



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERIA

**MODELO CONCEPTUAL  
HIDROGEOLÓGICO DE LA CUENCA  
DEL SALAR DEL HUASCO**

**VICTORIA FLORES GRANDEZ**

Tesis para optar al grado de  
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:  
**JOSÉ FRANCISCO MUÑOZ PARDO**

Santiago de Chile, Julio, 2010

© 2010, Victoria Flores Grandez



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERIA

# **MODELO CONCEPTUAL HIDROGEOLÓGICO DE LA CUENCA DEL SALAR DEL HUASCO**

**VICTORIA FLORES GRANDEZ**

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

**JOSÉ FRANCISO MUÑOZ PARDO**

**JORGE GIRONÁS**

**GUSTAVO CALLE**

**GUILLERMO THENOUX**

Para completar las exigencias del grado de  
Magíster en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, Julio, 2010

*A mis padres, hermanos, sobrinos,  
abuelito y carlos por su invalorable y  
constante apoyo.*

## **AGRADECIMIENTOS**

Quisiera expresar mi profundo agradecimiento a todas aquellas personas que colaboraron, directa e indirectamente, en la preparación de esta investigación.

En primer lugar quisiera agradecer a mi profesor guía, José Muñoz, por todo el apoyo que me brindó durante este tiempo. Así también al grupo de trabajo del Proyecto de Cuencas Altiplánicas (Laura Vitoria, Pablo Rengifo, José Yañez, Eduardo Johnson, Gustavo Calle, Isidora Arriagada, Yohana Ahumada y Mariana Cervetto).

También quisiera agradecer a mis compañeros de departamento María Fernanda, Pamela, Euclides, Marycarmen, Marycarmen T., Manuel, Lina, Esteban, Javier y Boris por su apoyo y compañía durante el tiempo de duración del programa. También agradecer a Carmen Gloria, María Inés, Debby y Danisa quienes me apoyaron en trámites, documentos, impresiones, etc. que necesitaba hacer.

Finalmente, quisiera agradecer especialmente a mi familia por estar pendientes de mí y brindarme su apoyo incondicional. Así también a mis amigos que siempre confiaron en mí y me apoyaron, Carlos, Ana María, Edgar, Kate, Nancy, Jochen, Rafael, Lucía y Sara.

A todos ellos mi sincero agradecimiento.

## INDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
RESUMEN.....	xi
1 INTRODUCCIÓN.....	1
2 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	5
2.1 Ubicación en la Zona de Estudio .....	5
2.2 Vías de Acceso.....	5
2.3 Caracterización Geomorfológica .....	7
2.4 Situación Ambiental de la Cuenca .....	8
2.5 Climatología.....	8
2.6 Hidrografía .....	10
2.7 Marco Geológico.....	15
3 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLOGICA E HIDROGEOQUIMICA.....	23
3.1 Caracterización Hidrogeológica.....	23
3.1.1 Antecedentes Geológicos.....	23
3.1.2 Recarga .....	25
3.1.1 Descarga .....	31
3.2 Caracterización Hidrogeoquímica.....	35
3.2.1 Antecedentes Hidrogeoquímicos .....	35
3.2.2 Composición Química de las Aguas.....	37
3.2.3 Composición Isotópica .....	41
4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	44
4.1 Caracterización Hidrogeológica.....	44
4.1.1 Marco Geológico .....	44
4.1.2 Unidades de Sub-superficie .....	51
4.1.3 Geometría Acuífera y Unidades Hidrogeológicas.....	61
4.1.4 Piezometría del Acuífero .....	63

4.1.5	Propiedades Hidráulicas .....	71
4.1.6	Conexión con otras cuencas.....	76
4.1.7	Estimación de la Recarga.....	80
4.1.8	Estimación de la Descarga.....	85
4.1.9	Balance de Recarga y Descarga.....	99
4.2	Caracterización Hidrogeoquímica.....	105
4.2.1	Antecedentes Hidrogeoquímicos .....	105
4.2.2	Química General de las Aguas de la Cuenca.....	107
4.2.3	Datos Isotópicos y Relación con la Química.....	158
5	CONCLUSIONES.....	170
6	RECOMENDACIONES .....	175
	BIBLIOGRAFIA .....	177
	A N E X O S .....	181

## INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 3-1: Valores del coeficiente de infiltración ( $C_I$ ) en función de la permeabilidad cualitativa de las unidades litológicas.....	28
Tabla 4-1: Pozos profundos en la cuenca Salar del Huasco.....	48
Tabla 4-2: Gradientes Hidráulicos calculados en Salar del Huasco.....	65
Tabla 4-3: Propiedades hidráulicas del acuífero de la cuenca Salar del Huasco.....	72
Tabla 4-4: Propiedades hidráulicas del acuífero de la cuenca Salar del Huasco.....	73
Tabla 4-5: Comparación con otros estudios de la recarga anual de largo plazo en río Piga en Collacagua.....	83
Tabla 4-6: Comparación con otros estudios de la recarga anual de largo plazo en río Collacagua en Peñablanca.....	83
Tabla 4-7: Comparación con otros estudios de la recarga anual de largo plazo en la cuenca del Salar del Huasco.....	84
Tabla 4-8: Evaporación desde superficies de agua libre (L/s).....	87
Tabla 4-9: Evaporación desde vegas y bofedales en el entorno del Salar del Huasco.....	88
Tabla 4-10: Descargas por evaporación Salar del Huasco.....	92
Tabla 4-11: Evaporación desde los suelos del salar.....	94
Tabla 4-12: Estimación de caudales en vertientes aportantes a lagunas del Salar del Huasco....	97
Tabla 4-13: Derechos de agua superficial solicitados en la cuenca Salar del Huasco por la Asociación Indígena Aymará (AIA) Laguna del Huasco. Las coordenadas están en datum PSAD 56, Huso 19 Sur. Todos corresponden al expediente NR-0103-789.....	99
Tabla 4-14: Entradas y salidas de toda la cuenca Salar del Huasco.....	100
Tabla 4-15: Datos hidrogeoquímicos disponibles por tipo de agua.....	105
Tabla 4-16: Datos isotópicos disponibles por fuente.....	107
Tabla 4-17: Distribución de los parámetros físico-químicos de las fuentes de agua en la cuenca del Salar del Huasco.....	109
Tabla 4-18: Distribución de los elementos mayoritarios en las aguas de la cuenca del Salar del Huasco.....	113

## INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2-1: Ubicación de Cuencas Altiplánicas de la I Región (Izquierda). Cuenca del Salar del Huasco (Derecha) .....	6
Figura 2-2: Sistema hidrológico de la Cuenca del Salar del Huasco .....	11
Figura 2-3: Vertientes principales y Lagunas en el Salar del Huasco .....	12
Figura 2-4: Vertientes identificadas en el Salar del Huasco .....	14
Figura 2-5: Columna Estratigráfica Generalizada, desde el Jurásico superior hasta el Cuaternario superior. En colores, las unidades que afloran en la cuenca del Salar del Huasco .....	15
Figura 2-6: Geología superficial de la cuenca Salar del Huasco .....	16
Figura 3-1: Esquema conceptual del balance hídrico en las unidades litológicas para estimar la recarga en el sistema piloto (a) Recarga directa. (b) Recarga lateral .....	26
Figura 3-2: Mapa de Isoyetas en la cuenca del Salar del Huasco .....	30
Figura 3-3: Ejemplo de Diagrama de Piper .....	38
Figura 3-4: Ejemplo de Diagrama de Durov .....	39
Figura 3-5: Ejemplos de Diagramas de Stiff .....	39
Figura 3-6: Ejemplo de Diagrama de Schoeller.....	40
Figura 3-7: Ejemplo de Diagrama de Caja .....	41
Figura 4-1: Fallas reconocidas en la cuenca Salar del Huasco .....	45
Figura 4-2: Principales lineamientos reconocidos en la cuenca Salar del Huasco.....	47
Figura 4-3: Ubicación de pozos de exploración y producción en la cuenca del Salar del Huasco .....	50
Figura 4-4. Ubicación de perfiles estratigráficos en cuenca Salar del Huasco (proyección sobre imagen LANDSAT).....	52
Figura 4-5: Perfil A-A' en la cuenca del Salar del Huasco .....	54
Figura 4-6: Perfiles transversales U y V en el Salar del Huasco .....	56
Figura 4-7: Perfiles transversales W y X en Salar del Huasco .....	58
Figura 4-8: Perfiles transversales Y y Z en Salar del Huasco .....	60
Figura 4-9: Superficie equipotencial de las aguas subterráneas en la cuenca del Salar del Huasco .....	64



