toda la superficie de las cuencas y sus acuíferos (Tabla 8.28). Se considera la descarga a través de obras de captación como nula, debido a que no habría uso de los derechos aprobados por la DGA debido a la falta de una aprobación ambiental para ello.

460625 COPIA



Figura 8.30: Patrones de flujo superficial y subterráneo en las cuencas del Grupo Sur y la cuenca Salar El Laco del sistema piloto de la Región de Antofagasta.

Entradas (IN)	Mínimo (L/s)	Medio (L/s)	Máximo (L/s)
Recarga por precipitación	243,4	308,7	375,7
Desde otras cuencas	-	-	-
Total entradas	243,4	308,7	375,7
Salidas (OUT)	172 7	107 1	200.4
Extracciones**	-	-	- 200,4
Hacia otra cuenca***	90,0	130,0	170,0
Total salidas	263,7	317,1	370,4
Balance (IN – OUT)	-20,3	-8,4	5,3
Porcentaje de discrepancia †	8%	3%	1%

Tabla 8.28: Entradas y salidas del Grupo Sur de cuencas del sistema piloto II Región.

* Considera los flujos desde cuerpos de agua libre, vegetación y napas freáticas someras, todos en L. Tuyajto.

** Considera las captaciones subterráneas y superficiales.

*** Estas descargas corresponden a 50 L/s hacia el Salar de Aguas Calientes 3 y 80 L/s hacia el Salar de Incahuasi, de acuerdo a lo presentado en la Tabla 8.23 (página 301).

[†] Resultado del balance con respecto al valor de las entradas al sistema.

El término de discrepancia para el escenario medio (siguiendo la nomenclatura del Balance Hídrico de Chile) es de 3% (8,4 L/s) respecto de las entradas (309 L/s), lo que puede atribuirse a los factores (situaciones) detallados para las cuencas del Grupo Norte (página 315). Visto en términos de las incertidumbres con que se trabaja, el porcentaje de discrepancia aparece como razonable.

8.7.3 Salar El Laco

La cuenca Salar El Laco se considera un sistema semiaislado, dado que tiene una potencial interacción con las cuencas Pampa Colorada y Pampa Las Tecas a través de un flujo subterráneo profundo de agua con alto contenido de sal. Este conformaría el tercer Grupo, aunque no lo es como tal por ser una sola unidad hidrográfica.

Las aguas superficiales escurren hacia el salar en la depresión, aunque no se aprecian de forma permanente. Algunos afloramientos en la orilla de la zona ocupada por la costra de sal dan cuenta de afluentes subterráneos que convergen hacia este sector. Por su parte, los escurrimientos subterráneos han sido inferidos como se muestra en la Figura 8.30, dado que no existe de información suficiente para caracterizar su patrón.

La recarga de la cuenca se produce a través de las zonas de mayor permeabilidad, que en el caso de esta hoya hidrográfica son abundantes. Cerca de un 50% de su superficie ha sido catalogada como de media a alta y alta permeabilidad, en particular en los alrededores del salar, la Pampa El Laco, la ladera occidental de la Loma Siglia y la Pampa El Rincón. En régimen natural, la recarga fue estimada en 237 L/s.

Por otra parte, las descargas de agua subterránea quedan definidas por la evaporación desde cuerpos de agua libre, napas someras y evapotransipiración desde plantas. A esto se debe agregar los derechos aprobados que se encuentren en explotación, cuando esta información se encuentra disponible.

El balance hídrico de la cuenca Salar El Laco establecido en toda la superficie de la cuenca y su acuífero se presenta en la Tabla 8.29. Allí se consideró una descarga a través de obras de captación de 43 m^3/d (0,5 L/s), otorgados y en operación por parte de la Compañía Minera del Pacífico.

El término de discrepancia para el escenario medio (siguiendo la nomenclatura del Balance Hídrico de Chile) es de 24% (58 L/s) respecto de las entradas (237 L/s), lo que como se ha revisado para los grupos de cuencas anteriormente descritos puede atribuirse a diversos factores. Las situaciones que aplican para el caso de la cuenca Salar El Laco se detallan a continuación, pudiendo participar de manera conjunta o separadamente para explicar las diferencias.

Entradas (IN)	Mínimo (L/s)	Medio (L/s)	Máximo (L/s)
Recarga por precipitación	187,5	237,3	288,3
Desde otras cuencas	-	-	-
Total entradas	187,5	237,3	288,3
Salidas (OUT)			
Evaporación*	252,3	294,4	353,8
Extracciones	0,5	0,5	0,5
Hacia otra cuenca	-	-	-
Total salidas	252,8	294,9	354,3
Balance (IN – OUT)	-65,3	-57,6	-66,0
Porcentaje de discrepancia [†]	35%	24%	23%

Tabla 8.29: Entradas y salidas de la cuenca Salar El Laco del sistema piloto II Región.

* Considera los flujos desde cuerpos de agua libre, vegetación y napas freáticas someras en la cuenca.

[†] Resultado del balance con respecto al valor de las entradas al sistema.

Situación 1: Metodología usada y/o su aplicación. La estimación de recarga disponible para su comparación es la planteada por WMC en el EIA Pampa Colorada (2006), donde proponen de acuerdo a la revisión bibliográfica un valor entre 10 y 20% del agua que entra por precipitación. El rango propuesto varía entre 148 y 296 L/s, valores que están dentro del rango propuesto en este estudio, que se presenta un poco más acotado.

Hay dos parámetros que presentan mayor incertidumbre: la descarga por evaporación desde suelos y las descargas hacia otras cuencas. El primero de estos tiene su fuente de error en el desconocimiento de la profundidad de la napa en el área del salar, que puede mejorarse con la instalación y el monitoreo de punteras con una buena distribución. El segundo parámetro sobre el que se tiene más incertidumbre es la descarga hacia otras cuencas. Esta descarga ocurriría en niveles más profundos, como parte de un flujo regional hacia el este y que es tratado en el suguiente análisis.

Situación 2: Salidas subterráneas no considerados hacia otras cuencas. En la conexión con otras cuencas se ha discutido que el tamaño del salar en esta cuenca mostraría que funciona como un sistema semiasilado, donde las recargas recibidas por precipitación serían descargadas por evaporación a la atmósfera. El error asociado al cálculo de la recarga y de la descarga reflejan un margen que podría corresponder al aporte de agua subterránea de El Laco hacia Pampa Colorada y Pampa Las Tecas, el que se daría a niveles más profundos de acuerdo a lo observado en términos de contenido de sal en los pozos de estas cuencas.

Se descartan los cambios en el almacenamiento debido a que de manera general los pozos en la zona han mostrado una napa con un comportamiento que varía estacionalmente poco, siendo en la práctica despreciables durante el tiempo en que se han monitoreado. Esta situación no puede ser considerada como representativa del largo plazo, por lo que se sugiere seguir monitoreando, pero entrega una idea de la variación que muestran los pozos en lo que podría ser el mediano plazo.

También se descarta que las extracciones sean menores a lo que actualmente está otorgado como derechos y aunque este fuese el caso, no afectaría significativamente los resultados del balance.

COPIA

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 cuencas de la Región de Antofagasta. 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, que en esta zona sustentan las actividades minera y ganadera, así como ambientes lacustres donde habitan flora y fauna autóctona.

Luego, este informe presenta una caracterización hidrogeológica de las cuencas piloto de la Región de Antofagasta, salares de Aguas Calientes 2 y El Laco, Laguna Tuyajto y Pampas Puntas Negras, Colorada y Las Tecas. 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 2 de los sectores definidos por este autor: la Depresión de los Salares Cautivos Prealtiplánicos y el Altiplano Chileno. El primero de estos sectores corresponde a una parte del bloque altiplánico propiamente tal, que se desarrolla mayoritariamente en Bolivia, El segundo sector corresponde a una franja de orientación NNE-SSW, que cruza esta zona del altiplano y que es discontinua en gran parte de la zona ocupada por las cuencas piloto.

Las cuencas piloto corresponden a cuencas endorreicas, cuyas depresiones superan los 4.000 msnm. La meseta más baja de este grupo de hoyas hidrográficas corresponde a la de la cuenca Laguna Tuyajto con una altura de 4.033 msnm, mientras que la meseta más alta es la de la cuenca Puntas Negras, ubicada a una cota de 4.353 msnm. El Volcán Puntas Negras es la altura máxima común a las cuencas Salar El Laco, Laguna Tuyajto y Puntas Negras, con 5.852 msnm. Los relieves más abundantes en la zona corresponden a relieves volcánicos en las partes altas, en particular a cordones volcánicos, predominantes en el sector del Cordón Puntas Negras. También se observan abundantes plataformas ignimbríticas en estos sectores de mayor cota. En las partes bajas predominan las llanuras aluviales, y menormente los conos aluviales.

En el Salar El Laco hay abundancia de plataformas ignimbríticas ocupando la parte más baja de la cuenca.

Geología

El área de estudio se emplaza entre la Cordillera Occidental y la Puna, cuya configuración se ha desarrollado desde el Paleozoico, y responde al efecto de la subducción de la placa oceánica (Placa de Nazca) y su interacción con la placa continental (Placa Sudamericana). La Puna chilena se caracteriza por presentar pendientes suaves entre las que se emplazan pequeñas cuencas hidrográficamente cerradas, que pueden albergar cuerpos de origen evaporítico.

La configuración geológica de las cuencas piloto se remonta a unos 1.000 Ma atrás, y durante el Paleozoico se depositaron secuencias de areniscas, areniscas cuarcíferas, areniscas finas y limonitas (formaciones Aguada de la Perdiz, Poquis y Estratos del Salar de Quisquiro). Los registros mesozoicos se limitan al Cretácico Superior y se componen de conglomerados, areniscas y calizas (Estratos de Quebrada Blanca de Poquis). Durante el Terciario se depositaron potentes secuencias de areniscas, limonitas y yeso (Formación Chofjas), seguidas de conglomerados y gravas (formaciones Cajchimayo y Pastos Chicos en el Mioceno). Durante este mismo período se produce la intrusión de pequeños cuerpos porfídicos subvolcánicos. Las unidades más recientes corresponden a ignimbritas, lavas y depósitos piroclásticos del Neógeno, junto con depósitos no consolidados de diverso origen.

Hidrología

Se realizó la caracterización hidrológica para el sistema piloto de la II 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, y en estaciones meteorológicas y fluviométricas de la DGA, y estaciones meteorológicas pertenecientes a la empresa GeoAguas Consultores.

En cuanto a las precipitaciones se dispone de un año de estadística en las estaciones PUC-DGA, por consiguiente, los resultados obtenidos con los análisis realizados en estas estaciones no se pueden considerar como el comportamiento de largo plazo. En cambio, en las estaciones DGA se dispone de más de 20 años de estadística permitiendo obtener resultados sobre su comportamiento en un plazo más extenso. Sin embargo, ninguna de las estaciones DGA seleccionadas se ubican al interior del sistema piloto en estudio. A nivel anual se observó que las precipitaciones registradas en las estaciones PUC-DGA durante el año hidrológico 2007-2008 tuvieron una magnitud entre 19,0 mm y 48,5 mm. En las estaciones GeoAguas las precipitaciones registradas los años hidrológicos 2006-2007 y 2007-2008 tienen un promedio que varia entre 26,3 mm y 52,8 mm. Estos valores son similares a los registrados históricamente en las estaciones DGA seleccionadas para el sistema piloto de la II Región (entre 37,1 mm y 67,9 mm).

A nivel mensual, de acuerdo a los registros históricos de precipitación en las estaciones DGA, los meses con mayor precipitación son enero y febrero con valores entre 12 mm y 17 mm. Para las estaciones PUC-DGA los meses más lluviosos fueron diciembre en Tuyajto (39 mm), enero en El Laco (41 mm) y febrero en Puntas Negras (17 mm). En las estaciones GeoAguas los meses más lluviosos fueron enero y febrero, variando la precipitación entre 14 mm y 37 mm, a excepción de la estación Laguna Tuyajto, donde el mes más lluvioso corresponde a agosto con 62 mm.

En las estaciones PUC-DGA, GeoAguas y DGA el periodo más lluvioso del año corresponde a Diciembre – Marzo, a excepción de la estación Laguna Tuyajto (GeoAguas), donde el periodo más lluvioso fue Abril – Noviembre.

La precipitación diaria en las estaciones PUC-DGA, GeoAguas 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 pueden alcanzar hasta 30% en enero (Laco Camino Puntas Negras). Sin embargo, es posible observar valores del orden del 3%, también en el mes de enero (Camar). En cuanto a la probabilidad de transición de estado seco a lluvia se observa que no supera el 5% en las estaciones Camar y Socaire, pero alcanzan hasta el 20% en la estaciones de la DGA estas probabilidades se pueden considerar de largo plazo ya que fueron obtenidas con series de más de 20 años de registros.

Se analizaron las series horarias de precipitación en las estaciones PUC-DGA, obteniendo la probabilidad empírica de que esté lloviendo a una determinada hora, para los distintos meses del año. Este análisis mostró que para el periodo noviembre 2007 – enero 2009 los eventos de precipitación ocurrieron principalmente entre las 12:00 y las 18:00.

Se comparó el gradiente de precipitación con la altura obtenido en las estaciones PUC-DGA y GeoAguas con el gradiente regional obtenido en la Parte III de este informe "Hidrología Regional del Altiplano", el cual es de un aumento de 6 mm por cada 100 m de altura para altitudes mayores a 2.250 msnm. Se observa que la variación de la precipitación con la altura

en las estaciones PUC-DGA y GeoAguas, localizadas sobre los 3.900 msnm, no sigue la tendencia de las estaciones utilizadas en el estudio hidrológico regional. Esto se debe a que en el año hidrológico 2007-2008 la cantidad de agua caída fue menor a la que se registró históricamente en las estaciones DGA. Sin embargo, es posible obtener un gradiente de 2,0 mm por cada 100 m de altura, que es menor que el gradiente regional.

Dentro del sistema piloto de la II Región los únicos aportes superficiales permanentes que disponen de mediciones de caudal se encuentran en las cuencas de la Laguna Tuyajto y Salar de Aguas Calientes 2. Estos escurrimientos son alimentados por vertientes ubicadas cerca de los salares, y por aportes difusos a los largo de los cauces. El promedio de los escurrimientos superficiales es de 94 L/s y 140 L/s para la Laguna Tuyajto y Salar de Aguas Calientes 2, respectivamente. Los pocos registros de caudal que se dispone fueron realizados en forma puntual en los años 2006 y 2007, por lo que no fue posible realizar un análisis estadístico de estos. El detalle de la ubicación de estos escurrimientos y las mediaciones realizadas se presenta Acápite 8.6.3 "Descarga a través de vertientes naturales".

La información de temperatura y evaporación de tanque en la cuenca del sistema piloto de la II Región es escasa. Al interior del sistema piloto se dispone de la estación Puntas Negras (PUC-DGA) que registra temperatura, y de las estaciones El Laco y Tuyjato (GeoAguas) que registran evaporación. Adicionalmente se dispone de registros de temperatura y evaporación en la estación Socaire (DGA), y registros de evaporación en la estación Talar (GeoAguas). Estas estaciones se encuentran ubicadas cerca del sistema piloto. Por otra parte, se presentaron los resultados obtenidos en la Parte III de este estudio (Hidrología Regional del Altiplano), principalmente gradientes regionales de temperatura y evaporación con la altura e isotermas.

Las temperaturas mínima, media y máxima absolutas promedio al interior del sistema piloto son de -12,2 °C, 1,4 °C y 18,5 °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 3.127 mm. Por otra parte, los meses con mayor evaporación son noviembre, diciembre y enero, alcanzando valores de hasta 350 mm mensuales. Por otra parte la menor evaporación ocurre en los meses de junio y julio con valores de alrededor de 180 mm.

Hidrogeoquímica e Isotopía

En general las aguas superficiales y subterráneas de la Puna son de composición cloruradasódica, con proporciones variables de calcio y sulfato. Entre las aguas subterráneas, las que alcanzan las mayores proporciones de calcio son las de la cuenca Salar de Aguas Calientes 2, mientras que las de Puntas Negras son más ricas en magnesio. Pampa Las Tecas alcanza las mayores concentraciones de bicarbonato. Las muestras recogidas en las lagunas alcanzan elevadas concentraciones dado la fuerte evaporación a la que están expuestas.

Las muestras recolectadas en la cuenca del Salar de Aguas Calientes 2 indican que hay aguas cloruradas sódicas y cálcicas, y algunas con una componente sulfatada importante. Éstas últimas se concentran en el sector suroeste del salar (Pampa Loma Amarilla). Presentan además una estratificación vertical, ya que a mayor profundidad su salinidad aumenta significativamente, junto con la concentración de calcio. El aporte de calcio se atribuye a las secuencias ignimbríticas (especialmente Ignimbrita Atana) y a los complejos volcánicos, mientras que el sulfato tendría un origen hidrotermal asociado al volcanismo del Cordón Puntas Negras.

En la cuenca Puntas Negras todas las aguas son cloruradas- sódicas con contenidos variables de calcio. No alcanzan concentraciones muy elevadas.

En Laguna Tuyajto y Pampa Colorada predominan las aguas cloruradas sódicas, con distintos niveles de salinidad. En la primera, la concentración de las aguas aumenta de norte a sur, lo que se relaciona con un flujo cuya zona de recarga es el cordón Chalviri. La única excepción la constituye una muestra más enriquecida en calcio recolectada en el este de la laguna. La elevada concentración salina en el sector de este cuerpo de agua, sería efecto de la evaporación y la lixiviación de antiguas costras salinas.

En Pampa Colorada las aguas subterráneas señalan mayor salinidad en profundidad, y lateralmente su concentración de elementos disueltos parece disminuir hacia el este.

En Pampa Las Tecas hay un conjunto de muestras agrupadas en el sector sureste, que indican aguas cercanas a la neutralidad con una baja concentración de iones. La salinidad parece aumentar hacia el norte.

Las aguas del Salar El Laco destacan por su elevada salinidad en las proximidades del cuerpo evaporítico. En los márgenes norte y sur del salar, aguas recogidas en afloramientos presentan una proporción importante de calcio.

Las aguas de la cuenca de Laguna Lejía constituyen una excepción en cuánto al tipo de aguas que predomina en el sector. Las muestras tomadas en la laguna indican que la concentración de iones disueltos aumenta considerablemente hacia el sureste, y se caracterizan por ser tipo sulfatado sódico. Este fenómeno se podría asociar con la disolución de minerales como el yeso y la anhidrita, y/o al contacto con terrenos formados en ambiente marino. Otra fuente podrían ser los mismos sulfuros que forman parte de las rocas ígneas, pero que por tectónica han sido expuestos a la oxidación en planos de fallas y fracturas. La única muestra de afloramiento

posee baja salinidad y es bicarbonatada sódica. Destaca el color pardo amarillento de las aguas y su intenso olor a azufre.

En Salar de Aguas Calientes 3 las aguas son cloruradas sódicas con distintos grados de salinidad. En las zonas más marginales se observan algunas excepciones, como una vertiente clorurada- cálcica en el norte del salar mismo, y los afloramientos sulfatados cálcicos del costado este del Salar de Talar. Muestras obtenidas en profundidad indican que la salinidad aumenta en las aguas ubicadas en los niveles inferiores.

En cuanto a los elementos minoritarios analizados, suelen presentarse en concentraciones elevadas debido a la concentración que genera el efecto de la evaporación. Por ello su análisis se asocia con la conductividad, dada su relación con los iones disueltos en las aguas. El arsénico se concentra en las aguas superficiales del suroeste del Salar de Aguas Calientes 2, al oeste de la Laguna Tuyajto y en el Salar El Laco. En este último lugar también se encuentran altas concentraciones en las aguas subterráneas. Destacan las concentraciones de boro (relativas a la salinidad) en el Salar El Laco, lo que se atribuye a la lixiviación de los depósitos ignimbríticos. La proporción de litio es particularmente elevada en las aguas subterráneas de Puntas Negras y en una muestra de agua tomada en Laguna Tuyajto.

Las características isotópicas de las aguas permiten separarlas en dos grupos. El primero con un leve desplazamiento de la MWL se asocia con aguas de recarga local de fraccionamiento reducido. El segundo grupo se alinea en una recta que intercepta a la MWL en un punto de mayor empobrecimiento isotópico, posiblemente porque fueron recargadas a mayor altura. Según la distribución acotada de los datos de agua subterránea, es probable que todas representen a un mismo acuífero de extensión regional, cuyos flujos vendrían desde el cordón volcánico de Puntas Negras y estarían marcados por el fraccionamiento producido al sublimarse la nieve.

Hidrogeología

En la caracterizción hidrogeológica del sistema piloto de la Región de Antofagasta, se abordaron las unidades hidrogeológicas y geometría acuífera de las cuencas en estudio, la piezometría y propiedades hidráulicas del acuífero, 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.

Las unidades hidrogeológicas y geométria acuífera fueron descritas en base a los antecedentes disponibles, sin aportar nuevos datos en este estudio. Los antecedentes se respaldan en levantamientos geológicos de superficie, particularmente en las descripciones litológicas y estructurales, descripción de perforaciones de aire reverso (DTRC) y diamantina, así como en
métodos indirectos de prospección geofísica. A partir de esto, se han identificado 6 unidades hidrogeológicas principales en la zona de estudio, en base a una clasificación geológica de las rocas y rellenos que conforman los perfiles estratigráficos. La columna estratigráfica típica de los pozos queda descrita con una primera capa de relleno sedimento, a la que subyace una serie de estratos de tobas y lavas con un nivel variable de fracturamiento, y con algunas intercalaciones de horizontes meteoroizados. Los acuíferos están condicionados por la permeabilidad primaria de las rocas, sin embargo, es preponderante la permeabilidad secundaria del sistema, debida al fracturamiento. El basamento no fue detectado con los pozos que se han perforado, así como tampoco con los sondeos geofísicos. Su profundidad se ha considerado en los estudios de referencia como superior a los 400 m desde la superficie del terreno.

Los niveles piezométricos de los que se dispone, corresponden principalmente a aquellos de pozos y punteras en la zona, cuya ubicacion es mayoritariamente en las zonas de menor cota o depresiones. El monitoreo de estos puntos no cuenta con una data superior a 10 años, pero en este período se han obserbado variaciones estacionales leves, que por ahora permiten decir que el sistema se encuentra en equilibrio. Al sumar a la información piezométrica la información química de las aguas, se ha propuesto separar el sistema piloto en 3 grupos con características comunes (WMC, 2006), los que han sido llamados en el presente estudio como Grupo Norte, Grupo Sur y Salar El Laco. El Grupo Norte está compuesto por las cuencas Salar de Aguas Calientes 2 y Puntas Negras, mientras que el Grupo Sur está compuesto por las cuencas Laguna Tuyajto y las pampas Colorada y Las Tecas. El Salar El Laco conforma un sistema semiaislado, dado que no se evidencia una interacción clara con las otras unidades.

La continuidad de los niveles piezométricos muestra en el Grupo Norte un escurrimiento subterráneo con dirección hacia el norte, cuya base de equilibrio es el Salar de Aguas Calientes 2. Las aguas que infiltran en Puntas Negras escurren subterráneamente con un bajo gradiente hidráulico en la pampa (0,025%), con dirección hacia el sector de Loma Amarilla, donde el gradiente aumenta sustantivamente (1%). De allí, los niveles indican un flujo hacia el la Laguna de Aguas Calientes 2, ubicada en el borde suroccidental del salar homónimo. En el Grupo Sur en tanto, los escurrimientos subterráneos se mueven con dirección principal hacia el oeste, desde las cuencas Pampa Colorada y Pampa Las Tecas hacia Tuyajto, donde la laguna de esta última actúa como zona de descarga de una parte de los flujos. Por diferencias de cota del nivel freático, también existe un flujo de agua subterránea desde Pampa Colorada hacia Pampa Las Tecas, con un gradiente del orden de 1,5%. El gradiente entre Pampa Las Tecas y Pampa Amarilla (cuenca Tuyajto) es de 0,65% y desde Pampa Colorada a Pampa Amarilla es de 2,8%. Este sistema incluye también a la cuenca Salar de Aguas Calientes 3 y Salar de Incahuasi, a los que se descarga agua desde la cuenca Laguna Tuyajto. En el Salar El Laco, los flujos de agua subterránea se mueven de forma similar a como lo hacen los de agua

superficial, convergiendo en la zona de descarga por evaporación de la cuenca ubicada en su depresión, el salar. Se ha propuesto (WMC, 2006) el paso de aguas profundas, con un alto contenido de sal, desde El Laco hacia las cuencas ubicadas al este, debido a que los contenidos de sal en los niveles más profundos de los pozos perforados a ambos lados de la divisoria de aguas superficial son similares, teniendo como fuente las aguas sometidas a evaporación en El Laco. Las aguas subterráneas más someras muestran una coincidencia con la divisoria de aguas superficial.

La conductividad hidráulica de las cuencas hidrogeológicas así como su coeficiente de almacenamiento, se han estimado a partir de ensayos de bombeo en los pozos de exploración y producción construidos en la zona. Las pruebas de bombeo de gasto variable mostraron depresiones significativas para los caudales ensayados, lo que de acuerdo a WMC (2006) es indicio de un acuífero en roca fracturada con flujo turbulento alimentando los pozos. Durante el periodo de bombeo en las pruebas cortas (~3 días) no se observaron depresiones bruscas originadas por el alcance de barreras impermeables. El radio de influencia de los pozos operando alcanzó los 850 m, lo que corrobora que las unidades hidrogeológicas presentan una continuidad y alta permeabilidad. De manera complementaria, en el presente estudio DGA-PUC (DIHA) se han reinterpretado las pruebas de bombeo, encontrándose algunas diferencias con lo planteado por los antecedentes encontrados en WMC (2006) y GeoAguas Consultores (2007). Estos últimos normalmente reportan valores de constantes elásticas mayores. A continuación se exponen ambos casos:

Estudio DGA-PUC (DIHA). De los valores estimados se tiene que en Pampa Loma Amarilla, al sur del Salar de Aguas Calientes 2, la conductividad hidráulica varía entre 0,1 y 1,2 m/d, valores que aparecen como bajos y que se verifican por el alto gradiente hidráulico y la gran diferencia de los niveles de la napa en la zona. En Pampa Puntas Negras se estimaron valores de permeabilidad que van de 0,1 a 3 m/d y coeficientes de almacenamiento entre 0,1% y 3%. En Pampa Colorada se registraron conductividades hidráulicas que van de 0,6 a 2,8 m/d En Pampa Amarilla, al noreste de la Laguna Tuyajto, es donde se presentan los mayores valores de permeabilidad en la zona de estudio, con valores que varían entre 2,5 y 4,5 m/d, lo que es coherente con las pequeñas diferencia del nivel de la napa. En Pampa Las Tecas se registraron valores de conductividad hidráulica entre 1,5 y 3 m/d.

Estudios WMC (2006) y GeoAguas Consultores (2007). En Pampa Colorada los valores de conductividad hidráulica varían entre 14 y 59 m/d, con promedios en torno a los 40 m/d. En Pampa Las Tecas se encuentran conductividad hidráulica entre 7 y 37 m/d, con promedios en torno a los 18 m/d. En Pampa Amarilla se presentan los menores valores de conductividad hidráulica del sector sur de las cuencas piloto, con valores que van de 9 a 16 m/d.

El valor del coeficiente de almacenamiento determinado analíticamente para Puntas Negras varió en un rango de 0,2% a 6%, con los valores mayores ubicados en el centro de la cuenca (depresión), los que se reducen hacia los márgenes. En las cuencas del sector sur, los coeficientes de almacenamiento varían entre 0,0015% y 6,5%. En Pampa Colorada se registraron valores entre 0,0015% y 6,5% y en Pampa Las Tecas, entre 0,01% y 18%. Hasta acá los valores reportados representan el comportamiento de un acuífero libre a semiconfinado. En Pampa Amarilla en tanto, los valores reportados variaron entre 0,025% y 0,04%, más característicos de un acuífero confinado.

En El Laco sólo se cuenta con una perforación, realizada para testear la conexión hidrogeológica con Pampa Colorada, donde no se realizaron pruebas de bombeo.

Siguiendo con la caracterización hidrogeológica, se ha planteado en los antecedentes revisados la conexión subterránea tanto entre las cuencas piloto como con sus aledañas (WMC y GeoAguas Consultores). Las relaciones hidrogeológicas entre las cuencas de la Puna de Atacama estudiadas en este informe se dan en la forma de flujos regionales, originados por una continuidad en la litología y/o presencia de estructuras. Tanto los datos isotópicos y químicos, así como las diferencias de cotas sustantivas del agua subterránea avalan este hecho. Manteniendo el esquema de 3 grupos planteado en la revisión de la piezometría de las cuencas, al Grupo Norte puede agregarse la cuenca Laguna Lejía, mientras que al Grupo Sur pueden agregarse las cuencas Salar de Aguas Calientes 3 y Salar de Incahuasi.

La inclusión de la cuenca Laguna Lejía a las cuencas del Grupo Norte (Puntas Negras y Salar de Aguas Calientes 2) se sostiene en la composición de dos afloramientos muestreados a ambos lados de la divisoria de aguas (Cordón Alto de Caballo Muerto). Sus composiciones son bicarbonatadas sódicas y difieren del común de las muestras analizadas en el resto de ambas cuencas. Por su parte, en el Grupo Sur existe un flujo de carácter regional, que se produce desde Pampa Colorada hacia Pampa Las Tecas y hacia Pampa Amarilla (cuenca Laguna Tuyajto), y desde Pampa Amarilla a las cuencas Salar de Incahuasi (al sur) y Salar de Aguas Calientes 3 (al oeste). El paso de agua subterránea está apoyado en los datos TEM, las perforaciones y la química de las aguas, que muestran continuidad en los estratos y niveles del agua subterránea y contenidos de elementos mayoritarios, respectivamente.