Figura 4-10: Punteras instaladas en Salar del Huasco.....	70
Figura 4-11: Ubicación de sectores en la cuenca del Salar del Huasco .....	74
Figura 4-12: Relación espacial entre los salares del Altiplano y los tipos de agua zonificados en la cuenca del Salar de Pintados por Risacher et al., 1999. Las flechas indican la dirección que seguiría el flujo de acuerdo a la composición química de las aguas .....	77
Figura 4-13: Vista regional donde se destacan las estructuras de la Hoja Collacagua y las quebradas que desembocan en la Pampa del Tamarugal. La flecha con orientación aproximada norte-sur indica la eventual dirección de un flujo captado por la zona de drenaje poniente de la cuenca.....	79
Figura 4-14: Unidades litológicas y características hidráulicas presentes en la cuenca del Salar del Huasco .....	81
Figura 4-15: Estaciones de evaporación de tanque consideradas en la cuenca Salar del Huasco	86
Figura 4-16: Puntos de medición evaporación en la cuenca del Salar del Huasco .....	89
Figura 4-17: Curva evaporación–profundidad de la napa ajustada en la cuenca Salar del Huasco .....	89
Figura 4-18: Curvas de isoprofundidad de la napa en el Salar del Huasco .....	91
Figura 4-19: Áreas por banda de isoprofundidad Salar del Huasco.....	92
Figura 4-20: Vertientes ubicadas en Salar del Huasco.....	95
Figura 4-21: Modelo de entradas y salidas de la cuenca Salar del Huasco .....	104
Figura 4-22: Distribución de muestras químicas en la cuenca del Salar del Huasco.....	106
Figura 4-23: Distribución de muestras isotópicas en cuencas del Salar del Huasco.....	108
Figura 4-24: Distribución de los parámetros físico-químicos de las aguas en la cuenca del Salar del Huasco .....	109
Figura 4-25: Relación de la conductividad eléctrica y los sólidos disueltos totales .....	112
Figura 4-26: Distribución de los elementos mayoritarios .....	114
Figura 4-27: Composición química de las aguas en la cuenca Salar del Huasco según tipo de agua .....	116
Figura 4-28: Composición química de las aguas en la cuenca Salar del Huasco según tipo de muestra de agua .....	117
Figura 4-29: Toponimia de la cuenca y puntos de muestreo Salar del Huasco .....	119
Figura 4-30: Composición química de muestras en el sector 1: Collacagua, Pampa Porquesa, Pampa Piga, y quebrada Chislaca .....	120

Figura 4-31: Composición química de muestras en el sector 2: Pampa Batea y río Batea .....	122
Figura 4-32: Composición química de muestras en el Sector 3: Pampa Peña Blanca .....	124
Figura 4-33: Composición química de muestras en el Sector 4: Pampa Sillillica Norte, Pampa Sillillica y Sillillica Alto.....	126
Figura 4-34: Composición química de muestras en el sector 5: Pampa Huasco y Salar del Huasco .....	128
Figura 4-35: Sectores en el Salar del Huasco .....	129
Figura 4-36: Composición química de muestras de aguas subterráneas en el Sector de Pampa Huasco y Salar del Huasco.....	130
Figura 4-37: Composición química de muestras de aguas superficiales y afloramientos de aguas subterráneas en el sector de Pampa Huasco y Salar del Huasco.....	132
Figura 4-38: Composición química de muestras en el sector 6: Pampa Rinconada.....	134
Figura 4-39: Diagramas de Stiff que representan variaciones en la composición y concentración de los elementos mayoritarios en la cuenca del Salar del Huasco .....	137
Figura 4-40: Diagrama de Stiff para las muestras de aguas subterráneas .....	138
Figura 4-41: Diagrama de Stiff para las muestras de afloramientos de aguas subterráneas.....	140
Figura 4-42: Diagrama de Stiff para las muestras de cauces superficiales.....	142
Figura 4-43: Diagrama de Stiff para las muestras de aguas superficiales estancadas.....	144
Figura 4-44: Diagrama de Schoeller de muestras promedio de agua en la cuenca del Salar del Huasco.....	146
Figura 4-45: Diagrama de Schoeller correspondientes a muestras de pozos del sector Pampa Peña Blanca: HUA.T008 (Izquierda) y HUA.T040 (Derecha).....	148
Figura 4-46: Diagrama de Schoeller correspondientes a muestras de pozos del sector Pampa Sillillica Norte: HUA.T021 (Izquierda) y HUA.T043 (Derecha).....	149
Figura 4-47: Diagrama de Schoeller correspondientes a muestras de pozos en el sector Pampa Sillillica: HUA.T045 (Izquierda) y HUA.T046 (Derecha).....	151
Figura 4-48: Diagrama de Schoeller de correspondiente a muestra de puntera en el Salar del Huasco: HUA.T069 .....	152
Figura 4-49: Diagrama de Schoeller correspondientes a muestras de vertientes: HUA.F136 (Izquierda) y HUA.F031 (Derecha) .....	153
Figura 4-50: Diagrama de Schoeller correspondientes a muestras de vertientes: HUA.F016.3 (Izquierda) y HUA.F016.5 (Derecha) .....	154

Figura 4-51: Diagrama de Schoeller correspondientes a muestras de ríos: HUAF.108 (Izquierda), HUA.F107 (Centro) y HUA.F017 (Derecha) .....	156
Figura 4-52: Relación $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$ de las aguas subterráneas, afloramientos, manantiales, vertientes y precipitación en la cuenca del Salar del Huasco .....	158
Figura 4-53: Relación $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$ de las aguas superficiales en la cuenca del Salar del Huasco .....	159
Figura 4-54: Relación $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$ de las aguas en los sectores de la cuenca del Salar del Huasco .....	160
Figura 4-55: Relación $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$ de las aguas de pozos en el sector Pampa Sillillica Norte.....	161
Figura 4-56: Relación $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$ de las aguas de cauces superficiales en la cuenca del Salar del Huasco.....	162
Figura 4-57: Relación $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$ de aguas de punteras en Pampa Huasco y Salar del Huasco ..	163
Figura 4-58: Relación $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$ de aguas de punteras en función de ubicación en el salar .....	164
Figura 4-59: Relación $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$ de los afloramientos de aguas subterráneas en el sector del Salar del Huasco .....	165
Figura 4-60: Relación $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$ de los afloramientos de aguas subterráneas en relación a su ubicación en el Salar del Huasco .....	165
Figura 4-61: Relación $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$ de las aguas superficiales el sector del Salar del Huasco.....	166
Figura 4-62: Relación $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$ de las aguas superficiales en relación a su ubicación del Salar del Huasco .....	167
Figura 4-63: Correlación entre $\delta^{18}\text{O}$ y C. Eléctrica en aguas subterráneas del sector Salar del Huasco.....	168
Figura 4-64: Correlación entre $\delta^{18}\text{O}$ y C. Eléctrica de los afloramientos de aguas subterráneas del sector Salar del Huasco. ....	168
Figura 4-65: Correlación entre $\delta^{18}\text{O}$ y C. Eléctrica de las aguas superficiales en el sector del Salar del Huasco .....	169

## RESUMEN

El trabajo de investigación comprendió a la cuenca del Salar del Huasco, ubicada en la Primera Región de Tarapacá. Esta cuenca es de tipo endorreica de altura promedio de 4.173 msnm, donde se encuentra el salar del Huasco, el cual ha sido declarado de importancia medioambiental, principalmente como hábitat de aves acuáticas migratorias.

El objetivo principal de la presente investigación es contribuir al entendimiento hidrogeológico de la cuenca del Salar del Huasco, a fin de generar mayores antecedentes que a futuro permitan evaluar las potencialidades de aprovechamiento de los recursos subterráneos, para sustentar las necesidades de agua en la zona.

Siguiendo el objetivo propuesto, este documento presenta la caracterización hidrogeológica e hidrogeoquímica de la cuenca del Salar del Huasco. Para describir las características hidrogeológicas de la cuenca se desarrollaron los siguientes puntos: marco geológico, unidades de sub-superficie, geometría acuífera y unidades hidrogeológicas, piezometría del acuífero, propiedades hidráulicas del acuífero, estimación de la recarga y descarga, y conexión con otras cuencas vecinas.

La caracterización hidrogeoquímica comprendió el desarrollo de la química general de los diferentes tipos de fuentes de agua en la cuenca, así como información de datos isotópicos, los cuales fueron relacionados con la química de las aguas.

**Palabras Claves:** hidrogeológica, acuífero, salar, napa freática, recarga, descarga, hidrogeoquímica.

## ABSTRACT

The research comprised the Huasco Salar basin, located in the first region of Tarapacá. This basin is of an endorheic type, with an average height of 4173 meters where the Huasco salar is allocated. This area has been declared of environmental importance, especially as it embraces a waterfowl habitat.

The main objective of this research is to contribute to the understanding of the hydrogeological basin Huasco Salar; in order to generate further evidence that in the future will help to evaluate the potential use of groundwater resources to sustain the water needs in the area.

Following this objective, this document presents the hydrogeological and hydrogeochemical characterization of the basin of the Salar del Huasco. The description of the hydrogeological characteristics of the basin followed these points: geological setting, units of sub-surface, aquifer geometry and hydrogeological units, piezometry of the aquifer, the aquifer hydraulic properties, estimation of recharge and discharge, and its connection to other neighboring basins.

The hydrogeochemical characterization included the development of general chemistry of the different types of water sources in the basin as well as information on isotopic data, which were related to the water chemistry.

**Keywords:** hydrogeology, aquifer, salt-plain, ground water, recharge, discharge, hydrochemical.

## 1 INTRODUCCIÓN

El Norte de Chile comprende las áreas desérticas más secas de la tierra (Risacher *et al.* 1999; Herrera *et al.* 2006); las aguas superficiales son escasas y se desarrollan como drenaje interno en cuencas cerradas donde se infiltran o recargan un humedal (Acosta, 2004). Existen en la zona más de 100 de este tipo de cuencas, conteniendo la mayoría salares en su interior (López *et al.* 1999). Sin embargo, existen numerosos y extensos sistemas hidrogeológicos que almacenan recursos de agua subterránea, los cuales sustentan actualmente las necesidades de agua de los sectores productivos (industrial, minero, agrícola y pecuario) y población de la zona. Actualmente, la demanda de dicho recurso se ha incrementado significativamente (Acosta, 2004; Johnson, 2009) siendo esta situación especialmente crítica en esta zona.