Se realizó una estimación de la recarga media anual de largo plazo en las 6 cuencas del sistema piloto de la II Región mediante balances de masa y de coeficientes de infiltración y escorrentía que ponderan las características hidráulicas de las unidades litológicas presentes en las cuencas analizadas. De acuerdo a esta estimación, la recarga en estas cuencas varía entre el 7,9% y 18,8% de la precipitación media anual, lo que equivale a valores entre 44,5 L/s y 692,9 L/s. Este resultado es similar al reportado por WMC (2006) (EIA Pampa Colorada) que

determinó que la probable recarga en la zona varía entre el 5% y 20% de la precipitación media anual. No se reconocen recargas externas desde otras cuencas al sistema. En el Grupo Norte de cuencas piloto se estimó una recarga entre 554,4 y 796,8 L/s, con un valor medio de 704,7 L/s. Para el Grupo Sur de cuencas se estimó una recarga entre 243,4 y 375,7 L/s, con un valor medio de 308,7 L/s. Finalmente en el Salar El Laco, se estimó una recarga entre 187,5 y 288,3 L/s, con un valor medio 237,3 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 el Grupo Norte de cuencas, se estimó una evapotranspiración total que varía entre 541,1 y 723,1 L/s, con un valor medio de 632,1 L/s. Por el mismo concepto, para el Grupo Sur de las cuencas del sistema piloto se estimó en este estudio una descarga media entre 173,7 y 200,4 L/s, con un valor medio de 187,1 L/s, mientras que por descarga hacia otras cuencas se estimó en 130,0 L/s como valor medio (90,0 - 170,0 L/s). En ninguno de estos grupos se han observado descargas a través de obras de captación, a pesar de que existen derechos de aprovechamiento aprobados. Esto debido a consideraciones de carácter ambiental, que buscan evitar los impactos irremediables de largo plazo en los ecosistemas. En el Salar El Laco, las descargas totales se estima que varían entre 252,8 y 354,3 L/s, con un valor medio de 294,9 L/s. Esta cuenca es la única que tendría explotación, de carácter permanente y continuo por un total de 0.5 L/s.

Los balances hídricos en las cuencas se realizaron considerando la información más fidedigna de la que se dispuso, discutiéndose las posibles fuentes que lleven a un error de cierre más acotado. Para las cuencas del Grupo Norte se contabilizaron entradas totales por 704,7 L/s y una descarga de 632,1 L/s, lo que representa un exceso del 10% respecto del valor de las entradas. Para las cuencas del Grupo Sur, se estimaron entradas por 308,7 L/s y salidas por 317,1 L/s, lo que da una diferencia de -3% respecto de las entradas al sistema. Finalmente, en el Salar El Laco se estimaron entradas por 237,3 L/s y salidas por 294,9 L/s, lo que da una diferencia de -24% respecto de las entradas al sistema. Estos valores requieren ser acotados 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 las cuencas 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 entre cuencas vecinas.
- 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 las zonas de humedales apoyan la cuantificación de las descargas por evaporación del sistema.
- 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. 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.

- 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 estas cuencas no registran explotación de agua subterránea, de producirse en el futuro se debe mantener 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

Instalación de punteras al interior de las zonas de descarga por evaporación (salares y napas someras) en las cuencas piloto Salar El Laco y Salar de Aguas Calientes 2, así como mantener un control sobre los niveles en napas someras (hasta 10 m de profundidad) de Laguna Tuyajto. Se recomienda el diseño e implementación de una red de monitoreo que permita estudiar las variaciones espaciales y temporales de los niveles piezométricos existentes en estos sectores, lo cual permitirá estimar con un mayor nivel de confianza las descargas por evaporación y por consiguiente mejorar la resolución de los balances hídricos a nivel de cuenca. Además contribuirá en la comprensión de los sentidos de flujo de las aguas subterráneas y en la interacción existente entre los cuerpos de agua superficial y el acuífero. La red de monitoreo debe ser diseñada de manera de cubrir en forma

homogénea la superficie de interés, pudiendo ser de gran utilidad la instalación de multipiezómetros en los márgenes de salares y en los bordes de lagunas y afloramientos.

- 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 del sistema piloto. En particular en las pampas Puntas Negras, Loma Amarilla y Chamaca, así como en el Cordón Puntas Negras, que corresponden a zonas ubicadas a mayor cota.
 - 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.
 - o 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.

- Medición estacional (seca y húmeda) de isótopos y parámetros químicos más importantes en vertientes y cursos superficiales, para mantener una base de datos actualizada que permita mejorar el entendimiento conceptual de cómo es la dinámica de los recursos hídricos en las cuencas.
- 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.

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.
- 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.
- Bailey, J., Self, S., Wooller, L., Mouginis-Mark, P., 2007. Discrimination of fluvial and eolian features on large ignimbrite sheets around La Pacana Caldera, Chile, using Landsat and SRTM-derived DEM. Remote Sensing of Environment. 108, 24–41.
- Börgel, R., 1983. Geomorfología. Colección Geografía de Chile, Tomo II, Instituto Geográfico Militar, Santiago, Chile.
- Caffe, P., Soler, M., Coira, B., Onoe, A., Cordani, U., 2007. The Granada ignimbrite: A compound pyroclastic unit and its relationship with Upper Miocene caldera volcanism in the northern Puna. Journal of South American Sciences, 25(4), 464-484.
- Cahill, T. y Isacks, B.L., 1992. Seismicity and shape of the subducted Nazca plate. Journal of Geophysical Research, 97, 17.503–17.529.
- Cepeda, A., 1978. Prospección geoquímica de las áreas Salar de Aguas Calientes y Cerro Coquena: prospección y evaluación de elementos polimetálicos, Alta Cordillera, II Región. Instituto de Investigación Geológica, 24 pp., Santiago.
- Charrier, R., Pinto, L., Rodríguez, M.P., 2007. Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. En: The Geology of Chile. Moreno, T. y Gibbons, W. (Eds), Geological Society of London, 2007, pp. 21-114.

- Charrier, 1993. Actas del II Simposio Internacional de Estudios Altiplánicos: El Altiplano, Ciencia y Conciencia en Los Andes, 19 al 21 de Octubre, Arica, Chile. Biblioteca Digital Universidad de Chile, 1993.
- Clark, I., y Fritz, P., 1997. Environmental Isotopes in Hydrogeology. Lewis Publishers, 328 pp.
- 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.
- Coira, B., Kay, S., Viramonte, J., 1993. Upper Cenozoic magmatic evolution of the Argentine Puna - A model for changing subduction geometry. International Geological Review, 35, 677–720.
- Coira, B., Caffe, P.J., Kay, S.M., Diaz, A., Ramirez, A., 1996. The Vilama volcanic complex—an upper Cenozoic caldera system in the Puna, Jujuy. Actas del Congreso Geológico Argentino, 13, 3, 603–620.
- CORFO, Departamento de Recursos Hidráulicos, 1971. Mapa Hidrográfico de Chile.
- Coutand, I., Cobbold, P., de Urreiztieta, M., Gautier, P., Chauvin, A., Gapais, D., Rossello, E., López-Gamundi, O., 2001. Style and history of the Andean deforamtion, Puna plateau, northwestern Argentina. Tectonics, 20(2), 210-234.
- Craig, H., 1961. Isotopic variations in meteoric waters. Science, 133, 1.702.
- Das, D. K., Jarratt, D., McDonald, D., Heberlein, D., 1998. Environmental baseline data collection at Diablillos property, Salta, Argentina. Rescan Environmental Services and Barrick Exploraciones Argentina S.A., 15 pp.
- De Silva, S.L., Self, S., Gardeweg, M., Ramírez, C.F., Francis, P.W., 1988. New observations on La Pacana caldera complex, N. Chile. EOS, Transactions of the American Geophysical Union, 69(44), 14-88.
- De Silva, S.L. y Francis, P.W., 1989. Correlation of large volume ignimbrites two case studies from the Central Andes of northern Chile. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 37(2), 133–149.
- De Silva, S.L., 1987. Large volume explosive silicic volcanism in the Central Andes of North Chile. PhD Thesis, Open University, UK, 409 pp.

- De Silva, S.L., 1989b. Geochronology and stratigraphy of the ignimbrites from the 21°30'S to 23°30'S portion of the central Andes of norhtern Chile. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 37(2), 93–131.
- Dirección General de Aguas (DGA), 2007. Estudio de Disponibilidad Subterránea Cuencas Localizadas entre el Límite de la II Región y la Cuenca del Copiapó. Realizado por DICTUC S.A.
- DICTUC, 2005. Estudio Hidrogeológico Conceptual y Numérico del Funcionamiento de la Cuenca del Salar de Coposa. Informe Técnico.
- Dirección General de Aguas, 1986. Balance Hidrológico Nacional, II Región.
- Dirección General de Aguas, 1987. Balance Hídrico de Chile.
- Dirección General de Aguas, 2007. Coberturas digitales SIG.
- Driscoll, F. y Screens, J., 1986. Groundwater and Wells, second edition. Ed. Smyth Companies.
- Fetter, C. W., 2001. Applied Hydrogeology. Prentice-Hall, 4^a ed., 598 p.
- 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.
- Francis, P.W., Sparks, S.J., Hawkesworth, C.J., Thorpe, R.S., Pyle, D.M., Tait, S.R., Montovani, M.S., McDermott, F., 1989. Petrology and geochemistry of volcanic rocks of the Cerro Galan caldera, northwestern Argentina. Geological Magazine, 126, 515-547.
- García, F., Perez, E., Zeballos, E., 1962. El Ordovícico de Aguada de la Perdiz. Minerales, 17(77), 52-61.
- Gardeweg, M., Ramírez, C.F., 1985. Hoja Río Zapaleri, II Región de Antofagasta. Carta Geológica de Chile Nº66, Servicio Nacional de Geología y Minería, Chile.
- Gardeweg, M., Ramírez, C.F., 1987. The La Pacana caldera and the Atana ignimbrite—a major ash-flow and resurgent caldera complex in the Andes of northern Chile. Bulletin of Volcanology 49, 547–566.
- 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.

GeoAguas Consultores, 2007. Disponibilidad de recursos subterráneos en el sistema Tuyajto, II Región de Antofagasta. Proyecto Mundo. Santiago, Chile.

Golden Software, 1999. Surfer V7.0. http://www.goldensoftware.com/

Google, 2008. Google Earth Plus.

- Götze H-J, Lahmeyer B, Schmidt S, Strunk S. 1994. The lithospheric structure of the Central Andes (20–25S) as inferred from quantitative interpretation of regional gravity, ver Reutter et al., 1994, pp. 23–48
- 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.
- Guest JE., 1969. Upper Tertiary ignimbrites of the Andean Cordillera of part of the Antofagasta Province, northern Chile. Geol. Soc. Am. Bull. 80:337–62
- Hartley, A.J. y Chong, G., 2002. Late Pliocene age for the Atacama Desert: implications for the desertification of western South America. Geology, 30(1), 43–46.
- Hervé, F., Faundez, V., Calderón M., Massone H.J., Willner, A., 2007. Metamorphic and plutonic basement complexes. En: The Geology of Chile. Moreno, T. y Gibbons, W. (Eds), Geological Society of London, 2007, pp. 5-20.
- Instituto Geográfico Militar, 1987. Cartografía de Chile, escala 1:250.000.
- 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.
- Kampf, S., 1999. El clima del Altiplano y los recursos de agua subterránea en el Norte Grande de Chile: una visión comprensiva. Dirección General de Aguas, Chile.
- Kasemann, S., Erzinger, J. and Franz, G., 2000. Boron recycling in the continental crust of the central Andes from the Paleozoic to Mesozoic, NW Argentina. Contributions to Mineralogy and Petrology, 140, 328-343.
- Kay, S., Coira, B., Mpodozis, C., 1995. Neogene magmatic evolution and the shape of the subducting oceanic slab beneath the Central Andean arc. UGG 21st General Assembly, p. A440.

- Kay, S.M., Mpodozis, C., Coira, B., 1999. Magmatism, tectonism, and mineral deposits of the Central Andes (22°–33°S latitude. En: Skinner, B. (Ed.), Geology and Ore Deposits of the Central Andes. Society of Economic Geology Special Publication, 7, 27–59.
- Kley, J., Müller J., Tawackoli, S., Jacobshagen, V., Manutsoglu, E., 1998. Pre-andean and Andean age deformation in the Eastern Cordillera of southern Bolivia. Journal of South American Sciences, 10(1), 1-19.
- Kull, C. y Grosjean, M., 1998. Albedo changes, Milankovitch forcing, and late Quaternary climate changes in the central Andes. Climate Dynamics, 14, 871–881.
- Lahsen A., 1982. Upper Cenozoic volcanism and tectonism in the Andes of northern Chile. Earth Science Reviews, 18, 285 – 302.
- Latorre, C., Betancourt, J. L., Rylander, K. A., Quade, J., Matthei, O., 2003. Avegetation history from the arid prepuna of northern Chile (22–23°S) over the last 13,500 years. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 194, 223–246.
- Lindsay, J. M., 1999. Stratigraphy, age relations and magmatic evolution of large-volume felsic ignimbrites of the La Pacana Caldera, Central Andes, Chile. Scientific technical report STR99/16 Potsdam: Geoforschungszentrum Potsdam 141 pp.
- Lindsay, J.M., de Silva, S., Trumbull, R., Emmermann, R.,Wemmer, K., 2001a. La Pacana caldera, N. Chile: a re-evaluation of the stratigraphy and volcanology of one of the world's largest resurgent calderas. Journal of Volcanology and Geothermal Research 106, 145–173.
- Lindsay, J.M., Schmitt, A.K., Trumbull, R.B., de Silva, S.L., Siebel, W., Emmermann, R., 2001b. Magmatic evolution of the La Pacana Caldera system, Central Andes, Chile: compositional variation of two cogenetic, large-volume felsic ignimbrites and implications for contrasting eruption mechanisms. Journal of Petrology 42, 459–486.
- Linsley, R. K., Kohler, M. A., & Paulhus, J. L. H., 1977. Hidrología para Ingenieros (2nd ed.). Bogotá, Colombia: McGraw-Hill Latinoamericana.
- Marinovic, S., Lahsen, A., 1984. Hoja Calama, II Región de Antofagasta. Carta geológica de Chile N°58. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), Chile.
- Mason, B. G., Pyle, D. M., Oppenheimer, C., 2004. The size and frequency of the largest explosive eruptions on Earth. Bulletin of Volcanology, 66, 735–749.

- Matteini, M., Mazzuoli, R., Omarini, R., Cas, R., Maas, R., 2002a. The geochemical variations of the upper Cenozoic volcanism along the Calama–Olacapato–El Toro transversal fault system in the central Andes (24°S): petrogenetic and geodynamic implications. Tectonophysics, 345, 211–227.
- Matteini, M., Mazzuoli, R., Omarini, R., Cas, R., Maas, R., 2002b. Geodynamical evolution of the Central Andes at 24°S as inferred by magma composition along the Calama-Olacapato-El Toro tranversal volcanic belt. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 118, 205–228.
- Muñoz, N., y Charrier, R., 1996. Uplift of the western border of the Altiplano on a westvergent thrust system, northern Chile. Journal of South American Earth Sciences, 9, 171 181.
- NASA, 1999. Imágenes Satelitales Landsat ETM+.
- Niemeyer, H. y Cereceda, P. 1984. Instituto Geográfico Militar. Geografía de Chile, Tomo VIII, Hidrografía.
- Ort, M.H., 1993. Eruptive processes and caldera formation in a nested downsag-collapse caldera: Cerro Panizos, Central Andes mountains. Journal of Volcanology and Geothermal Research 56, 221–252.
- Ort, M., Coira, B.L., Mazzoni, M.M., 1996. Generation of a crust-mantle magma mixture: magma sources and contamination at Cerro Panizos, central Andes. Contributions to Mineralogy and Petrology 123, 308–322.
- Petrinovic, I.A., 1999. La caldera de colapso del Cerro Aguas Calientes, Salta, Argentina, evolución y esquema estructural. En: Colombo, F., Queralt, I., Petrinovic, I.A. (Eds.), Geología de los Andes centrales meridionales: El Noroeste Argentino. Acta Geológica Hispánica, 34 (2–3), 243–253.
- Ramírez, C.F., Gardeweg, M., 1982. Hoja Toconao, II Región de Antofagasta. Carta Geológica de Chile N°54. Servicio Nacional de Geología y Minería, Chile.
- Ramirez R., C.F.; Gardeweg, M.; Davidson, J.; Pino, H., 1991. Mapa geológico del área de los volcanes Socompa y Pular, Documento de Trabajo Nº4. Servicio Nacional de Geología y Minería.