En consecuencia se hace muy importante contar con estudios que evalúen las potencialidades de aprovechamiento de los recursos hídricos subterráneos de la zona, no sólo con el fin de sustentar las necesidades de agua de sus sectores productivos y población, sino también contar con una herramienta de gestión ambiental que permita evitar impactos en el corto, mediano y largo plazo que pongan en riesgo dicho recurso.

Los estudios antes mencionados, parten con la propuesta de un modelo conceptual hidrogeológico, el cual permite representar el comportamiento de las aguas subterráneas, requiriendo para ello información geológica, climática, topográfica, hidrológica, entre otros. Sin embargo, resulta a veces necesario considerar modelos específicos para procesos que se producen a escala más pequeña como es el caso de la recarga y descarga (Rushton, 2003), cuyos conocimientos son fundamentales para la formulación del balance de agua de una cuenca y sus cuantificaciones son las más difíciles de evaluar (Britishcolumbia, 1993; Bredehoeft, 2007), especialmente en zonas áridas donde existe gran incertidumbre (De Vries y Simmers 2002; Scanlon *et al.* 2002; Tyler, 2006).

Por otro lado, las aguas subterráneas se encuentran condicionadas por la constante interacción entre una fase sólida formada por rocas y minerales, una fase gaseosa y una líquida. Producto de esta relación, adquieren una composición química definida y característica del sistema en que estas se encuentran inmersas. En este contexto, el estudio de la composición química del agua puede contribuir al conocimiento y determinación de su origen, direcciones de flujo, extensión de sistemas acuíferos y la posible conexión subterránea entre cuencas hidrográficamente independientes (Custodio, 1976; Glynn y Plummer, 2005). Adicionalmente, los análisis químicos generales pueden ser complementados con el estudio de otros elementos presentes en el agua. De esta forma, el análisis isotópico se presenta como una alternativa que permite determinar el origen y edad de las aguas, así como también las conexiones hidráulicas entre acuíferos y su vulnerabilidad ambiental (DGA-PUC, 2009).

Una de las cuencas endorreicas de la zona altiplánica de Chile que tiene especial interés para comprender el funcionamiento del flujo subterráneo, con el fin de evaluar su aprovechamiento y en consecuencia satisfacer las necesidades de agua en la zona, corresponde a la cuenca del Salar del Huasco, ubicada en la Primera Región de Tarapacá. Esta cuenca es de tipo endorreica, limitada por cordones montañosos de altura de 5.000 metros sobre el nivel del mar (msnm), desembocando sus aguas al salar del Huasco, punto más bajo de la cuenca con 3.770 msnm, el mismo que debido a su importancia medioambiental ha sido declarado como sitio Ramsar en 1996 en una superficie de 60 Km<sup>2</sup> (Acosta 2004).

En este tipo de cuencas se puede aplicar el principio de conservación de masa, que exige que las descargas y las recargas evaluadas a largo plazo sean igualadas (Bredehoeft, 2007). La recarga tiene como fuente principal la precipitación, mientras que las descargas principales corresponden a los flujos de evaporación desde lagunas y napas someras en la zona del salar (DGA-PUC, 2009). Diversos estudios como los desarrollados por Scanlon *et al* (2002), Heredia y Murillo (2002) y Carrica y Lexow (2004), consideraron que una adecuada caracterización de la recarga y descarga se alcanza tras la aplicación y contraste de técnicas distintas.

Acosta (2004) formuló un modelo conceptual hidrogeológico de la cuenca del Salar del Huasco. La recarga fue estimada a través del Código HELP-UNSAT SUITE, modelo hidrológico determinístico, cuasi 2-D, de movimiento de agua, hacia, a través, y desde vertederos o suelos en régimen saturado. Las desventajas del código HELP para los propósitos que se utilizó, es que éste fue desarrollado para ayudar a diseñadores y fiscalizadores de vertederos de residuos peligrosos a evaluar el comportamiento hidrológico de diversos diseños propuestos. La descarga fue evaluada desde las lagunas, vegas y bofedales, cauces superficiales y desde el suelo, sin embargo no se contaron con medición de evaporación in situ.

Collahuasi-GP Consultores (2008) realizó mediciones de la descarga evaporativa en el Salar de Huasco, con el fin de estimar la recarga del sistema acuífero de la cuenca. Estas mediciones fueron realizadas con tanques evaporimétricos de bandeja y lisímetros instalados en el salar.

Es importante mencionar que el presente trabajo de investigación forma parte de un estudio más amplio que el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental (DIHA) de la Pontificia Universidad Católica (PUC) de Chile realizó para la Dirección General de Aguas (DGA), denominado “Levantamiento Hidrogeológico para el Desarrollo de Nuevas Fuentes de Agua en Áreas Prioritarias de la Zona Norte de Chile, XV, I, II y III Regiones” (DGA-PUC, 2009).

El objetivo principal de la presente investigación es contribuir al entendimiento hidrogeológico de la cuenca del Salar del Huasco. Esta nueva información aporta al conocimiento actual de los sistemas, traduciéndose en mayores antecedentes para los modelos de balance y simulación hidrogeológica. Para lograr este objetivo se efectuaron las siguientes actividades:

- Cuantificación de los flujos de entrada y salidas de la cuenca:
  - Estimación de la recarga producida en toda la cuenca, usando coeficientes de infiltración y escurrimiento, como función de las características litológicas del terreno y la geomorfología de cada zona.



- Estimación de la descarga considerando las mediciones de evaporación in situ desde la napa subterránea.
- Recolección de información de medición de los niveles de las aguas subterráneas en la cuenca, así como mediciones actuales de las mismas, a fin de evaluar las direcciones de flujo, los cambios en los niveles, entre otros.
- Levantamiento de información hidrogeoquímica e isotópica; así como el muestreo de aguas superficiales y subterráneas, a fin de incrementar la información existente en la actualidad. El complemento de ambas de datos, antiguos y nuevos, contribuyen al análisis del origen, direcciones de flujo, extensión de sistemas acuíferos y la posible conexión subterránea entre cuencas hidrográficamente independientes

## **2 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO**

### **2.1 Ubicación en la Zona de Estudio**

La Zona de Estudio corresponde a la cuenca superficial y subterránea del Salar del Huasco, que se encuentra ubicada en la franja del Altiplano-Puna de Chile, inserta en la Cordillera de Los Andes en la Primera Región de Tarapacá, Provincia de Iquique y Comuna de Pica. Los límites de la zona de estudio se encuentran entre las siguientes coordenadas UTM (Datum Provisional Sudamericano 56, PSAD 56):

Límite Norte : 7.805.000

Límite Sur : 7.734.000

Límite Oeste : 495.000

Límite Este : 540.000

La cuenca del Salar del Huasco limita por el norte con la cuenca del Salar de Lagunilla y con la cuenca del río Cancosa; por el sur con la quebrada Carcas; por el este con la cuenca del Salar de Coposa y con afluentes del Salar Empexa (ubicados en territorio Boliviano); y por el oeste con diversas quebradas afluente a la Pampa del Tamarugal (Figura 2-1.)

### **2.2 Vías de Acceso**

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

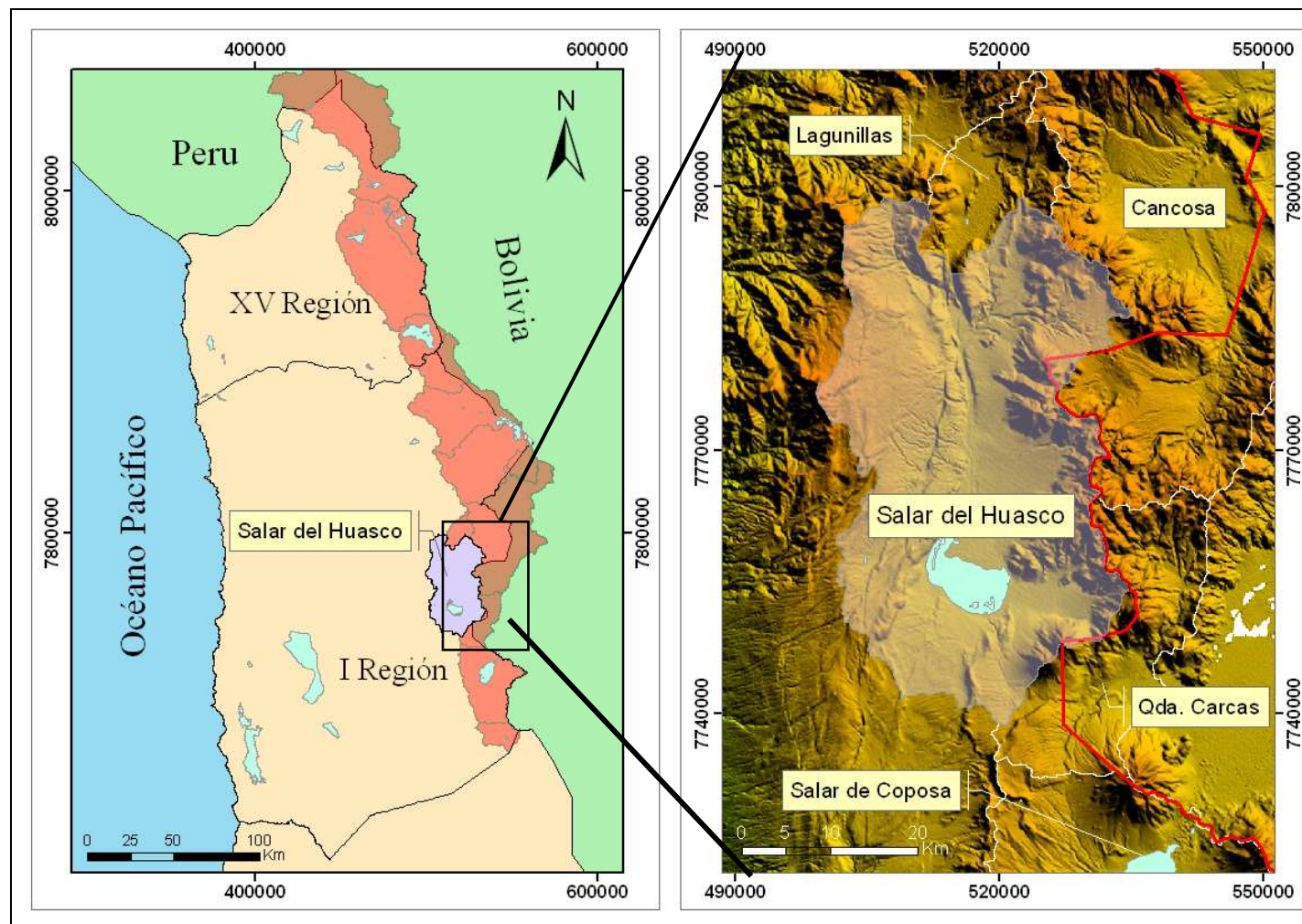


Figura 2-1: Ubicación de Cuencas Altiplánicas de la I Región (Izquierda). Cuenca del Salar del Huasco (Derecha)

### **2.3 Caracterización Geomorfológica**

La cuenca del Salar del Huasco es una depresión volcanotectónica con forma ovalada, elongada hacia el Norte y hacia el Sur, con un largo de unos 55 km en esta dirección y un ancho relativamente constante de 30 km en la dirección este-oeste. Corresponde a una cuenca endorreica de altura media de 4.165 msnm, limitada por cordones montañosos que rondan los 5.000 msnm, desembocando sus aguas al salar del Huasco, punto más bajo de la cuenca con 3.770 msnm donde se produce la acumulación y evaporación de los recursos hídricos superficiales. Su superficie es de 1.471 km<sup>2</sup> (Acosta, 2004).

El límite poniente de la cuenca corresponde a una región de gran altura, la cual presenta en sus sectores norte y centro a la meseta de Altos de Pica, donde se encuentran elevaciones que varían entre 4.500 a 5.220 msnm. En el límite oriente se alza la Cordillera de los Andes, representado por una cadena de volcanes que superan los 4.900 msnm. Por el norte se sigue la sucesión de cuencas cerradas del Altiplano Andino, siendo la hoya hidrográfica de laguna Lagunillas, adyacente en esta dirección. Finalmente, el límite sur corresponde a una elevación suave de terrenos volcánicos, donde se encuentra Pampa Guañada, Pampa León y el Cordón Carcanal, que drena hacia el Salar de Empexa en Bolivia y cuyas cumbres bordean los 4.000 msnm de altura.

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

## **2.4 Situación Ambiental de la Cuenca**

De los 1.471 km<sup>2</sup> de superficie de la cuenca del Salar del Huasco, 60 km<sup>2</sup> corresponden al humedal del mismo nombre, el cual fue declarado en el año 1996 como sitio Ramsar en virtud de la Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional especialmente como hábitats de aves acuáticas donde existe una amplia diversidad biológica que aún se mantiene sin grandes intervenciones (Collahuasi-GP Consultores, 2003).

El humedal del Huasco sustenta un ecosistema que alberga a importantes especies endémicas, como flamencos y gansos andinos, siendo además un sitio crucial para el descanso y anidación de aves migratorias del hemisferio norte. Así también, la Dirección General de Aguas (DGA) en el año 1996, ha reconocido su importancia al incluirla dentro de los sitios protegidos que otorga el Código de Aguas en algunas áreas con presencia de vegas y bofedales.

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

## **2.5 Climatología**

La cuenca del Salar del Huasco se encuentra influenciada por dos climas, el de Tundra por efecto de altura con precipitación estival, que también es descrito como clima de Estepa de altura, y el Desértico frío o Marginal de altura. El primero de estos climas ocupa la mitad norte de la cuenca, además de toda la parte oriental donde se tienen alturas superiores a los 3.500 msnm, y se caracteriza por presentar temperaturas medias que no superan los 5°C y una amplia oscilación térmica entre

el día y la noche. En el Salar del Huasco las temperaturas mínimas alcanzan los  $-20^{\circ}\text{C}$  en los meses de invierno de junio a septiembre (Gajardo, 1994).

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

El clima Desértico frío se presenta sobre los 2.000 msnm y alcanza la parte surponiente del Salar del Huasco. Se caracteriza por presentar precipitaciones en verano, aunque no tan abundantes como en el clima de estepa, pero que permite la subsistencia de una incipiente vegetación. Los valores oscilan entre 20 y 150 mm al año, dependiendo de la altura, del mismo modo que las temperaturas varían entre 4 y los  $14^{\circ}\text{C}$  (DGA-PUC, 2009).

Debido a las condiciones geográficas, en el Altiplano chileno la presión atmosférica es aproximadamente 1.010 hPa,  $20^{\circ}\text{C}$  y la densidad del aire alcanza un valor de  $1,2\text{ kg/m}^3$  (DICTUC, 2005). Así también, existe una alta variabilidad estacional e interanual de las precipitaciones (ciclos muy marcados con años extremadamente húmedos y otros años extremadamente secos); existe una muy baja humedad relativa del aire y alta radiación solar (Collahuasi - GP Consultores, 2005) y también se evidencia un fuerte y constante viento que se levanta especialmente al medio día, en cualquier época del año y con velocidades que pueden superar los 60 km/h (Acosta, 2004).

## 2.6 Hidrografía

El principal curso superficial en la cuenca corresponde al río Collacagua, cuyo origen está dado en el punto denominado El Tojo, donde confluyen por el norte el río Chaquina de bajo caudal y pendiente suave, que se asemeja a una larga ciénaga y por el oriente el río Piga su principal alimentación, y que nace en los Ojos de Piga, en una zona cubierta de bofedales. Entre el caserío Collacagua y El Tojo, el río recibe el aporte de la quebrada Batea, el arroyo Porquesa, y algunas quebradas de flujos eventuales.

El río Collacagua, a partir del punto denominado El Tojo, se desarrolla con baja pendiente en dirección recta al sur, formando en algunos sectores grandes terrenos planos de aguas bajas que alimentan sistemas vegetales de especies freatófitas. Después de recorrer unos 15 km en esta dirección, las aguas se infiltran para alimentar subterráneamente al salar. El lecho del río continúa seco y arenoso por otros 10 km hasta el salar, donde llega en forma superficial en época de crecidas (Figura 2-2).

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

En el entorno del salar surgen vertientes o afloramientos de agua, siendo las de mayor caudal la vertiente Huasco Norte y Ermitaño. La vertiente Huasco Norte se sitúa en el extremo norponiente del salar (Figura 2-3), donde el agua brota a unos 4 m sobre el nivel de éste con una temperatura de 15,5 °C y un caudal promedio de 26 L/s. Más al sur, a orillas del salar y junto al antiguo camino a Pica, se encuentra la vertiente Ermitaño, de donde el agua brota a 15,5 °C con un caudal promedio de 23 L/s. Las aguas de estas vertiente son dulces, con conductividades eléctricas de aproximadamente 590  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Collahuasi-GP Consultores, 2003).