- Rech, J. A., Quade, J., Betancourt, J. L., 2002. Late Quaternary paleohydrology of the central Atacama Desert (lat 228–248S), Chile. Geological Society of America Bulletin, 114, 334–348.
- Reutter, K.J., Giese, P., Götze, H.J., Scheuber, E., Schwab, K., Schwarz, G. y Wigger, P, 1988. Structure and crustal development of the central Andes between 21° and 25° S. En: The Southern Andes. Bahlburg, H., Breitkreuz, C., Giese, P., (Eds.), Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 231-261.
- Risacher, Alonso y Salazar, 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. N° 51).
- Rutland, R.W.R., Guest, J.E., Grasty, R.L., 1965. Isotopic ages and Andean uplift. Nature, 208, 677–678.
- Salazar, C., Rojas, L., Lillo, A., Aguirre, E., 2001. Análisis de Requerimientos Hídricos de Vegas y Bofedales en el Norte de Chile.
- Scheuber, E. y Reutter, K.J., 1992. Magamtic arc tectonics in the Central Andes between 21° 25° S. Tectonophysics, 205, 127-140.
- Scheuber, E., Bogdanic, T., Jensen, A., Reutter, K.J., 1994. Tectonic development of the north chilean Andes in relation to plate convergence and magmatism since the Jurassic. En: The Southern Central Andes. Reutter, K.J., Scheuber, E., Wigger, P.J., (Eds.) Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 7-21.
- Schmitt, A.K., de Silva, S.L., Trumbull, R.B., Emmermann, R., 2001. Magma evolution in the Purico ignimbrite complex, northern Chile: evidence for zoning of a dacitic magma by injection of rhyolitic melts following mafic recharge. Contributions to Mineralogy and Petrology, 140, 680–700.
- Schmitt, A., Lindsay J., de Silva S., Trumbull R., 2002. U-Pb Zircon chronostratigraphy of early Pliocene ignimbrites from La Pacana, north Chile: implications for the formation of stratified magma chambers. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 120, 43-53.
- Schnurr, W.B.W., Trumbull, R.B., Clavero, J., Hahne, K., Siebel, W., Gardeweg, M., 2007. Twenty-five million years of silicic volcanism in the southern central volcanic zone of the Andes: geochemistry and magma genesis of ignimbrites from 25° to 27°S, 67° to 72° W. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 166, 17–46.

- Seggiaro, R., 1994. Petrología, geoquímica y mecanismos de erupción del Complejo Volcánico Coranzulí. PhD Thesis, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta. 137 pp.
- Servicio Nacional de Geología y Minería, 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.
- Smith R.L. y Bailey R.A., 1968. Resurgent cauldrons. Geological Society of America, Memoir 116, 613-622.
- Soler, M.M., Caffe, P.J., Coira, B.L., Onoe, A.T., Kay, S.M., 2007. Geology of the Vilama caldera: a new interpretation of a large scale explosive event in the Central Andean plateau during the Upper Miocene. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 164, 27–53.
- Sparks, R.S.J., Self, S., Walker, G.P.L., 1973. Products of ignimbrite eruptions. Geology, 1, 115–118.
- Ugarte, M. (2007) Estimación de la evaporación en la cuenca del Salar de Aguas Calientes II, Puna II Región. Memoria de Título, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- 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/.
- Vuille, M. 1996. Zur raumzeitlichen Dynamik von Schneefall und Ausaperung im Bereich des südlichen Altiplano, Sudamerika. Geographica Bernensia. G45. 118 p.
- 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.
- Water Management Consultants, 2006. Evaluación de Impactos Hidrológicos Producto de la Extracción de Agua Subterránea – Proyecto Pampa Colorada. Preparado en el marco del Estudio de Impacto Ambiental Pampa Colorada (EIA Pampa Colorada) para Minera Escondida Ltda. (MEL), operado por BHP Billiton.

- Whitney, M. I., 1978. The role of vorticity in developing lineation by wind erosion. Geological Society of America Bulletin, 89, 1–18.
- Wigger P, Schmitz M, Araneda M, Asch G, Baldzuhn S., 1994. Variation in the crustal structure of the southern Central Andes deduced from seismic refraction investigations. En: The Southern Central Andes. Reutter, K.J., Scheuber, E., Wigger, P.J., (Eds.) Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 23-48.
- Williams, H., 1941. Calderas and their origin. Bulletin of Department of Geological Science, University of California, 25, 239–346.
- 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.

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

- ✓ Camar
- ✓ Socaire
- ✓ Talabre

Estaciones GeoAguas

- ✓ ACS Evaporímetros
- ✓ ACS sector Purichare



Probabilidades de Empíricas de Transición



Estación Socaire Probabilidades Empíricas de Estar en un Estado



Probabilidades de Empíricas de Transición





Probabilidades de Empíricas de Transición



Estación ACS Evaporímetros Probabilidades Empíricas de Estar en un Estado









Probabilidades de Empíricas de Transición



AI.2 Probabilidades de Permanencia en un Estado (S = seco, P = Lluvia) Durante k Días

Estaciones DGA

- ✓ Camar
- ✓ Socaire
- ✓ Talabre

Estaciones GeoAguas

- ✓ ACS Evaporímetros
- ✓ ACS sector Purichare

Estación Camar



Estación Socaire



Estación Talabre










AI.3 Probabilidades de Lluvia a una Determinada Hora

Estaciones GeoAguas

- ✓ Laco Estación Meteorológica
- ✓ Laco Camino Puntas Negras
- ✓ Laguna Tuyajto
- ✓ ACS Evaporímetros
- ✓ ACS sector Purichare
- ✓ Pampa Las Tecas



Probabilidad de lluvia a una determinada hora en Laco Estación Meteorológica.



Probabilidad de lluvia a una determinada hora en Laco Camino Puntas Negras.



Probabilidad de lluvia a una determinada hora en Laguna Tuyajto



Probabilidad de lluvia a una determinada hora en ACS Evaporímetros



Probabilidad de lluvia a una determinada hora en ACS Sector Purichare.



Probabilidad de lluvia a una determinada hora en Pampa Las Tecas.

ANEXO II

"Interpretación Propiedades Hidráulicas de los Acuíferos"

ANEXO II INTERPRETACIÓN PROPIEDADES HIDRÁULICAS DE LOS ACUÍFEROS

En la Tabla 11.1 se presenta la información de los expedientes analizados para caracterizar la zona de estudio de acuerdo a las propiedades hidráulicas de sus acuíferos.

Expediente	Coordenadas UTM (PSAD 1956)		Prof.	NE	Т	Sy	K
(nombre pozo)	Norte	Este	(m)	(m)	(m^2/d)		(m/d)
ND-0202-2370 (PN-1A)	7.379.340	658.100	199,3	39,32	118,00	1,84.10-5	0,738
ND-0202-2370 (PN-5)	7.379.220	659.180	201	34,15	19,20	2,85.10-2	0,115
ND-0202-2371*	7.355.490	648.520	200	110,50	217,00	-	2,425
ND-0202-2374 (PT-1)	7.379.340	658.100	200	83,26	322,00	-	2,039
ND-0202-2374 (PC-2)	7.358.030	652.570	200	67,67	82,25	-	0,622
ND-0202-2398 (PN-2)*	7.380.270	658.040	145	38,36	122,00	-	1,144
ND-0202-2398 (PN-8)	7.380.950	658.400	200	52,10	82,70	$1,18.10^{-4}$	0,559
ND-0202-2399*	7.395.560	645.240	104,5	13,48	110,00	-	1,209
ND-0202-2400	7.379.790	659.290	200	44,25	35,60	1,01.10-3	0,229
ND-0202-2401	7.357.040	654.065	200	88,15	315,89	-	2,824
ND-0202-2402	7.351.010	654.890	200	113,91	122,00	-	1,417
ND-0202-2404 (PC-4)	7.356.320	655.280	200	97,43	63,08	-	0,615
ND-0202-2404 (PT-5)	7.350.020	654.940	200	131,18	100,11	-	1,455
ND-0202-2412 (LA-1)	7.394.030	644.500	202	30,00	14,03	-	0,082
ND-0202-2412 (LA-2)	7.393.160	645.220	200	36,65	92,12	-	0,564
ND-0202-2413	7.391.230	646.380	200	89,89	36,76	-	0,334
ND-0202-2414 (PN-9)	7.381.000	658.000	200	52,10	437,00	9,70·10 ⁻⁴	2,955
ND-0202-2415	7.379.790	659.290	200	44,26	47,80	2,70.10-5	0,307
ND-0202-2416	7.355.420	649.040	206	118,23	406,00	-	4,626

Tabla 11 1. Pro	niedades hidr	áulicas y carac	rterísticas de	los pozos	analizados
1 auta 11.1.110	picuaues mui	auncas y carac	cicitsticas uc	105 00205	ananzauos.

NE: nivel estático; T: transmisividad; Sy: coeficiente de almacenamiento; K: conductividad hidráulica.

* Ajustes revisados de expedientes considerados con una adecuada interpretación. Se mantuvo su valor.

A continuación se presentan los ajustes revisados de los expedientes de pozos en la zona de estudio. Para cada pozo se presenta primero el ajuste realizado por quienes solicitaron los derechos mostrados en la Tabla 11.1 y luego, si se consideró un mejor ajuste, es presentado un segundo gráfico del ajuste de Cooper – Jacob a continuación. Cuando la recarga se alcanzó rapidamente, se aplicó la fórmula descrita en el apartado 8.3 (página 259) para estimar la transmisividad con la prueba de gasto variable.

1. Pozo ND-0202-2370 (PN-1A)



Ajuste original presentado en el expediente.





Figura 11.2: Ajuste expediente ND-0202-2370 (PN-1A). $T = 118 \text{ m}^2/\text{d}$.

2. Pozo ND-0202-2370 (PN-5)



Ajuste original presentado en el expediente.





Figura 11.4: Ajuste corregido ND-0202-2370 (PN-5). T = $19.2 \text{ m}^2/\text{d}$.



3. Pozo ND-0202-2374 (PT-1). Ajuste corregido.



4. Pozo ND-0202-2374 (PC-2). Ajuste corregido.



Figura 11.6: Ajuste corregido ND-0202-2374 (PC-2).

De la Figura 11.6 se observa que el pozo rápidamente se estabiliza (a veinte minutos de iniciada la prueba de gasto constante), por lo que se concluye que la extracción de caudal proviene de alguna recarga. La transmisividad se calculó con la prueba de gasto variable.

ND-0202-2374 (PC-2)						
Nivel [m]	s [m]	Q [L/s]	Q [m ³ /d]			
67,51	0	0	0,00			
85,85	18,34	30	2592,00			
97,26	29,75	40	3456,00			
114,51	47	50	4320,00			
128,96	61,45	62	5356,80			
144,13	76,62	70	6048,00			
T [m ² /d]	82,25					

Tabla 11.2: transmisividad estimada en el pozo ND-0202-2374 (PC-2).

5. Pozo ND-0202-2398 (PN-8)

Ajuste original presentado en el expediente.



Figura 11.7: Ajuste expediente ND-0202-2398 (PN-8). $T = 540 \text{ m}^2/\text{d}.$

Ajuste corregido



Figura 11.8: Ajuste corregido ND-0202-2398 (PN-8). T = $82,7 \text{ m}^2/\text{d}$.

6. Pozo ND-0202-2400

Ajuste original presentado en el expediente.



Figura 11.9: Ajuste expediente ND-0202-2400. T = $204 \text{ m}^2/\text{d}$.

Ajuste corregido



Figura 11.10: Ajuste corregido ND-0202-2400. T = $35,6 \text{ m}^2/\text{d}$.

7. Pozo ND-0202-2401

Ajuste original presentado en el expediente.



Figura 11.11: Ajuste expediente ND-0202-2401. T = $9.520 \text{ m}^2/\text{d}$.

En la Figura 11.11 se observa que el pozo rápidamente se estabiliza (a diez minutos de iniciada la prueba de gasto constante) por lo que se concluye que la extracción de caudal proviene de alguna recarga. La transmisividad se calculó con la prueba de gasto variable.

ND-0202-2401						
Nivel [m]	s [m]	Q [L/s]	Q [m ³ /d]			
88,15	0	0	0			
93,85	5,7	50	4320,0			
95,03	6,88	60	5184,0			
98,25	10,1	70	6048,0			
102,31	14,16	81	6998,4			
113,27	25,12	100	8640,0			
119,50	31,35	110	9504,0			
T [m ² /d]	315,89					

Tabla 11.3: transmisividad para el pozo ND-0202-2401.

8. Pozo ND-0202-2402

Ajuste original presentado en el expediente.



9. Pozo ND-0202-2404 (PC-4)



Ajuste original presentado en el expediente.

De la Figura 11.13 se observa que el pozo rápidamente se estabiliza (a veinte minutos de iniciada la prueba de gasto constante) por lo que se concluye que la extracción de caudal proviene de alguna recarga. La transmisividad se calculó con de la prueba de gasto variable.

ND-0202-2404 (PC4)						
Nivel [m]	s [m]	Q [L/s]	Q [m ³ /d]			
97,43	0,00	0	0			
119,54	22,11	21	1814,4			
134,2	36,77	31	2678,4			
145,17	47,74	43	3715,2			
169,51	72,08	50	4320,0			
171,64	74,21	52	4492,8			
T [m ² /d]	63,08					

Tabla 11.4: Transmisividad para el pozo ND-0202-2404 (PC-4).

10. Pozo ND-0202-2404 (PT-5)



Ajuste original presentado en el expediente.



De la Figura 11.14 se observa que el pozo rápidamente se estabiliza (a veinte minutos de iniciada la prueba de gasto constante) por lo que se concluye que la extracción de caudal proviene de alguna recarga. La transmisividad se calculó con la prueba de gasto variable.

ND-0202-2404 (PT5)						
Nivel [m]	s [m]	Q [L/s]	Q [m ³ /d]			
131,18	0,00	0	0,0			
148,09	16,91	25	2160,0			
153,53	22,35	30	2592,0			
159,08	27,90	35	3024,0			
166,08	34,90	40	3456,0			
171,65	40,47	45	3888,0			
T [m ² /d]	100,11					

Tabla 11.5: Transmisividad para el pozo ND-0202-2404 (PT-5).

11. Pozo ND-0202-2412 (LA1)



Ajuste original presentado en el expediente.

Figura 11.15: Ajuste expediente ND-0202-2412 (LA-1). $T = 130 \text{ m}^2/\text{d}$.

De la Figura 11.15 se observa que el pozo rápidamente se estabiliza (a veinticinco minutos de iniciada la prueba de gasto constante) por lo que se concluye que la extracción de caudal proviene de alguna recarga. La transmisividad se calculó con la prueba de gasto variable.

ND-0202-2412 (LA-1)						
Nivel [m]	s [m]	Q [L/s]	Q [m ³ /d]			
30,00	0,00	0	0,0			
47,74	17,74	5,66	489,0			
56,54	26,54	8,55	738,7			
86,65	56,65	12,85	1110,2			
121,69	91,69	16,58	1432,5			
170,18	140,18	21,85	1887,8			
T [m ² /d]	14,03					

Tabla 11.6: Transmisividad para el pozo ND-0202-2412 (LA-1).

12. Pozo ND-0202-2412 (LA-2)



Ajuste original presentado en el expediente.