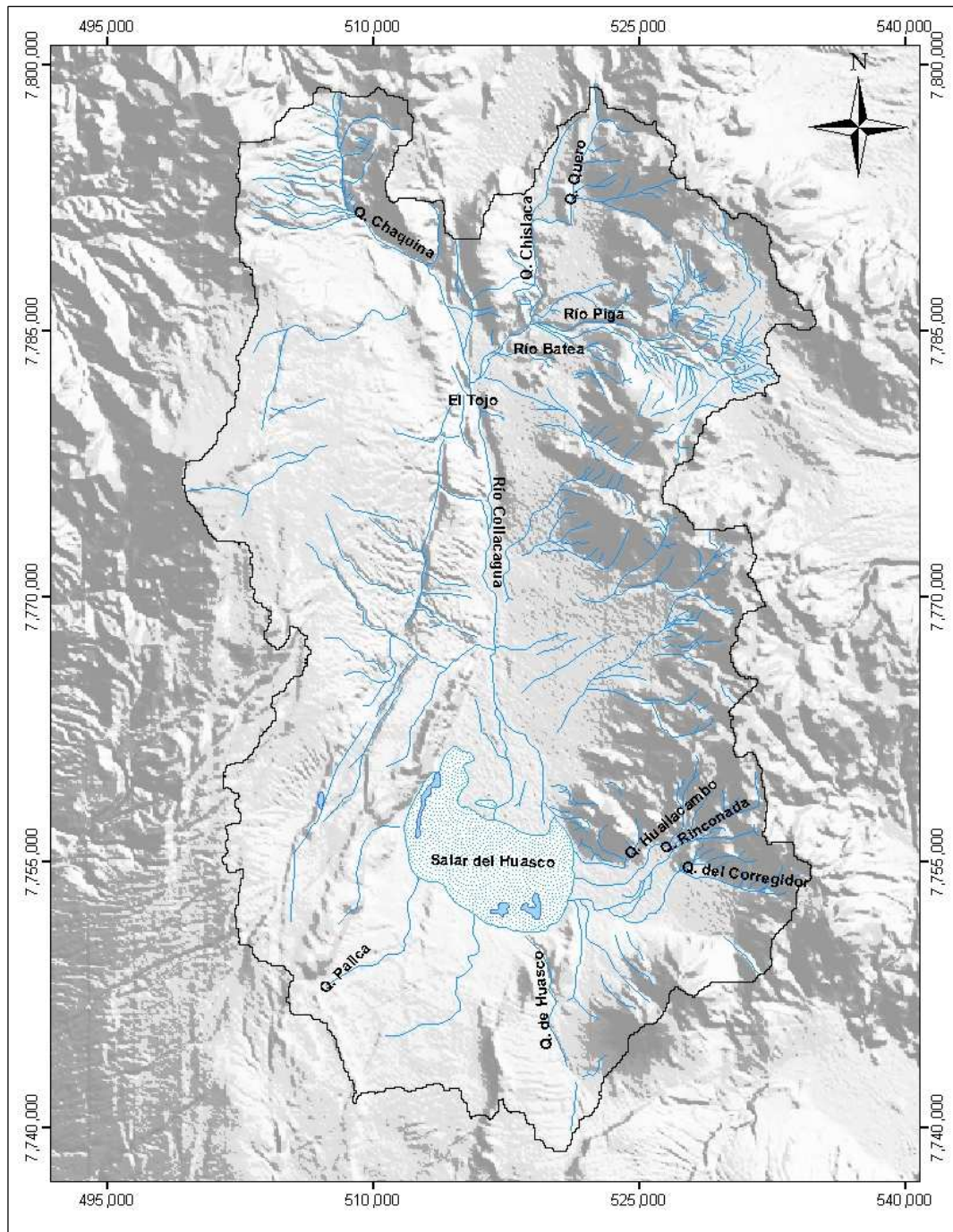
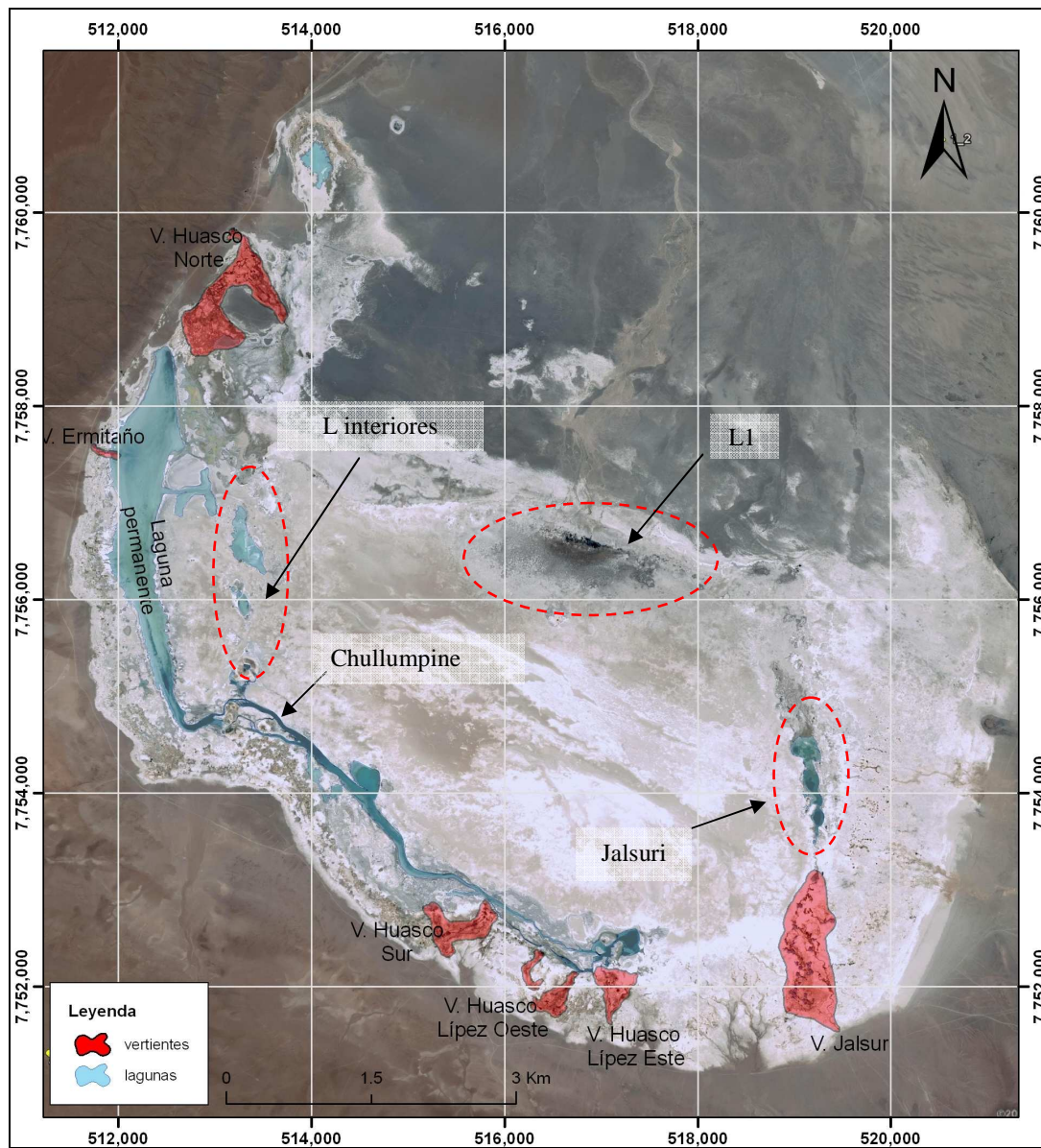


Figura 2-2: Sistema hidrológico de la Cuenca del Salar del Huasco





Fuente: Collahuasi-GP Consultores, 2008

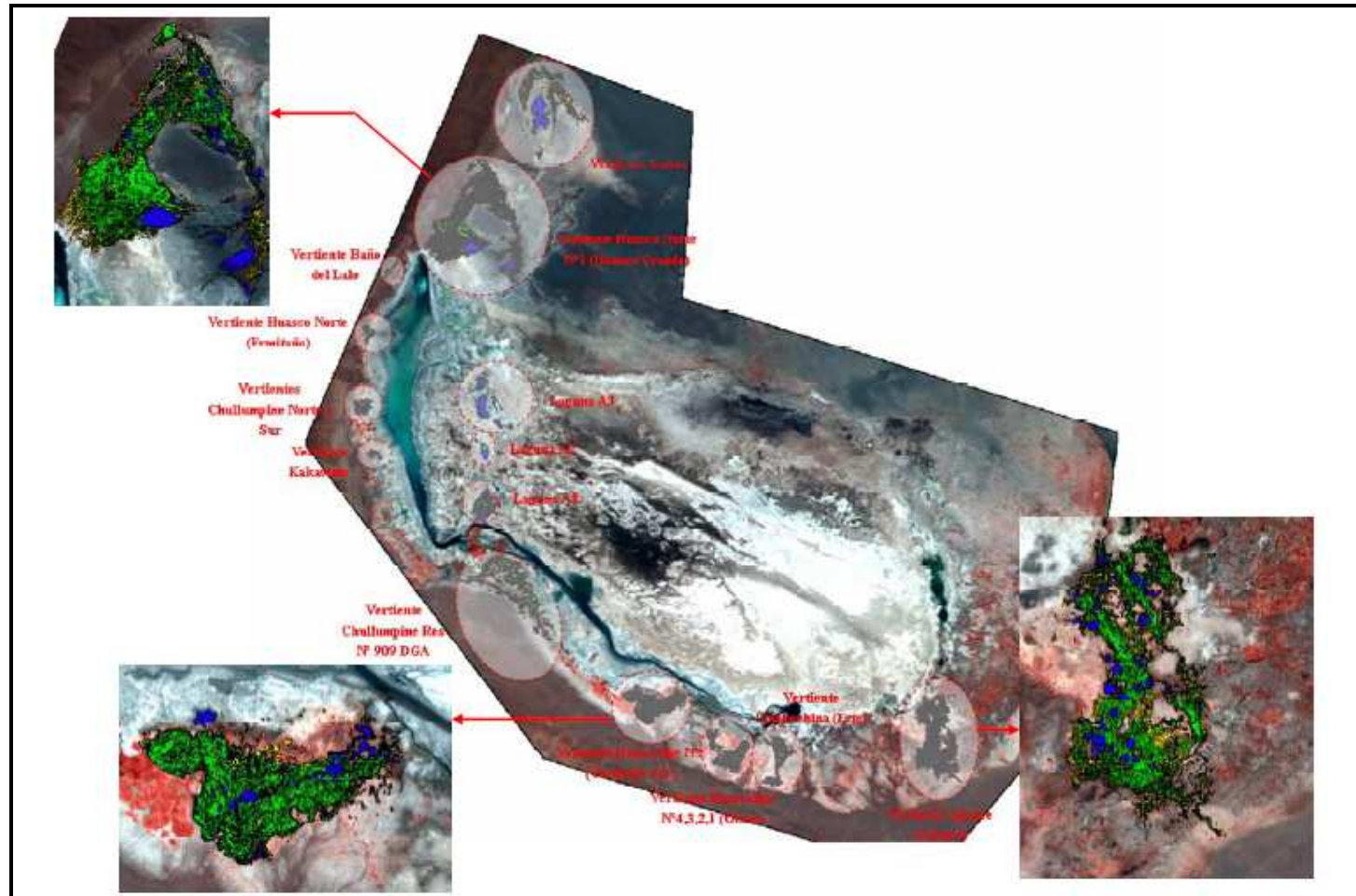
Figura 2-3: Vertientes principales y Lagunas en el Salar del Huasco

En el estudio de Collahuasi – GP Consultores (2008) se reconoció otras vertientes en el salar, cuyos caudales varían entre 1 y 13 L/s. Entre estas vertientes se tiene: Lukas, Baño del Lalo, Kakavinto, Chulumpite, Jaisure, Umakechina, Huascolipe N° 1, Huascolipe N° 2, Huascolipe N° 3, Huascolipe N° 4 y Huascolipe N° 5. Las aguas de este grupo de afloramientos abastecen sistemas vegetacionales (vegas/bofedales) y forman lagunas terminales desde donde se evaporan las aguas excedentes (Figura 2-4).

Dentro del salar las aguas más dulces desarrollan una compleja red de drenaje conformada por canales y lagunas que le otorgan al humedal diferentes configuraciones físicas, químicas e hidráulicas, permitiendo la aparición de diferentes microhábitats para el establecimiento de una flora y fauna particular.

El sistema de lagunas terminales de evaporación se encuentra compuesto por tres lagunas permanentes identificadas como laguna Grande (o laguna permanente), laguna Jalsure y sistema de lagunas interiores y dos lagunas estacionales denominadas laguna Huasco Norte y laguna 1 (L1), tal como se observa en la Figura 2-3.

La laguna Grande o Permanente es abastecida principalmente por la vertiente Ermitaño, y se ubica a lo largo de todo el borde oeste y sur del salar. Presenta agua durante todo el año y sus características varían en función del período estacional y si se ha tratado de un año lluvioso o seco. En periodos secos, sólo puede observarse agua en aquellos sectores de la laguna donde ingresan los cursos de agua proveniente de las vertientes.



Fuente: Collahuasi-GP Consultores, 2008

Figura 2-4: Vertientes identificadas en el Salar del Huasco .

## 2.7 Marco Geológico

### 2.7.1.1 Estratigrafía

Las unidades geológicas que afloran en la cuenca del Salar del Huasco (Figura 2-5), de la más antigua a la más joven comprenden a las unidades de la Formación Cerro Empexa (Kce), Formación Altos de Pica (Tsh), Formación Sillillica (TMv, TPv y Qv), Formación Collacagua (Qcs, Qcm, Qci), Formación Pastillos (Qip) y Depósitos no Consolidados (Qal, Qs, Qe, Qsp, Qipe). De todas las mencionadas las rocas de la Formación Collacagua no se manifiestan en superficie.

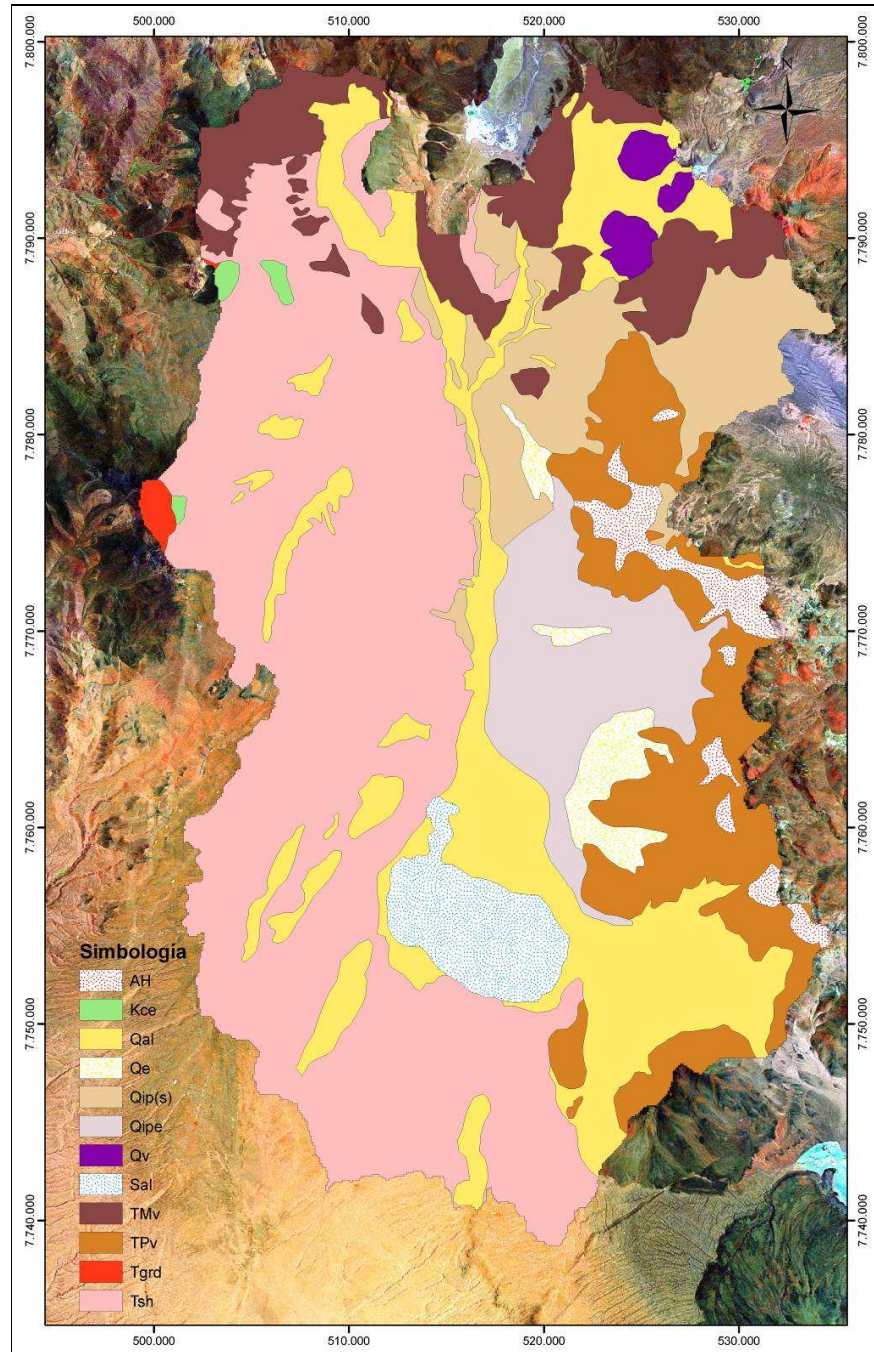
ERA	PERIODO	EPOCA	UNIDAD	COLUMNA	ESPESOR	LITOLOGIA
CENOZOICA	CUATERNARIO	PLEISTOCENO	Qal, Qs, Qe		> 150	Gravas, arena, limo, sal
			Qip	TPlv	> 150	Tobas no-soldadas Conglomerados,
	TERCIARIO	PLIOCENO MIOCENO	Tt	TPt	> 150	areniscas Lavas andesíticas y dacíticas
			TPv	Tt	> 150	
			TMv		> 150	
			Ignimbrita Ujina	Ignimbrita Ujina	> 150	Ignimbritas dacíticas
		Ignimbrita Huasco		> 150	Ignimbritas	
MESOZOICA	CRETACICO	NEOCOMIANO	FORMACION CERRO EMPEXA	SUP.	550	Lavas y brechas andesíticas  Tobas dacíticas
				INF.	200	Andesitas, areniscas, conglomerados
	JURASICO	SUPERIOR				

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

**Figura 2-5: Columna Estratigráfica Generalizada, desde el Jurásico superior hasta el Cuaternario superior. En colores, las unidades que afloran en la cuenca del Salar del Huasco**

Las rocas de origen volcánico presentan edades entre el Mioceno hasta el Cuaternario. Sobreyacen a están unidades volcánicas, secuencias de depósitos de relleno de edad Terciaria a Cuaternaria. No obstante, existente afloramientos aislados de rocas de edad cretácica.

Las unidades geológicas identificadas en la cuenca se muestran en la Figura 2-6, cuyas características se presentan a continuación. Cabe precisar que la principal fuente de información corresponde a la Hoja Collacagua de Vergara y Thomas (1984).



Fuente: [Modificado de Carta Geológica, Hoja 59, escala 1:250.000; Vergara y Thomas, 1984]

**Figura 2-6: Geología superficial de la cuenca Salar del Huasco**

## a) Rocas Estratificadas

### **Formación Cerro Empexa (Kce) – Titoniano/Neocomiano**

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

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

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

## b) Rocas Volcánicas

### **Formación Altos de Pica - Ignimbrita Huasco (Tsh) – Mioceno medio**

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

La Ignimbrita Huasco ocupa gran parte del sector norte del área, cubriendo a modo de una losa continua, una superficie del orden de 2.800 km<sup>2</sup>. Está constituida por tobas total o parcialmente soldadas, de composiciones riolítica y dacítica. Ocasionalmente en algunos sectores se puede distinguir, en un perfil vertical, un sector basal de vitrófiros negros de escasa potencia (<5 m); una parte media de tobas

riolíticas, rosadas, compactas, muy soldadas, y con estructuras de flujo; y un nivel superior de color gris claro, medianamente soldado, en parte cinerítico.

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

#### **Formación Sillillica - Estrato-Volcanes I (TMv) – Mioceno superior/Plioceno**

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

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

#### **Formación Sillillica - Estrato-Volcanes II (Tpv) – Plioceno**

Se agrupan aquí la mayoría de los centros volcánicos del área. Corresponden todos a estrato-volcanes de una altitud del orden de 1.000 m sobre la superficie de los salares. Se caracterizan por tener sus conos relativamente bien preservados y sus cráteres moderadamente erosionados. La erosión principal debe atribuirse a glaciares.

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

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

### **Formación Sillillica - Domo Dacítico del Cerro Porquesa (Qv)**

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

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

### **Depósitos Terciarios (T<sub>t</sub>)**

Los depósitos terciarios se correlación con la Formación Collacagua, la cual se encuentra dividida en tres unidades litológicas: Superior, Media e Inferior (JICA-DGA, 1995). La formación comprende una secuencia de sedimentos lacustres que consisten en lodo, arcilla y limos intercalados con arena y aglomerados hacia la base de la secuencia, e intercalados con cenizas volcánicas hacia el techo de la secuencia (Acosta, 2004).