Figura 11.16: Ajuste expediente ND-0202-2412 (LA-2).

De la Figura 11.16 se observa que el pozo rápidamente se estabiliza (a veinte minutos de iniciada la prueba de gasto constante) por lo que se concluye que la extracción de caudal proviene de alguna recarga. La transmisividad se calculó con la prueba de gasto variable.

ND-0202-2412 (LA-2)						
Nivel [m]	s [m]	Q [L/s]	Q [m ³ /d]			
36,65	0,00	0	0,0			
55,89	19,24	40,7	3516,5			
62,83	26,18	50,18	4335,6			
71,87	35,22	60,37	5216,0			
103,23	66,58	80,17	6926,7			
124,88	88,23	90,28	7800,2			
T [m ² /d]	92,12					

Tabla 11.7: Transmisividad para el pozo ND-0202-2412 (LA-2).



Ajuste original presentado en el expediente.

Figura 11.17: Ajuste expediente ND-0202-2413.

De la Figura 11.17 se observa que el pozo rápidamente se estabiliza por lo que se concluye que la extracción de caudal proviene de alguna recarga. La transmisividad se calcula a partir de la prueba de gasto variable.

ND-0202-2413						
Nivel [m] s [m] Q [L/s] Q [m ³ /d]						
89,89	0	0	0,0			
104,30	14,41	14,28	1233,8			
108,97	19,08	16,58	1432,5			
116,92	27,03	19,02	1643,3			
127,21	37,32	21,96	1897,3			
137,92	48,03	25,14	2172,1			
163,36	73,47	30	2592,0			
T [m ² /d]	36,76					

Tabla A-7. Transmisividad para el pozo ND-0202-2413.



Ajuste original presentado en el expediente.





Figura 11.19: Ajuste corregido ND-0202-2414. T = $437 \text{ m}^2/\text{d}$.



Ajuste original presentado en el expediente.









Ajuste original presentado en el expediente.





Figura 11.23: Ajuste corregido ND-0202-2416. T = $406 \text{ m}^2/\text{d}$.

ANEXO III

"Niveles en Punteras y Calicatas de Cuencas Piloto

II Región de Antofagasta"

ANEXO III NIVELES EN PUNTERAS Y CALICATAS DE CUENCAS PILOTO II REGIÓN DE ANTOFAGASTA

Ы	Nomhre	UTM		Cota	Prof. Napa
Iu	Nombre	Norte	Este	(msnm)	(mbnt)
1	AC-SW PZ-1	7.397.898	646.193	4.200,06	0,41
2	AC-SW PZ-2	7.397.998	646.154	4.199,90	0,35
3	AC-SW PZ-3	7.397.657	645.450	4.199,96	0,27
4	AC-SW PZ-4	7.397.439	645.540	4.200,81	0,39
5	AC-SW PZ-5	7.397.465	644.769	4.200,30	0,16
6	AC-SW PZ-6	7.397.229	644.797	4.201,19	0,12
7	AC-SW PZ-7	7.397.613	644.323	4.200,35	0,25
8	AC-SW PZ-8	7.397.478	644.174	4.201,50	0,55
9	AC-SW PZ-9	7.398.193	642.957	4.201,77	0,30
10	AC-SW PZ-10	7.398.796	642.812	4.200,04	0,41
11	AC-SW PZ-11	7.398.926	643.394	4.198,70	0,70
12	AC-SW PZ-12	7.399.318	644.202	4.198,51	0,96
13	AC-SW PZ-13	7.399.094	644.556	4.198,50	0,63
14	AC-SW PZ-14	7.397.099	644.328	4.202,55	0,58
15	AC-SW PZ-15	7.397.662	643.715	4.204,59	
16	AC-SW PZ-16	7.399.003	646.493	4.198,50	0,41
17	AC-SW PZ-17	7.397.753	643.754	4.202,43	1,49
18	AC-SW PZ-18	7.397.843	643.801	4.200,54	0,12
19	AC-SW PZ-19	7.397.864	643.294	4.204,14	
20	AC-SW PZ-20	7.397.949	643.323	4.201,66	0,30
21	AC-SW PZ-21	7.398.360	642.852	4.203,78	
22	AC-SW PZ-22	7.398.361	642.959	4.200,14	0,23
23	A-01	7.398.463	642.924	4.199,75	0,19
24	A-03	7.398.602	642.861	4.199,73	0,24
25	A-04	7.397.888	643.666	4.200,68	0,08
26	A-05	7.397.326	644.672	4.200,66	0,09
27	A-06	7.397.390	644.743	4.200,49	0,24
28	A-07	7.397.422	644.932	4.200,26	0,04

Tabla 11.8: Niveles de punteras en cuenca Salar de Aguas Calientes 2.

Ы	Nomhre	UTM		Cota	Profundidad
Iu	Nombre	Norte	Este	(msnm)	(mbnt)
29	A-08	7.397.670	644.842	4.199,76	0,14
30	A-09	7.397.150	644.130	4.202,05	0,20
31	A-10	7.397.833	644.058	4.199,55	0,09
32	AC-SE-PZ-1	7.399.317	654.180	4.202,00	0,41
33	AC-SE-PZ-2	7.398.492	653.803	4.201,50	0,28
34	AC-SE-PZ-3	7.398.278	654.696	4.202,10	0,54
35	AC-SE-PZ-4	7.398.269	654.820	4.203,74	
36	AC-SE-PZ-5	7.396.914	654.382	4.202,26	0,59
37	AC-SE-PZ-6	7.395.373	652.833	4.202,83	0,56
38	AC-SE-PZ-7	7.394.797	651.256	4.201,96	0,55
39	AC-SE-PZ-8	7.394.215	649.819	4.204,62	0,57
40	AC-SE-PZ-9	7.395.003	648.747	4.207,13	0,40
41	AC-SE-PZ-10	7.395.898	648.642	4.203,03	0,06
42	AC-SE-PZ-11	7.395.618	649.072	4.201,09	0,17
43	AC-SE-PZ-12	7.396.633	650.281	4.199,79	0,79
44	AC-SE-PZ-13	7.395.336	650.901	4.200,30	0,33
45	AC-SE-PZ-14	7.396.705	651.836	4.200,03	0,90
46	AC-SE-PZ-15	7.397.714	650.910	4.199,62	1,00

Tabla 11.8: Niveles de punteras en cuenca Salar de Aguas Calientes 2. (Continuación)

Ы	UT	'M	Prof. Napa	Ы	UTM		Prof. Napa
Iu	Norte	Este	(mbnt)	Iu	Norte	Este	(mbnt)
1	7.352.799	644.085	0,00	35	7.354.241	645.278	0,60
2	7.352.808	644.083	0,45	36	7.354.262	645.292	1,41
3	7.352.814	644.080	1,06	37	7.354.290	645.306	1,91
4	7.352.926	644.265	0,00	38	7.354.139	645.334	0,26
5	7.352.941	644.233	0,58	39	7.354.120	645.351	1,38
6	7.352.958	644.220	1,20	40	7.354.112	645.381	2,37
7	7.352.997	644.321	0,24	41	7.354.041	645.153	0,77
8	7.353.004	644.308	0,46	42	7.354.040	645.184	0,68
9	7.353.006	644.307	1,36	43	7.353.998	645.220	0,94
10	7.353.122	644.470	0,00	44	7.353.967	644.840	0,00
11	7.353.129	644.462	0,46	45	7.353.964	644.840	0,16
12	7.353.138	644.456	1,43	46	7.353.926	644.866	1,28
13	7.353.378	644.661	0,00	47	7.353.891	644.897	1,29
14	7.353.359	644.646	0,53	48	7.353.839	644.812	1,08
15	7.353.350	644.629	1,31	49	7.353.816	644.838	0,39
16	7.353.626	644.596	0,00	50	7.353.768	644.885	1,49
17	7.353.627	644.572	0,63	51	7.353.587	644.681	0,25
18	7.353.626	644.553	1,60	52	7.353.557	644.733	0,61
19	7.353.880	644.632	0,19	53	7.353.529	644.771	1,80
20	7.353.882	644.629	0,64	54	7.353.353	644.738	0,00
21	7.353.889	644.613	1,76	55	7.353.350	644.773	0,53
22	7.354.105	644.791	0,11	56	7.353.351	644.821	0,77
23	7.354.107	644.787	0,61	57	7.353.344	644.877	1,16
24	7.354.110	644.785	1,20	58	7.353.207	644.926	0,22
25	7.354.194	644.852	0,00	59	7.353.191	644.960	1,07
26	7.354.210	644.862	0,20	60	7.353.176	644.984	1,54
27	7.354.258	644.879	0,80	61	7.352.819	644.809	0,18
28	7.354.295	644.892	1,58	62	7.352.796	644.859	0,44
29	7.354.206	645.067	0,00	63	7.352.782	644.884	1,07
30	7.354.224	645.071	0,45	64	7.352.753	644.926	1,92
31	7.354.256	645.084	1,10	65	7.352.334	644.772	0,37

Tabla 11.9: Niveles en calicatas en cuenca Laguna Tuyajto.

Id	UTM		Prof. Napa		UTM		Prof. Napa
	Norte	Este	(mbnt)	10	Norte	Este	(mbnt)
32	7.354.301	645.080	1,88	66	7.352.333	644.818	1,19
33	7.354.358	645.080	2,86	67	7.351.812	644.773	0,00
34	7.354.229	645.267	0,19	68	7.351.831	644.894	0,47
69	7.351.797	644.955	1,16	91	7.350.238	643.620	0,12
70	7.351.286	645.502	0,11	92	7.350.216	643.630	0,80
71	7.351.292	645.525	0,88	93	7.350.206	643.632	1,70
72	7.351.304	645.550	2,28	94	7.350.253	643.463	0,00
73	7.351.015	645.455	0,00	95	7.350.230	643.466	0,55
74	7.350.995	645.490	1,18	96	7.350.215	643.461	1,70
75	7.350.988	645.519	1,87	97	7.350.263	643.417	0,31
76	7.351.089	645.326	0,42	98	7.350.254	643.414	0,90
77	7.351.106	645.299	0,25	99	7.350.248	643.408	1,61
78	7.351.122	645.250	0,90	100	7.350.509	643.221	0,11
79	7.351.131	645.234	1,07	101	7.350.489	643.203	0,22
80	7.351.140	645.221	0,28	102	7.350.471	643.184	0,47
81	7.351.061	644.880	0,00	103	7.350.469	643.180	1,12
82	7.351.055	644.910	0,36	104	7.350.665	643.079	0,14
83	7.351.044	644.942	0,62	105	7.350.662	643.068	0,46
84	7.351.009	644.976	0,57	106	7.350.647	643.059	0,50
85	7.350.565	644.521	0,00	107	7.350.944	642.755	0,96
86	7.350.542	644.532	0,41	108	7.350.974	642.734	0,89
87	7.350.505	644.558	0,95	109	7.351.002	642.730	1,00
88	7.350.418	644.148	0,00	110	7.351.048	642.708	0,92
89	7.350.378	644.153	0,40	111	7.351.124	642.695	0,81
90	7.350.334	644.152	0,80	112	7.351.248	642.669	0,66

Tabla 11.9: Niveles en calicatas en cuenca Laguna Tuyajto. (Continuación)

ANEXO VII

"Validación de los Coeficientes C_E y C_I en la Estimación de la Recarga"

ANEXO IV VALIDACIÓN DE LOS COEFICIENTES CE Y CI EN LA ESTIMACIÓN DE LA RECARGA

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 ubican en la I Región, al interior de la cuenca del Salar de Huasco según se muestra en la Figura A 1. La distribución espacial de las unidades litológicas junto con la permeabilidad cualitativa para estas subcuencas se presenta en la Figura A 1.

El valor del coeficiente de escorrentía (C_E) utilizado en este cálculo fue de en 0,13 por tratarse de cuencas altiplánicas. Por otra parte, los valores de los coeficientes de infiltración (C_I) se presentan en la Tabla A 1 en función de la permeabilidad cualitativa.

Tabla A 1: Valores del coeficiente de infiltración (CI) 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

Con el fin de introducir el efecto de la variación espacial de la precipitación en la estimación de la recarga, las subcuencas fueron divididas en bandas de altura de 1.000 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 que se presenta en la Figura A 2.

En el estudio realizado por DICTUC (2005) la recarga se calculó mediante un modelo lluviaescorrentía 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 A 2 y Tabla A 3, respectivamente. Adicionalmente se compara con los resultados obtenidos en otros estudios. La Tabla A 4 y Tabla A 5 presenta el detalle del calculo de la recarga en las subcuencas del Río Piga en Collacagua y Río Collacagua en Peñablanca, respectivamente.

Tabla A 2: Comparación de la recarga anual de largo plazo en Río Piga en Collacagua con otros estudios

Subcuence	Area	PP	Reca	rga Mí	nima	Rec	arga Me	edia	Reca	rga Má	xima
Subcuchca	(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 A 3: Comparación de la recarga anual de largo plazo en Río Collacagua en Peñablanca con otros estudios

Subcuonco	Area	PP	Reca	rga Mí	nima	Rec	arga Me	edia	Reca	rga Má	xima
Subcuchea	(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

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.



Figura A 1: Unidades litológicas y características hidráulicas presentes en las subcuencas del Río Piga en Collacagua y Río Collacagua en Peñablanca (I Región).



Figura A 2: Mapa de isoyetas en la zona del sistema piloto de la I Región.

Tabla A 4: Cálculo de la recarga en la subcuenca del Río Piga en Collacagua.