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



### **Formación Pastillos - Ignimbrita Pastillos (Qip) – Pleistoceno Medio a Superior**

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

La Ignimbrita Pastillos ocupa gran parte de la depresión de los salares. En base a sus características litológicas, ha sido subdividida en dos miembros. El Miembro Inferior está constituido por rocas de colores gris claro a blanco, las que corresponden a tobas y depósitos laháricos, altamente porosos, y con un muy bajo grado de soldamiento. Tiene aspecto de aglomerado, caracterizado por la presencia de gran cantidad de clastos angulosos y sub-angulosos, de hasta 30 cm de diámetro, incluidos en una matriz tobácea. El Miembro Superior corresponde a un depósito de cineritas dacíticas no soldadas. Sin embargo, en las cuencas de los salares de Coposa y del Huasco hay incluidos en la unidad niveles de arcillolitas, limos y diatomitas grises y amarillas, estratificados en capas de 2 – 20 cm de espesor

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

#### **c) Depósitos No-Consolidados**

##### **Depósitos Salinos (Qs)**

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

**Depósitos Aluviales (Qal)**

Corresponden a depósitos detríticos, no consolidados, de origen principalmente aluvial, y en menor parte coluvial. Dichos sedimentos conforman el relleno de las quebradas, depresiones y depósitos de piedemonte. Están constituidos por bolones, gravas, arenas y arcillas, cuyo grado de redondeamiento es proporcional al transporte ocurrido.

Los depósitos aluviales aparecen en los abanicos distribuidos al noreste del salar y están compuestos de ceniza volcánica re TRABAJADA de granulometría fina a gruesa, con presencia de clastos de dacita (JICA-DGA, 1995).

**Depósitos de Arenas Eólicas (Qe)**

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

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

**Depósitos Aluviales de Ceniza y Lapilli (Qipe)**

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

**d) Rocas Intrusivas**

Desde el punto de vista hidrogeológico, estas rocas se consideran de permeabilidad muy baja debido a que son rocas que se forman bajo condiciones que permiten un

desarrollo y crecimiento prolongado de los cristales que componen la roca, haciéndola una roca de textura cristalina y compacta.

### **Granodiorita Guatacondo (Tgrd) – Terciario Inferior**

Rocas de esta composición y edad conforman gran parte de los intrusivos expuestos en el sector occidental del área, y pertenecen al grupo de intrusivos que corresponden al Terciario inferior. Corresponden a stocks de pequeñas dimensiones, inferiores a 20 km<sup>2</sup>.

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

### **3 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLOGICA E HIDROGEOQUIMICA**

#### **3.1 Caracterización Hidrogeológica**

##### **3.1.1 Antecedentes Geológicos**

Para el análisis de la geología superficial de la cuenca Salar del Huasco se utilizó la Carta Geológica de Chile, Hoja Collacagua del Servicio Nacional de Geología y Minería (Vergara y Thomas, 1984). De este documento se extrajeron descripciones litológicas de las diferentes unidades que afloran en la cuenca, relaciones cronoestratigráficas, mineralogía y grado de consolidación de las rocas, entre otras.

A partir de la información disponible del catastro de pozos de exploración construidos en la cuenca por JICA-DGA (1995) y Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi (CMDIC) en los años 1995, 2000 y 2002, se elaboró una base de datos con la estratigrafía de la zona. Estos pozos no se encuentran operando a la fecha, ya que fueron construidos con fines exploratorios y cuyos aprovechamientos aún no se encuentran resueltos.

La correlación entre las estratigrafías de las captaciones subterráneas permitió construir la distribución espacial de las secuencias de depositación en la sub-superficie y también la geometría de la cuenca.

Con el fin de determinar los niveles de agua subterránea en la cuenca del Salar del Huasco, se realizaron mediciones en gran parte de los sondajes habilitados, durante los trabajos de campo realizados en septiembre de 2008 en el marco del estudio de Acción de Apoyo DGA-PUC “Levantamiento Hidrogeológico para el Desarrollo de Nuevas Fuentes de Agua en Áreas Prioritarias de la Zona Norte de Chile, XV, I, II y III Regiones”. Así también, se ha recopilado información de tipo puntual de diferentes estudios que han efectuado mediciones de niveles piezométricos en la referida cuenca.

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 ( $L^2/T$ ), 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 ( $b$ ):

$$T = K \cdot b \quad \text{Ecuación 1}$$

En algunos casos también se utiliza únicamente la conductividad hidráulica ( $K$ ), 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 ( $S$ ) 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.

Las constantes elásticas en los acuíferos de Salar del Huasco se estimaron usando la información de pruebas de bombeo registradas en los antecedentes revisados. Entre los años 2000 y 2002 se llevaron a cabo pruebas de bombeo de gasto constante en 31 pozos perforados (20 de exploración y 11 de producción), además de pruebas de gasto variable en 12 pozos (10 de producción y 2 de exploración).

Los datos obtenidos de las pruebas de bombeo fueron analizados como parte del trabajo en esta tesis con el software Aquifertest 4.2, aplicando los métodos de Theis (1935), Cooper & Jacob (1946), Hantush y Jacob (1955) y recuperación de Theis (1935), usados para acuíferos confinado, semiconfinado y libre. Del mismo modo, se ha recopilado y comparado los resultados de las interpretaciones de las pruebas de bombeo efectuadas por JICA-DGA-PCI (1995), INVEREX (2000; 2002), Collahuasi-GP Consultores (2003) y Acosta (2004).

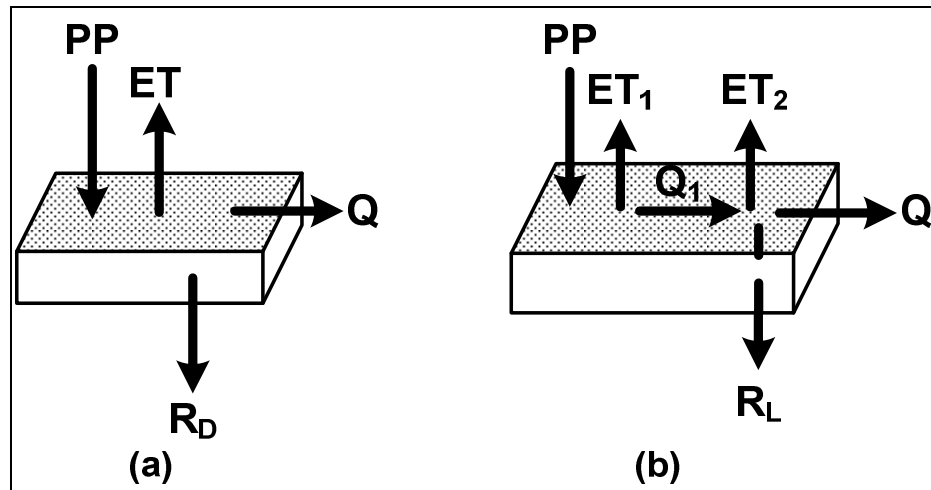
### 3.1.2 Recarga

La recarga de los acuíferos en una cuenca tiene normalmente como fuente principal la precipitación, que se infiltra en zonas de mayor permeabilidad, favorecida por eventos de mayor magnitud que son capaces de saturar el suelo y conducir agua hasta el acuífero. Otras fuentes comunes de recarga corresponden a usos consuntivos como el riego, pero su influencia en la zona de estudio es despreciable.

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.

La recarga en la cuenca del Salar de Huasco tiene como fuente principal las precipitaciones que se producen en la cordillera que la rodean. Este sector sólo constituye una zona de transferencia del agua subterránea hacia las zonas más bajas de la cuenca, donde se presentan rellenos de depósitos aluviales y depósitos evaporíticos (salares), que corresponden a los sectores con mayor potencial hidrogeológico de esta cuenca.

La estimación de la recarga media anual de largo plazo fue realizada a través de balances de masa y de coeficientes de infiltración y escorrentía que ponderaron las características hidráulicas de las unidades litológicas presentes en la cuenca analizada. 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 3-1 presenta un esquema de los términos del balance hídrico que se realizó en cada unidad litológica, para la recarga directa y la lateral.



**Figura 3-1: Esquema conceptual del balance hídrico en las unidades litológicas para estimar la recarga en el sistema piloto (a) Recarga directa. (b) Recarga 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 un año, el cambio en el almacenamiento es despreciable

Para estimar la recarga directa ( $R_D$ ) se aplica el siguiente balance en el volumen de control (Figura 3-1a):

$$PP \cdot A_{RD} = ET + Q + R_D \quad \text{Ecuación 2}$$

donde: PP: precipitación [ $LT^{-1}$ ],  $A_{RD}$ : área de la unidad litológica [ $L^2$ ], ET: evapotranspiración [ $L^3T^{-1}$ ], y Q: 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 de la 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:

$$ET = (1 - C_I)PP \cdot A_{RD} \quad \text{Ecuación 3}$$

Finalmente la recarga directa ( $R_D$ ) se calcula con la siguiente ecuación:

$$R_D = C_I \cdot PP \cdot A_{RD} \quad \text{Ecuación 4}$$

donde  $C_I$  varía entre 0,05 y 0,30 dependiendo del grado de permeabilidad y consolidación de la unidad litológica analizada, lo cual será discutido más adelante.