)))							
		Recarga l	Mínima							
Banda de altura	Unidad Litológica	Permeabilidad	Tipo de Recarga	Área	ЬЬ	C _E C	-	Re	carga	
(mnsm)				(km ²)	(mm/año)		(mm/a	uĩo)	L/s ((M 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	0,0	24 3	33,4	3,0	24,0
	Ignimbritas	Media a Alta	Directa	4,2	139,2	0,2	20 2	27,8	3,7	20,0
	Rocas intrusivas y sedim. mesozoicas, AH	Muy Baja	Lateral	0,2	149,6	0,10 0,0)4	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	0,0	24 3	35,9	48,2	24,0
	Centros y depósitos volc.	Baja	Lateral	14,6	149,6	0,10 0,0	38	1,2	0,6	0,8
	Ignimbritas	Media a Alta	Directa	53,8	149,6	0,0	20 2	29,9	51,1	20,0
	Rocas intrusivas y sedim. mesozoicas, AH	Muy Baja	Lateral	0,5	167,6	0,10 0,0)4	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	0,0	24 4	40,2	16,7	24,0
	Centros y depósitos volc.	Baja	Lateral	15,1	167,6	0,10 0,0	38	1,4	0,7	0,8
	Ignimbritas	Media a Alta	Directa	0,6	167,6	0,0	20 3	33,5	0,6	20,0
5 000 5 148	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	0,5	179,2	0,2	24 4	13,0	0,6	24,0
0.000-0.140	Centros y depósitos volc.	Baja	Lateral	1, 4	179,2	0,10 0,0	38	1,5	0,1	0,8
Cuenca Completa				205,2	153,2		1	19,8 1	28,6	13,1

Tabla A 4: Cálculo de la recarga en la subcuenca del Río Piga en Collacagua. (Continuación)

		Recarga	Media						
Banda de altura	Unidad Litológica	Permeabilidad	Tipo de Recarga	Área	ЪР	$C_{\rm E}$ $C_{\rm I}$	R	ecarga	
(mnsm)				(km^2)	(mm/año)		(mm/año)	L/s	(% PP)
	Centros volc. erosionados, ign. y salar	Media a Baja	Lateral	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
0.000-0.000.0	Centros y depósitos volc.	Baja	Lateral	1,4	179,2	0,13 0,10	2,3	0,1	1,3
Cuenca Completa				205,2	153,2		24,9	162,3	16,5

Tabla A 4: Cálculo de la recarga en la subcuenca del Río Piga en Collacagua. (Continuación)

))						
		Recarga	Máxima						
Banda de altura	Unidad Litológica	Permeabilidad	Tipo de Recarga	Área	ЪР	C _E C _I	ł	Recarga	
(mnsm)				(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 0,13	3 3,9	0,0	2,8
3.908-4.000	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	2,8	139,2	0,3	5 50,1	4,5	36,0
	Ignimbritas	Media a Alta	Directa	4,2	139,2	0,3() 41,8	5,6	30,0
	Rocas intrusivas y sedim. mesozoicas, AH	Muy Baja	Lateral	0,2	149,6	0,16 0,0	5 1,4	0,0	0,9
	Centros volc. erosionados, ign. y salar	Media a Baja	Lateral	43,5	149,6	0,16 0,13	8 4,2	5,8	2,8
4.000-4.500	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	42,3	149,6	0,3(5 53,8	72,3	36,0
	Centros y depósitos volc.	Baja	Lateral	14,6	149,6	0,16 0,13	2 2,8	1,3	1,9
	Ignimbritas	Media a Alta	Directa	53,8	149,6	0,3() 44,9	76,6	30,0
	Rocas intrusivas y sedim. mesozoicas, AH	Muy Baja	Lateral	0,5	167,6	0,16 0,0	5 1,6	0'0	6,0
	Centros volc. erosionados, ign. y salar	Media a Baja	Lateral	12,3	167,6	0,16 0,13	8 4,7	1,8	2,8
4.500-5.000	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	13,1	167,6	0,3(5 60,3	25,1	36,0
	Centros y depósitos volc.	Baja	Lateral	15,1	167,6	0,16 0,13	2 3,1	1,5	1,9
	Ignimbritas	Media a Alta	Directa	0,6	167,6	0,3() 50,3	0,9	30,0
5 000 5 148	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	0,5	179,2	0,3(5 64,5	0,9	36,0
0+1.0-000.0	Centros y depósitos volc.	Baja	Lateral	1,4	179,2	0,16 0,13	2 3,4	0,2	1,9
Cuenca Completa				205,2	153,2		30,2	196,5	19,9

Tabla A 5: Cálculo de la recarga en la subcuenca del Río Collacagua en Peñablanca.

	•)								
		Recarga	Mínima							
Banda de altura	Unidad Litológica	Permeabilidad	Tipo de Recarga	Área	ЬР	C _E C		Re	scarga	
(mnsm)				(km^2)	(mm/año)		(mm/i	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	4	0,6	0,1	0,4
	Centros volc. erosionados, ign. y salar	Media a Baja	Lateral	85,5	150,1	0,10 0,1	5	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 $0,0$	×	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	4	0,7	0,1	0,4
	Centros volc. erosionados, ign. y salar	Media a Baja	Lateral	22,2	157,2	0,10 $0,1$	5	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 $0,0$	×	1,3	6,0	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 $0,0$	4	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 $0,0$	8	1, 4	0,1	0,8
Cuenca Completa				518,4	150,5			22,0	361,4	14,7

Tabla A 5: Cálculo de la recarga en la subcuenca del Río Collacagua en Peñablanca. (Continuación)

))		,		κ.			
		Recarga	Media						
Banda de altura	Unidad Litológica	Permeabilidad	Tipo de Recarga	Área	ЪР	$C_{\rm E}$ $C_{\rm I}$	ł	tecarga	
(mnsm)				(km^2)	(mm/año)		(mm/año)	L/s	(% PP)
	Centros volc. erosionados, ign. y salar	Media a Baja	Lateral	4,0	139,9	0,13 0,15	5 2,7	0,3	2,0
3.847-4.000	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	17,8	139,9	0,3() 42,0	23,7	30,0
	Ignimbritas	Media a Alta	Directa	34,9	139,9	0,25	35,0	38,7	25,0
	Rocas intrusivas y sedim. mesozoicas, AH	Muy Baja	Lateral	3,6	150,1	0,13 0,05	5 1,0	0,1	0,7
	Centros volc. erosionados, ign. y salar	Media a Baja	Lateral	85,5	150,1	0,13 0,15	5 2,9	7,9	2,0
4.000-4.500	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	77,6	150,1	0,3() 45,0	110,8	30,0
	Centros y depósitos volc.	Baja	Lateral	24,2	150,1	0,13 0,10) 2,0	1,5	1,3
	Ignimbritas	Media a Alta	Directa	170,7	150,1	0,25	37,5	203,1	25,0
	Rocas intrusivas y sedim. mesozoicas, AH	Muy Baja	Lateral	4,9	157,2	0,13 0,05	5 1,0	0,2	0,7
	Centros volc. erosionados, ign. y salar	Media a Baja	Lateral	22,2	157,2	0,13 0,15	3,1	2,2	2,0
4.500-5.000	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	13,9	157,2	0,3() 47,2	20,7	30,0
	Centros y depósitos volc.	Baja	Lateral	22,2	157,2	0,13 0,10) 2,0	1,4	1,3
	Ignimbritas	Media a Alta	Directa	34,5	157,2	0,25	39,3	43,0	25,0
	Rocas intrusivas y sedim. mesozoicas, AH	Muy Baja	Lateral	0,7	166,0	0,13 0,05	5 1,1	0,0	0,7
5.000-5.200	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	0,5	166,0	0,3() 49,8	0,7	30,0
	Centros y depósitos volc.	Baja	Lateral	1,5	166,0	0,13 0,10) 2,2	0,1	1,3
Cuenca Completa				518,4	150,5		27,7	454,5	18,5
					1	1			

Tabla A 5: Cálculo de la recarga en la subcuenca del Río Collacagua en Peñablanca. (Continuación)

))		,						
		Recarga	Máxima							
Banda de altura	Unidad Litológica	Permeabilidad	Tipo de Recarga	Área	ЬР	C_E	C_{I}	R	ecarga	
(msmn)				(km^2)	(mm/año))	mm/año)	L/s	(% PP)
	Centros volc. erosionados, ign. y salar	Media a Baja	Lateral	4,0	139,9	0,16 (0,18	3,9	0,5	2,8
3.847-4.000	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	17,8	139,9	C	0,36	50,4	28,4	36,0
	Ignimbritas	Media a Alta	Directa	34,9	139,9	C	0,30	42,0	46,5	30,0
	Rocas intrusivas y sedim. mesozoicas, AH	Muy Baja	Lateral	3,6	150,1	0,16 (0,06	1,4	0,2	0,9
	Centros volc. erosionados, ign. y salar	Media a Baja	Lateral	85,5	150,1	0,16 (0,18	4,2	11,4	2,8
4.000-4.500	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	77,6	150,1	C	0,36	54,1	133,0	36,0
	Centros y depósitos volc.	Baja	Lateral	24,2	150,1	0,16 (0,12	2,8	2,2	1,9
	Ignimbritas	Media a Alta	Directa	170,7	150,1	•	0,30	45,0	243,8	30,0
	Rocas intrusivas y sedim. mesozoicas, AH	Muy Baja	Lateral	4,9	157,2	0,16 (0,06	1,5	0,2	0,9
	Centros volc. erosionados, ign. y salar	Media a Baja	Lateral	22,2	157,2	0,16 (0,18	4,4	3,1	2,8
4.500-5.000	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	13,9	157,2	C	0,36	56,6	24,9	36,0
	Centros y depósitos volc.	Baja	Lateral	22,2	157,2	0,16 (0,12	2,9	2,1	1,9
	Ignimbritas	Media a Alta	Directa	34,5	157,2	•	0,30	47,2	51,6	30,0
	Rocas intrusivas y sedim. mesozoicas, AH	Muy Baja	Lateral	0,7	166,0	0,16 (0,06	1,6	0,0	0,9
5.000-5.200	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	0,5	166,0	C	0,36	59,8	0,9	36,0
	Centros y depósitos volc.	Baja	Lateral	1,5	166,0	0,16 (0,12	3,1	0,2	1,9
Cuenca Completa				518,4	150,5			33,4	548,8	22,3

ANEXO V

"Detalle del Cálculo de la Recarga en las Cuencas del Sistema Piloto"

ANEXO V DETALLE DEL CÁLCULO DE LA RECARGA EN LAS CUENCAS DEL SISTEMA PILOTO

Cuencas Piloto II Región

- ✓ Aguas Calientes 2
- ✓ Salar de El Laco
- ✓ Laguna Tuyajto
- ✓ Puntas Negras
- ✓ Pampa Las Tecas
- ✓ Pampa Colorada

Cálculo de la recarga en la cuenca del Salar de Aguas Calientes 2 – II Región.

	R	tecarga Mínima	-							
Banda de altura	Unidad Litológica	Permeabilidad T	ipo de Recarga	Área	ЪР	\mathbf{C}_{E}	\mathbf{C}_{I}	Ree	carga	
(msm)				(km ²) ((mm/año)		(mm)	/año)	(L/s) ((dd %
	Rocas Volc Erosionadas, Ign Cuaternarias, Salares	Media a Baja	Lateral	205,7	150,9	0,10 (0,12	1,9	12,3	1,2
1165 / 500	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	154,5	150,9	U	0,24	36,2	177,4	24,0
4.102-4-200	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	54,0	150,9	0,10 (0,08	1,3	2,2	0,8
	Ignimbritas Terciarias	Media a Alta	Directa	73,2	150,9	U	0,20	30,2	70,0	20,0
	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Muy Baja	Lateral	7,8	165,5	0,10 (0,04	0,7	0,2	0,4
	Rocas Volc Erosionadas, Ign Cuaternarias, Salares	Media a Baja	Lateral	39,2	165,5	0,10 (0,12	2,1	2,6	1,2
4.500-5.000	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	67,7	165,5	U	0,24	39,7	85,3	24,0
	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	197,2	165,5	0,10 (0,08	1,4	8,6	0,8
	Ignimbritas Terciarias	Media a Alta	Directa	73,4	165,5	U	0,20	33,1	77,0	20,0
	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Muy Baja	Lateral	16,0	182,9	0,10 (0,04	0,8	0,4	0,4
5.000-5.500	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	5,0	182,9	U	0,24	43,9	7,0	24,0
	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	75,2	182,9	0,10 (0,08	1,5	3,6	0,8
5 500 6 033	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	0,0	200,7)	0,24	48,2	0,0	24,0
CZ0.0-00C.C	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	6,2	200,7	0,10 (),08	1,7	0,3	0,8
Cuenca Completa				975,2	160,2			14,5 4	146,9	9,2

Cálculo de la recarga en la cuenca del Salar de Aguas Calientes 2 – II Región. (Continuación)

		Recarga Media							
Banda de altura	Unidad Litológica	Permeabilidad Ti	po de Recarga	Área	ЪР	$C_{\rm E}$ $C_{\rm I}$	Rec	arga	
(msnm)				(km ²) ((mm/año)	(1	mm/año) ((1/s) ((dd %
	Rocas Volc Erosionadas, Ign Cuaternarias, Salares	Media a Baja	Lateral	205,7	150,9	0,13 0,15	2,9	19,2	2,0
1165 1 500	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	154,5	150,9	0,30	45,3 2	21,8	30,0
4.100-4-200	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	54,0	150,9	0,13 $0,10$	2,0	3,4	1,3
	Ignimbritas Terciarias	Media a Alta	Directa	73,2	150,9	0,25	37,7	87,5	25,0
	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Muy Baja	Lateral	7,8	165,5	0,13 0,05	1,1	0,3	0,7
	Rocas Volc Erosionadas, Ign Cuaternarias, Salares	Media a Baja	Lateral	39,2	165,5	0,13 0,15	3,2	4,0	2,0
4.500-5.000	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	67,7	165,5	0,30	49,7	06,6	30,0
	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	197,2	165,5	0,13 0,10	2,2	13,5	1,3
	Ignimbritas Terciarias	Media a Alta	Directa	73,4	165,5	0,25	41,4	96,3	25,0
	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Muy Baja	Lateral	16,0	182,9	0,13 0,05	1,2	0,6	0,7
5.000-5.500	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	5,0	182,9	0,30	54,9	8,8	30,0
	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	75,2	182,9	0,13 $0,10$	2,4	5,7	1,3
5 500 6 073	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	0,0	200,7	0,30	60,2	0,0	30,0
CZN.0-000.0	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	\mathbf{Baja}	Lateral	6,2	200,7	0,13 $0,10$	2,6	0,5	1,3
Cuenca Completa				975,2	160,2		18,4 5	68,0	11,7

Cálculo de la recarga en la cuenca del Salar de Aguas Calientes 2 – II Región. (Continuación)

	R	ecarga Máxima	-							
Banda de altura	Unidad Litológica	Permeabilidad Ti	ipo de Recarga	Área	ЪР	C_{E}	C.	Re	carga	
(mnsm)				(km^2)	(mm/año)		(m	um/año)	(L/s)	(dd %)
	Rocas Volc Erosionadas, Ign Cuaternarias, Salares	Media a Baja	Lateral	205,7	150,9	0,16 (),18	4,2	27,6	2,8
165 1 500	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	154,5	150,9	U),36	54,3	266,1	36,0
4.100-4-200	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	54,0	150,9	0,16 (),12	2,8	4,8	1,9
	Ignimbritas Terciarias	Media a Alta	Directa	73,2	150,9	U),30	45,3	105,0	30,0
	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Muy Baja	Lateral	7,8	165,5	0,16 (),06	1,5	0,4	0,9
	Rocas Volc Erosionadas, Ign Cuaternarias, Salares	Media a Baja	Lateral	39,2	165,5	0,16 (),18	4,6	5,8	2,8
4.500-5.000	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	67,7	165,5	U),36	59,6	127,9	36,0
	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	\mathbf{Baja}	Lateral	197,2	165,5	0,16 (),12	3,1	19,4	1,9
	Ignimbritas Terciarias	Media a Alta	Directa	73,4	165,5	U),30	49,7	115,5	30,0
	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Muy Baja	Lateral	16,0	182,9	0,16 (),06	1,7	0,9	0,9
5.000-5.500	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	5,0	182,9	U),36	62,9	10,5	36,0
	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	75,2	182,9	0,16 (),12	3,4	8,2	1,9
5 500 6 0 <u>7</u> 3	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	0,0	200,7)),36	72,3	0,0	36,0
CZN.0-00C.C	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	\mathbf{Baja}	Lateral	6,2	200,7	0,16 (),12	3,8	0,7	1,9
Cuenca Completa				975,2	160,2			22,4	692,9	14,3

Cálculo de la recarga en la cuenca del Salar El Laco – II Región.

		Recarga Mínim	а							
Banda de altura	Unidad Litológica	Permeabilidad 7	lipo de Recarga	Área	ЪР	C_E	CI	Re	scarga	
(mnsm)				(km ²) (mm/año)		(n	nm/año)	(L/s) ((M PP)
	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Muy Baja	Lateral	1,2	198,9	0,10	0,04	0,8	0,0	0,4
	Rocas Volc Erosionadas, Ign Cuaternarias, Salares	Media a Baja	Lateral	28,4	198,9	0,10	0,12	2,5	2,2	1,2
4.219-4.500	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	43,2	198,9		0,24	47,7	65,3	24,0
	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	13,7	198,9	0,10	0,08	1,7	0,7	0,8
	Ignimbritas Terciarias	Media a Alta	Directa	56,4	198,9		0,20	39,8	71,2	20,0
	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Muy Baja	Lateral	6,9	216,7	0,10	0,04	0,9	0,2	0,4
	Rocas Volc Erosionadas, Ign Cuaternarias, Salares	Media a Baja	Lateral	33,1	216,7	0,10	0,12	2,7	2,8	1,2
4.500-5.000	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	9,6	216,7		0,24	52,0	15,8	24,0
	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	49,0	216,7	0,10	0,08	1,8	2,8	0,8
	Ignimbritas Terciarias	Media a Alta	Directa	18,7	216,7		0,20	43,3	25,7	20,0
	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Muy Baja	Lateral	1,4	239,5	0,10	0,04	1,0	0,0	0,4
	Rocas Volc Erosionadas, Ign Cuaternarias, Salares	Media a Baja	Lateral	0,0	239,5	0,10	0,12	3,0	0,0	1,2
000.0-000.0	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	0,1	239,5		0,24	57,5	0,1	24,0
	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	8,7	239,5	0,10	0,08	2,0	0,5	0,8
5.500-5.858	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	0,5	259,1	0,10	0,08	2,2	0,0	0,8
Cuenca Completa				270,8	208,3			21,8	187,5	10,7

Cálculo de la recarga en la cuenca del Salar El Laco – Il Región. (Continuación)

		Recarga Media								
Banda de altura	Unidad Litológica	Permeabilidad T	ipo de Recarga	Área	ЪР	C_{E}	Cı	Re	scarga	
(mnsm)				(km ²) (mm/año)		(n	nm/año)	(L/s)	(44 %)
	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Muy Baja	Lateral	1,2	198,9	0,13	0,05	1,3	0,1	0,7
	Rocas Volc Erosionadas, Ign Cuaternarias, Salares	Media a Baja	Lateral	28,4	198,9	0,13	0,15	3,9	3,5	2,0
4.219-4.500	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	43,2	198,9		0,30	59,7	81,7	30,0
	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	13,7	198,9	0,13	0,10	2,6	1,1	1,3
	Ignimbritas Terciarias	Media a Alta	Directa	56,4	198,9		0,25	49,7	89,0	25,0
	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Muy Baja	Lateral	6,9	216,7	0,13	0,05	1,4	0,3	0,7
	Rocas Volc Erosionadas, Ign Cuaternarias, Salares	Media a Baja	Lateral	33,1	216,7	0,13	0,15	4,2	4,4	2,0
4.500-5.000	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	9,6	216,7		0,30	65,0	19,7	30,0
	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	49,0	216,7	0,13	0,10	2,8	4,4	1,3
	Ignimbritas Terciarias	Media a Alta	Directa	18,7	216,7		0,25	54,2	32,1	25,0
	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Muy Baja	Lateral	1,4	239,5	0,13	0,05	1,6	0,1	0,7
	Rocas Volc Erosionadas, Ign Cuaternarias, Salares	Media a Baja	Lateral	0,0	239,5	0,13	0,15	4,7	0,0	2,0
000.0-000.0	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	0,1	239,5		0,30	71,8	0,1	30,0
	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	8,7	239,5	0,13	0,10	3,1	0,9	1,3
5.500-5.858	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	0,5	259,1	0,13	0,10	3,4	0,1	1,3
Cuenca Completa				270,8	208,3			27,6	237,3	13,6

Cálculo de la recarga en la cuenca del Salar El Laco – Il Región. (Continuación)

	α	ecarga Máxin	na							
		noui ga man	110							
Banda de altura	Unidad Litológica	Permeabilidad	Tipo de Recarga	Área	Ы	C_E	Ū	Re	scarga	
(mnsm)				(km^2)	(mm/año)		(n	nm/año)	(L/s)	(dd %)
	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Muy Baja	Lateral	1,2	198,9	0,16	0,06	1,9	0,1	0,9
	Rocas Volc Erosionadas, Ign Cuaternarias, Salares	Media a Baja	Lateral	28,4	198,9	0,16	0,18	5,6	5,0	2,8
4.219-4.500	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	43,2	198,9		0,36	71,6	98,0	36,0
	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	13,7	198,9	0,16	0,12	3,7	1,6	1,9
	Ignimbritas Terciarias	Media a Alta	Directa	56,4	198,9		0,30	59,7	106,8	30,0
	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Muy Baja	Lateral	6,9	216,7	0,16	0,06	2,0	0,4	0,9
	Rocas Volc Erosionadas, Ign Cuaternarias, Salares	Media a Baja	Lateral	33,1	216,7	0,16	0,18	6,1	6,4	2,8
4.500-5.000	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	9,6	216,7		0,36	78,0	23,6	36,0
	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	49,0	216,7	0,16	0,12	4,1	6,3	1,9
	Ignimbritas Terciarias	Media a Alta	Directa	18,7	216,7		0,30	65,0	38,5	30,0
	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Muy Baja	Lateral	1,4	239,5	0,16	0,06	2,2	0,1	0,9
	Rocas Volc Erosionadas, Ign Cuaternarias, Salares	Media a Baja	Lateral	0,0	239,5	0,16	0,18	6,7	0,0	2,8
006.6-000.6	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	0,1	239,5		0,36	86,2	0,1	36,0
	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	8,7	239,5	0,16	0,12	4,5	1,2	1,9
5.500-5.858	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	0,5	259,1	0,16	0,12	4,8	0,1	1,9
Cuenca Completa				270,8	208,3			33,6	288,3	16,5

II Región.	
una Tuyajto –]	
enca de la Lag	
arga en la cue	
Cálculo de la rec	

		Recarga Mínin	na							
Banda de altura	Unidad Litológica	Permeabilidad	Tipo de Recarga	Área	ЪР	C _E C	ľ	Rec	ırga	
(msnm)				(km ²) (mm/año)		(mm/añ	io) (I	%) (%)	(PP)
	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Muy Baja	Lateral	5,7	195,9	0,10 0,0)4 0),8	0,1	0,4
	Rocas Volc Erosionadas, Ign Cuaternarias, Salares	Media a Baja	Lateral	29,4	195,9	0,10 0,	12 2	4,	2,3	1,2
4.033-4.500	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	54,4	195,9	0,	24 47	7,0 8	81,1	24,0
	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	25,0	195,9	0,10 0,0	1 18	1,6	1,3	0,8
	Ignimbritas Terciarias	Media a Alta	Directa	5,5	195,9	0,0	20 35),2	6,9	20,0
	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Muy Baja	Lateral	3,1	218,2	0,10 0,0)4 0	6'(0,1	0,4
	Rocas Volc Erosionadas, Ign Cuaternarias, Salares	Media a Baja	Lateral	15,4	218,2	0,10 0,	12 2	2,7	1,3	1,2
4.500-5.000	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	14,7	218,2	0,0	24 52	4,	24,4	24,0
	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	45,9	218,2	0,10 0,0	1 18	1,8	2,6	0,8
	Ignimbritas Terciarias	Media a Alta	Directa	1,6	218,2	0,	20 43	3,6	2,3	20,0
	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Muy Baja	Lateral	2,3	241,1	0,10 0,0)4 1	1,0	0,1	0,4
5.000-5.500	Rocas Volc Erosionadas, Ign Cuaternarias, Salares	Media a Baja	Lateral	1,2	241,1	0,10 0,	12 3	3,0	0,1	1,2
	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	42,3	241,1	0,10 0,0	38 2	2,0	2,7	0,8
5.500-5.869	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	2,2	261,1	0,10 0,0	38 2	2,2	0,2	0,8
Cuenca Completa				248,6	212,0		15	5,9 12	25,4	7,9

		Kecarga Medi	a							
Banda de altura	Unidad Litológica	Permeabilidad	Tipo de Recarga	Área	Ы	$_{\rm C}^{\rm E}$	(7)	Reci	arga	
(msnm)				(km ²) (mm/año)		(mm/aî	io) (I	(%) (%)	(PP)
	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Muy Baja	Lateral	5,7	195,9	0,13 0	,05	1,3	0,2	0,7
	Rocas Volc Erosionadas, Ign Cuaternarias, Salares	Media a Baja	Lateral	29,4	195,9	0,13 0	,15	3,8	3,6	2,0
4.033-4.500	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	54,4	195,9	0	30 58	3,8 1(01,3	30,0
	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	25,0	195,9	0,13 0	10	2,5	2,0	1,3
	Ignimbritas Terciarias	Media a Alta	Directa	5,5	195,9	0	,25 49	9,0	8,6	25,0
	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Muy Baja	Lateral	3,1	218,2	0,13 0	.05	1,4	0,1	0,7
	Rocas Volc Erosionadas, Ign Cuaternarias, Salares	Media a Baja	Lateral	15,4	218,2	0,13 0	,15 4	t,3	2,1	2,0
4.500-5.000	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	14,7	218,2	0	30 65	5,5	30,5	30,0
	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	45,9	218,2	0,13 0	10	8,3	4,1	1,3
	Ignimbritas Terciarias	Media a Alta	Directa	1,6	218,2	0	,25 54	t,5	2,8	25,0
	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Muy Baja	Lateral	2,3	241,1	0,13 0	02	9'1	0,1	0,7
5.000-5.500	Rocas Volc Erosionadas, Ign Cuaternarias, Salares	Media a Baja	Lateral	1,2	241,1	0,13 0	,15 4	t,7	0,2	2,0
	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	42,3	241,1	0,13 0	,10	3,1	4,2	1,3
5.500-5.869	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	2,2	261,1	0,13 0	,10	3,4	0,2	1,3
Cuenca Completa				248,6	212,0		2(),3 1(50,1	10,0

Cálculo de la recarga en la cuenca de la Laguna Tuyajto – II Región. (Continuación)

		kecarga Máxin	Ja						
Banda de altura	Unidad Litológica	Permeabilidad	Tipo de Recarga	Área	ЪР	$C_{\rm E}$ $C_{\rm I}$	Re	carga	
(msnm)				(km ²) (mm/año)	()	mm/año)	(L/s) ((4 M)
	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Muy Baja	Lateral	5,7	195,9	0,16 $0,06$	1,8	0,3	0,9
	Rocas Volc Erosionadas, Ign Cuaternarias, Salares	Media a Baja	Lateral	29,4	195,9	$0,16 \ 0,18$	5,5	5,1	2,8
4.033-4.500	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	54,4	195,9	0,36	70,5	121,6	36,0
	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	25,0	195,9	0,16 0,12	3,7	2,9	1,9
	Ignimbritas Terciarias	Media a Alta	Directa	5,5	195,9	0,30	58,8	10,3	30,0
	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Muy Baja	Lateral	3,1	218,2	0,16 $0,06$	2,0	0,2	0,9
	Rocas Volc Erosionadas, Ign Cuaternarias, Salares	Media a Baja	Lateral	15,4	218,2	$0,16\ 0,18$	6,1	3,0	2,8
4.500-5.000	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	14,7	218,2	0,36	78,5	36,6	36,0
	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	45,9	218,2	0,16 $0,12$	4,1	5,9	1,9
	Ignimbritas Terciarias	Media a Alta	Directa	1,6	218,2	0,30	65,5	3,4	30,0
	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Muy Baja	Lateral	2,3	241,1	0,16 $0,06$	2,3	0,2	0,9
5.000-5.500	Rocas Volc Erosionadas, Ign Cuaternarias, Salares	Media a Baja	Lateral	1,2	241,1	$0,16\ 0,18$	6,8	0,2	2,8
	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	42,3	241,1	$0,16 \ 0,12$	4,5	6,1	1,9
5.500-5.869	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	2,2	261,1	0,16 $0,12$	4,9	0,3	1,9
Cuenca Completa				248,6	212,0		24,9	196,2	12,3

Cálculo de la recarga en la cuenca de la Laguna Tuyajto – II Región. (Continuación)

Cálculo de la recarga en la cuenca de Puntas Negras - II Región.

	H	Recarga Mínim	а						
Banda de altura	Unidad Litológica	Permeabilidad 7	lipo de Recarga	Área	ЬЬ	C _E C _I	ł	tecarga	
(msnm)				(km ²) ((mm/año)		(mm/año)	(L/s)	(% PP)
	Rocas Volc Erosionadas, Ign Cuaternarias, Salares	Media a Baja	Lateral	12,7	194,2	0,10 0,1	2 2,4	1,0	1,2
1 252 1 500	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	14,7	194,2	0,2	4 46,6	21,8	24,0
000.4-000.4	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	16,6	194,2	0,10 $0,0$	8 1,6	0,9	0,8
	Ignimbritas Terciarias	Media a Alta	Directa	17,9	194,2	0,2) 38,8	22,1	20,0
	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Muy Baja	Lateral	0,1	207,1	0,10 0,0	4 0,9	0,0	0,4
	Rocas Volc Erosionadas, Ign Cuaternarias, Salares	Media a Baja	Lateral	7,5	207,1	0,10 0,1	2 2,6	0,6	1,2
4.500-5.000	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	4,4	207,1	0,2	4 49,7	6,9	24,0
	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	71,3	207,1	0,10 $0,0$	8 1,7	3,9	0,8
	Ignimbritas Terciarias	Media a Alta	Directa	37,4	207,1	0,2	0 41,4	49,2	20,0
5 000 5 500	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Muy Baja	Lateral	0,5	228,9	0,10 $0,0$	4 1,0	0,0	0,4
000.0-000.0	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	16,8	247,6	0,10 0,0	8 2,1	1,1	0,8
5.500-5.877	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	1,0	227,8	0,10 0,0	8 1,9	0,1	0,8
Cuenca Completa				201,1	204,8		16,9	107,5	8,4

		Recarga Media								
Banda de altura	Unidad Litológica	Permeabilidad Ti	ipo de Recarga	Área	ЪР	C_E	C_{I}	R	ecarga	
(msnm)				(km ²) ((mm/año)		(1	nm/año)	(L/s)	(% PP)
	Rocas Volc Erosionadas, Ign Cuaternarias, Salares	Media a Baja	Lateral	12,7	194,2	0,13	0,15	3,8	1,5	2,0
1 353 1 500	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	14,7	194,2		0,30	58,3	27,2	30,0
000.4-000.4	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	16,6	194,2	0,13	0,10	2,5	1,3	1,3
	Ignimbritas Terciarias	Media a Alta	Directa	17,9	194,2		0,25	48,6	27,6	25,0
	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Muy Baja	Lateral	0,1	207,1	0,13	0,05	1,3	0,0	0,7
	Rocas Volc Erosionadas, Ign Cuaternarias, Salares	Media a Baja	Lateral	7,5	207,1	0,13	0,15	4,0	1,0	2,0
4.500-5.000	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	4,4	207,1		0,30	62,1	8,7	30,0
	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	71,3	207,1	0,13	0,10	2,7	6,1	1,3
	Ignimbritas Terciarias	Media a Alta	Directa	37,4	207,1		0,25	51,8	61, 4	25,0
5 000 5 500	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Muy Baja	Lateral	0,5	228,9	0,13	0,05	1,5	0,0	0,7
000.0-000.0	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	16,8	247,6	0,13	0,10	3,2	1,7	1,3
5.500-5.877	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	1,0	227,8	0,13	0,10	3,0	0,1	1,3
Cuenca Completa				201,1	204,8			21,4	136,7	10,6

Cálculo de la recarga en la cuenca de Puntas Negras - II Región. (Continuación)

	R	tecarga Máxin	Ja							
Banda de altura	Unidad Litológica	Permeabilidad	Tipo de Recarga	Área	ЪР	C _E C	r	Reca	rga	
(msnm)				(km ²) ((mm/año)		(mm)	/año) (L	/s) (%	6 PP)
	Rocas Volc Erosionadas, Ign Cuaternarias, Salares	Media a Baja	Lateral	12,7	194,2	0,16 0,1	18 5,	,5 2	,2	2,8
1 353 1 500	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	14,7	194,2	0,3	36 69	9,9 32	2,7 3	36,0
000.4-000.4	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	16,6	194,2	0,16 0,1	12 3,	,6 1	6,	1,9
	Ignimbritas Terciarias	Media a Alta	Directa	17,9	194,2	0,3	30 58	3,3 33	3,2 3	30,0
	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Muy Baja	Lateral	0,1	207,1	0,16 0,0	06 1.	.0 6	.0	0,9
	Rocas Volc Erosionadas, Ign Cuaternarias, Salares	Media a Baja	Lateral	7,5	207,1	0,16 0,1	18 5.	.8 1	4	2,8
4.500-5.000	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	4,4	207,1	0,3	36 74	t,5 1(),4 3	36,0
	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	71,3	207,1	0,16 0,1	12 3.	8	8,	1,9
	Ignimbritas Terciarias	Media a Alta	Directa	37,4	207,1	0,3	30 62	2,1 73	3,7 3	30,0
	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Muy Baja	Lateral	0,5	228,9	0,16 0,0	06 2,	,1 0	.0	0,9
000.0-000.0	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	16,8	247,6	0,16 0,1	12 4,	,6 2	,5	1,9
5.500-5.877	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	1,0	227,8	0,16 0,1	12 4,	,3 0	,1	1,9
Cuenca Completa				201,1	204,8		26	5,2 16	6,9 1	13,0

Cálculo de la recarga en la cuenca de Puntas Negras - II Región. (Continuación)

Cálculo de la recarga en la cuenca de Pampa Las Tecas - II Región.

	R	tecarga Mínim	la						
Banda de altura	Unidad Litológica	Permeabilidad	Tipo de Recarga	Área	ЬР	$C_{\rm E}$ $C_{\rm I}$	F	tecarga	
(msm)				(km ²) (mm/año)		(mm/año)	(L/s)	(% PP)
	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Muy Baja	Lateral	7,8	192,7	$0,10$ $0,0^{2}$	4 0,8	0,2	0,4
1 1 9 1 4 500	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	28,7	192,7	$0,2^{2}$	4 46,3	42,0	24,0
4.101-4-700	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	4,0	192,7	0,10 0,08	3 1,6	0,2	0,8
	Ignimbritas Terciarias	Media a Alta	Directa	13,3	192,7	0,2() 38,5	16,3	20,0
	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Muy Baja	Lateral	36,4	210,9	$0,10$ $0,0^{2}$	4 0,9	1,0	0,4
1 500 5 000	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	2,2	210,9	$0,2^{2}$	4 50,6	3,5	24,0
000.0-000.4	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	1,1	210,9	0,10 0,08	3 1,8	0,1	0,8
	Ignimbritas Terciarias	Media a Alta	Directa	7,4	210,9	0,2() 42,2	9,9	20,0
5.000-5.500	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Muy Baja	Lateral	7,7	233,1	$0,10$ $0,0^{2}$	4 1,C	0,2	0,4
5.500-5.685	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Muy Baja	Lateral	0,8	248,3	$0,10$ $0,0^{2}$	4 1,C	0,0	0,4
Cuenca Complets				109,3	203,8		21,2	73,5	10,8

ntinuación)	
Cálculo de la recarga en la cuenca de Pampa Las Tecas – II Región. (Co	

		(de	0,7	0,0	1,3	5,0	0,7	0,0	1,3	5,0	0,7	0,7	3,6
	ça	s) (% F	3 (6 3(ŝ	3 24	9	4 3(1	3 24	4 (0 (4 13
	kecarg	(L/s	3 0,	\$ 52,	, 0,	20,	t 1,	4	, 0,	12,	0,	б 0,	, 92,
	F	(mm/año)	1,3	57,8	2,5	48,2	1,4	63,3	2,7	52,7	1,5	$1,\epsilon$	26,7
	C		0,05	0,30	0,10	0,25	0,05	0,30	0,10	0,25	0,05	0,05	
	C_E		0,13		0,13		0,13		0,13		0,13	0,13	
	ЬР	(mm/año)	192,7	192,7	192,7	192,7	210,9	210,9	210,9	210,9	233,1	248,3	203,8
	Área	(km^2)	7,8	28,7	4,0	13,3	36,4	2,2	1,1	7,4	7,7	0,8	109,3
a	Tipo de Recarga		Lateral	Directa	Lateral	Directa	Lateral	Directa	Lateral	Directa	Lateral	Lateral	
Recarga Medi	Permeabilidad		Muy Baja	Alta	Baja	Media a Alta	Muy Baja	Alta	Baja	Media a Alta	Muy Baja	Muy Baja	
	Unidad Litológica		Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Dep. sedimentarios	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Ignimbritas Terciarias	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Dep. sedimentarios	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Ignimbritas Terciarias	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	
	Banda de altura	(msm)		1 1 1 1 2 500	000.4-101.4			1 500 5 000	000.C-00C.+		5.000-5.500	5.500-5.685	Cuenca Completa

Cálculo de la recarga en la cuenca de Pampa Las Tecas – II Región. (Continuación)	

	R	tecarga Máxir	na						
Banda de altura	Unidad Litológica	Permeabilidad	Tipo de Recarga	Área	Ы	C _E	I F	tecarga	
(msm)				(km ²) (mm/año)		(mm/año)	(L/s)	(% PP)
	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Muy Baja	Lateral	7,8	192,7	0,16 0,	06 1,8	0,4	0,9
181 1 500	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	28,7	192,7	0,	36 69,4	63,1	36,0
000.4-101.4	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	4,0	192,7	0,16 0,	12 3,6	0,5	1,9
	Ignimbritas Terciarias	Media a Alta	Directa	13,3	192,7	0,	30 57,8	24,4	30,0
	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Muy Baja	Lateral	36,4	210,9	0,16 0,	06 2,0	2,3	0,9
	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	2,2	210,9	0,	36 75,9	5,3	36,0
000.0-000.+	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	1,1	210,9	0,16 0,	12 3,9	0,1	1,9
	Ignimbritas Terciarias	Media a Alta	Directa	7,4	210,9	0,	30 63,3	14,8	30,0
5.000-5.500	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Muy Baja	Lateral	7,7	233,1	0,16 0,	06 2,2	0,5	0,9
5.500-5.685	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Muy Baja	Lateral	0,8	248,3	0,16 0,	06 2,3	0,1	0,9
Cuenca Completa				109,3	203,8		32,2	111,5	16,4

Cálculo de la recarga en la cuenca de Pampa Colorada - II Región.

	R	ecarga Mínim	la						
Banda de altura	Unidad Litológica	Permeabilidad	Tipo de Recarga	Área	ЬЬ	$C_{\rm E}$ $C_{\rm I}$	Re	carga	
(msm)				(km ²) (mm/año)		(mm/año)	(L/s) ((4 M)
	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Muy Baja	Lateral	0,0	194,2	0,10 0,04	0,8	0,0	0,4
	Rocas Volc Erosionadas, Ign Cuaternarias, Salares	Media a Baja	Lateral	0,6	194,2	0,10 0,12	2,4	0,0	1,2
4.256-4.500	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	18,1	194,2	0,24	46,6	26,7	24,0
	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	11,0	194,2	0,10 0,08	1,6	0,6	0,8
	Ignimbritas Terciarias	Media a Alta	Directa	9,3	194,2	0,20	38,8	11,4	20,0
	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Muy Baja	Lateral	4,4	210,7	0,10 0,04	0,9	0,1	0,4
	Rocas Volc Erosionadas, Ign Cuaternarias, Salares	Media a Baja	Lateral	5,5	210,7	0,10 0,12	2,6	0,5	1,2
4.500-5.000	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	2,0	210,7	0,24	50,6	3,2	24,0
	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	5,8	210,7	0,10 0,08	1,8	0,3	0,8
	Ignimbritas Terciarias	Media a Alta	Directa	1,3	210,7	0,20	42,1	1,7	20,0
2 000 5 760	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Muy Baja	Lateral	0,1	227,8	0,10 0,04	0,9	0,0	0,4
207.0-000.C	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	0,0	227,8	$0,10 \ 0,08$	1,9	0,0	0,8
Cuenca Completa				58,0	199,7		24,2	44,5	12,3

	-	ć	×						
	1	Recarga Medi	а						
Banda de altura	Unidad Litológica	Permeabilidad	Tipo de Recarga	Área	ЪР	$C_{\rm E}$ $C_{\rm I}$	R	ecarga	
(msnm)				(km ²)	(mm/año)		(mm/año)	(L/s)	(% PP)
	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Muy Baja	Lateral	0,0	194,2	0,13 0,05	5 1,3	0,0	0,7
	Rocas Volc Erosionadas, Ign Cuaternarias, Salares	Media a Baja	Lateral	0,6	194,2	0,13 0,15	3,8	0,1	2,0
4.256-4.500	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	18,1	194,2	0,3() 58,3	33,4	30,0
	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	11,0	194,2	0,13 0,16) 2,5	0,9	1,3
	Ignimbritas Terciarias	Media a Alta	Directa	9,3	194,2	0,25	5 48,6	14,3	25,0
	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Muy Baja	Lateral	4,4	210,7	0,13 0,05	5 1,4	0,2	0,7
	Rocas Volc Erosionadas, Ign Cuaternarias, Salares	Media a Baja	Lateral	5,5	210,7	0,13 0,15	5 4,1	0,7	2,0
4.500-5.000	Dep. sedimentarios	Alta	Directa	2,0	210,7	0,3() 63,2	4,0	30,0
	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	5,8	210,7	0,13 0,10) 2,7	0,5	1,3
	Ignimbritas Terciarias	Media a Alta	Directa	1,3	210,7	0,25	5 52,7	2,1	25,0
09C 2 000 2	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Muy Baja	Lateral	0,1	227,8	0,13 0,05	5 1,5	0,0	0,7
CU2.C-UUU.C	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Baja	Lateral	0,0	227,8	0,13 0,10) 3,0	0,0	1,3
Cuenca Completa				58,0	199,7		30,5	56,2	15,6

Cálculo de la recarga en la cuenca de Pampa Colorada – II Región. (Continuación)

		а	(% PP) (6,0	2,8	36,0	1,9	30,0	0,9	2,8	36,0	1,9	30,0	0,9	1,9) 18,8
		Recarg) (L/s	0,0	0,1	40,1	1,3	17,1	0,3	1,0	4,8	0,7	2,6	0,0	0,0	68,0
			mm/añc	1,8	5,5	6,69	3,6	58,3	2,0	5,9	75,9	3,9	63,2	2,1	4,3	37,0
		$C_{\rm E}$ $C_{\rm I}$)	0,16 0,06	$0,16\ 0,18$	0,36	0,16 0,12	0,30	0,16 $0,06$	$0,16\ 0,18$	0,36	0,16 0,12	0,30	0,16 $0,06$	0,16 0,12	
		ЪР	(mm/año)	194,2	194,2	194,2	194,2	194,2	210,7	210,7	210,7	210,7	210,7	227,8	227,8	199,7
		Área	(km ²) (0,0	0,6	18,1	11,0	9,3	4,4	5,5	2,0	5,8	1,3	0,1	0,0	58,0
~	na	Tipo de Recarga		Lateral	Lateral	Directa	Lateral	Directa	Lateral	Lateral	Directa	Lateral	Directa	Lateral	Lateral	
ź	ecarga Máxin	Permeabilidad		Muy Baja	Media a Baja	Alta	Baja	Media a Alta	Muy Baja	Media a Baja	Alta	Baja	Media a Alta	Muy Baja	Baja	
· ·	R	Unidad Litológica		Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Rocas Volc Erosionadas, Ign Cuaternarias, Salares	Dep. sedimentarios	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Ignimbritas Terciarias	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Rocas Volc Erosionadas, Ign Cuaternarias, Salares	Dep. sedimentarios	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	Ignimbritas Terciarias	Rocas intrusivas, sedim. mesozoicas, Alt Hidrotermal	Rocas Volcánicas no-Erosionadas	
		Banda de altura	(mnsm)			4.256-4.500					4.500-5.000			5 000 5 760	107.0-000.0	Cuenca Completa

Cálculo de la recarga en la cuenca de Pampa Colorada – II Región. (Continuación)

ANEXO VI

"Ubicación estaciones de aforo en vertientes aportantes a Lagunas Tuyajto y Aguas Calientes 2"

ANEXO VI UBICACIÓN ESTACIONES DE AFORO EN VERTIENTES APORTANTES A LAGUNAS TUYAJTO Y AGUAS CALIENTES 2

Tabla 11.10.	Detalle	de las	estaciones	de	aforo	en	el	Salar	de	Aguas	Calientes	2 y	la	Laguna
Tuyajto.														

Ubicación	Estación	Período de	Coorde	enadas*	Dimensiones	
Ubicacion	Estacion	medición	UTM Este	UTM Norte	canal (m)	
	Vertiente O	Abril 2006 a	642.040	7 209 599	$0.2 \times 0.2 \times 1$	
	(AC_VOEST)	Junio 2007	042.940	1.398.388	0,580,581	
	Vertiente S	Abril 2006 a	644 608	7 207 204	$0.2 \times 0.2 \times 1$	
	(AC_VSUR)	Junio 2007	044.098	7.397.204	0,580,581	
	Vertiente E	Enero 2007 a	646 476	7 308 421	0,3x0,3x1	
Aguas	(AC_VESTE)	Junio 2007	040.470	7.398.421		
Calientes 2	Canal Sur Este	Nov. 2006 a	644 721	7 207 722	$0.8 \times 0.3 \times 2$	
	(AC_SUR_E)	Junio 2007	044.721	1.391.122	0,880,382	
	Canal Sur Central	Nov. 2006 a	644 660	7 307 403	$0.4 \mathbf{v} 0.4 \mathbf{v} 1$	
	(AC_SUR_C)	Junio 2007	044.009	1.391.493	0,430,431	
	Canal Sur Oeste	Nov. 2006 a	644 620	7 207 611	02021	
	(AC_SUR_O)	Junio 2007	044.020	7.397.011	0,580,581	
	Canal N Laguna	Sept. 2006 a	644 132	7 252 771	$0.5 \times 0.5 \times 1$	
Laguna	(TY_NORTE)	Junio 2007	044.152	7.352.771	0,3X0,3X1	
Tuyajto	Canal S Laguna	Abril 2006 a	643 721	7 350 605	0.5 v 0.5 v 1	
	(TY_SUR)	Junio 2007	043.721	7.550.005	0,5x0,5x1	

* Datum PSAD 56

Fuente: [WMC, 2006]

ANEXO VII

"Catastro de Pozos, Coberturas SIG y Base de Datos Hidroquímica"
ANEXO VII 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 VIII

"Mapas Toponímicos Cuencas Piloto II Región de Antofagasta"

ANEXO VIII MAPAS TOPONÍMICOS CUENCAS PILOTO II REGIÓN DE ANTOFAGASTA

Mapa Toponímico Cuencas Sector Pampa Colorada

ANEXO IX

"Mapa Geológico Sector Pampa Colorada"

ANEXO IX MAPA GEOLÓGICO SECTOR PAMPA COLORADA

✓ Mapa Geológico Escala 1:250.000