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 3-1b). 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:

$$PP \cdot A_{RL} = ET_1 + Q_1 \quad \text{Ecuación 5}$$

donde:  $A_{RL}$ : área de la unidad litológica [ $L^2$ ],  $ET_1$ : evapotranspiración [ $L^3T^{-1}$ ], y  $Q_1$  son los escurrimientos superficiales [ $L^3T^{-1}$ ].

La evapotranspiración puede estimarse en función de la precipitación (PP) mediante un coeficiente de escurrimiento ( $C_E$ ), de tal manera que:

$$ET_1 = (1 - C_E)PP \cdot A_{RL} \quad \text{Ecuación 6}$$

por lo tanto:

$$Q_1 = C_E \cdot PP \cdot A_{RL} \quad \text{Ecuación 7}$$

donde el  $C_E$  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 que:

$$Q_1 = ET_2 + Q + R_L \quad \text{Ecuación 8}$$

donde  $ET_2$  es la evapotranspiración que puede estimarse en función del  $C_I$  como:

$$ET_2 = (1 - C_I)Q_1 \quad \text{Ecuación 9}$$

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 ( $R_L$ ) como:

$$R_L = C_I \cdot C_E \cdot PP \cdot A_{RL} \quad \text{Ecuación 10}$$

El valor del  $C_I$  depende de la magnitud y duración de cada evento de precipitación, de la textura del suelo y condición 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 estimó 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 3-1.

**Tabla 3-1: 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

**Tabla 3-1: Valores del coeficiente de infiltración ( $C_I$ ) en función de la permeabilidad cualitativa de las unidades litológicas (continuación)**

Permeabilidad cualitativa	$C_I$
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 las condiciones de almacenamiento en el suelo, introduciendo cierta incertidumbre a los resultados obtenidos 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 cuenca de estudio.

Con el fin de introducir el efecto de la variación espacial de la precipitación en la estimación de la recarga, la cuenca del sistema piloto fue dividida en bandas de altura de 500 metros, donde la precipitación a la altura media de la banda se considera representativa de esa zona. Los valores de la precipitación en cada banda fueron obtenidos del mapa de isoyetas medias anuales (Figura 3-2), obtenido en el estudio realizado por la DGA-PUC, 2010.

Las unidades litológicas al interior de la cuenca fueron obtenidas de la Carta Geológica de Chile, Hoja Collacagua, escala 1:250.000 (Vergara y Thomas, 1984) y mediante fotointerpretación utilizando el programa Google Earth. La asignación de la permeabilidad cualitativa a estas unidades se realizó en función de la descripción litológica y fotointerpretación, identificando las zonas con mayor infiltración donde se presentan cauces difusos. Adicionalmente se verificó con los resultados de pruebas infiltración realizadas en la cuenca por Acosta (2004).

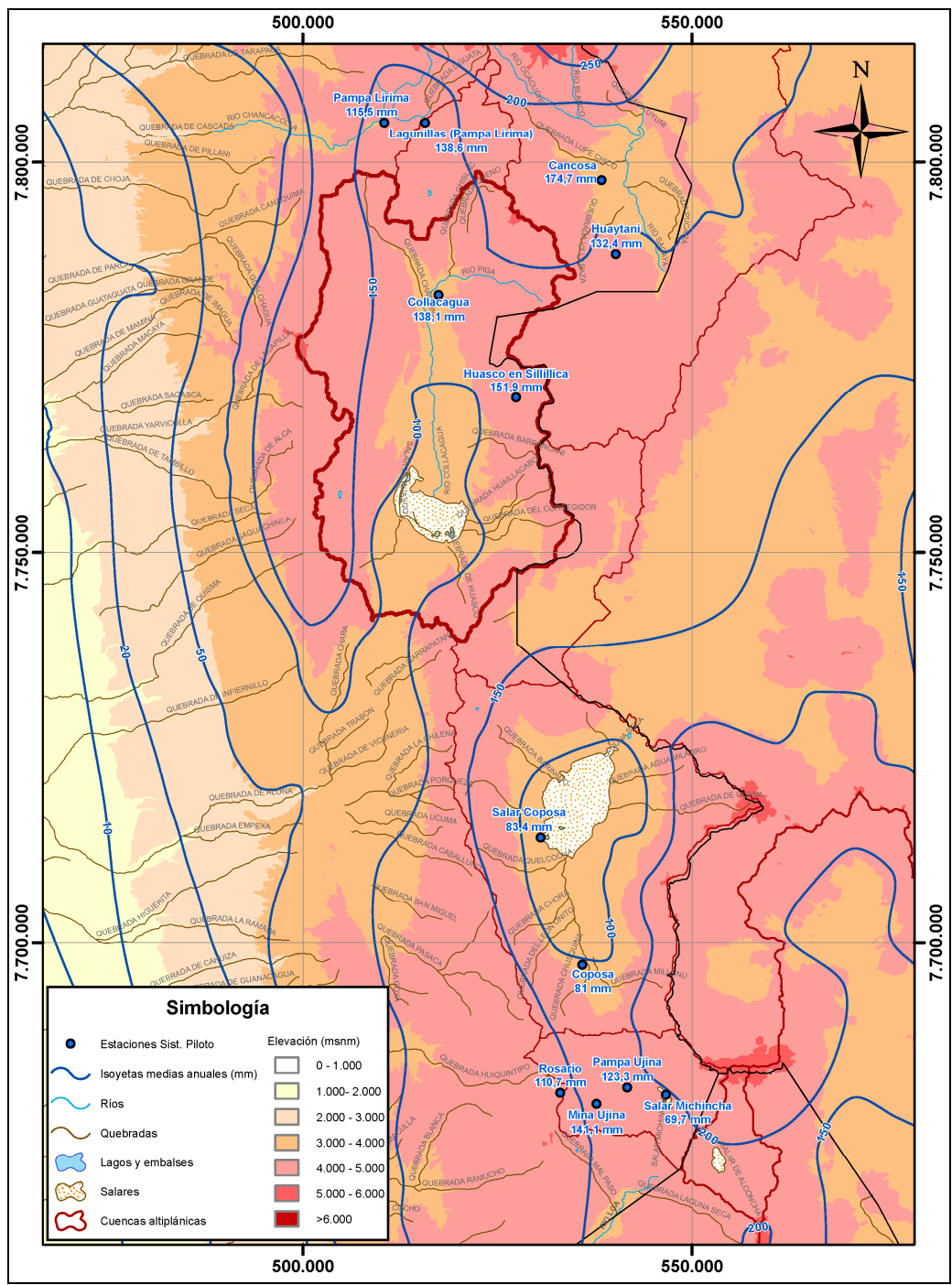


Figura 3-2: Mapa de Isoyetas en la cuenca del Salar del Huasco

### 3.1.1 Descarga

En general la descarga en una cuenca se produce en la forma de escurrimientos superficiales o subterráneos, así como también por evapotranspiración desde lagunas, napas someras y vegetación. Por efecto de la explotación o intervención antrópica, ésta se produce normalmente a través de obras de captación como pozos y drenes.

Considerando que la zona de estudio corresponde a una cuenca cerrada, no existen en forma natural descargas de tipo superficial y predominan las descargas por evapotranspiración. Así también, no se han reconocido descargas subterráneas de origen antrópico y carácter permanente, pero si se asumen descargas de carácter superficial de este tipo debido a derechos de agua regularizados. Asimismo, sobre descargas hacia otras cuencas de forma natural no existen estudios que hayan concluido con certeza al respecto.

A continuación se presentan las estimaciones de las descargas en la cuenca del Salar del Huasco.

#### 3.1.1.1 Descargas por Evaporación

Se estimaron las descargas por evaporación desde superficies de agua libre (lagunas y cauces superficiales), desde sistemas de vegetación (vegas y bofedales) y desde las napas freáticas someras ubicadas bajo los suelos del salar.

##### a). 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 ( $E_0$ ) queda definida por la siguiente expresión:

$$E_0 = K_T \cdot E_T \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde  $E_0$  y  $E_T$  se expresan en (mm/día) y  $K_T$  es un parámetro adimensional.

El valor de la tasa media de evaporación de tanque se obtuvo de los datos registrados en las estaciones ‘Collacagua’ (DGA) y ‘Salar del Huasco’ (Collahuasi – GP Consultores).

El área ocupada por lagunas fue procesada de imágenes satelitales Landsat, captadas en noviembre de 2006. Otras zonas de agua libre donde ocurre evaporación, son aquellas correspondientes a escurrimientos superficiales. Los principales cauces presentes en la cuenca corresponden a los ríos Piga y Collacagua. Sus secciones fueron divididas en tramos a los que se ha asignando un ancho característico.

#### **b). Evaporación desde vegas y bofedales**

En diversos sectores de la cuenca, principalmente en el nacimiento de vertientes y en escurrimientos superficiales permanentes, se desarrollan pequeños sistemas vegetales mixtos denominados vegas y bofedales, que corresponden a formaciones que se establecen en un ambiente edáfico caracterizado por una condición de saturación permanente, presentando una gran diversidad biológica (Salazar, 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:

$$E_{cr} = K_T \cdot E_T \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde  $E_T$  y  $E_{cr}$  en mm/día y  $K_T$  adimensional.

Para determinar la evaporación de tanque en vegas y bofedales, se utilizó la información de la estación ‘Collacagua’, corrigiéndola según el gradiente de

evaporación de 0,933 mm/año·metro determinado en el estudio realizado por la DGA-PUC, 2010. Así, la tasa de evaporación de tanque en un cierto bofedal  $i$ , queda determinada por:

$$E_{T(i)} = (C_{coll} - C_{(i)}) \cdot \frac{0,933}{365} + E_{T(coll)} \quad \text{Ecuación 13}$$

donde:  $E_{T(coll)}$  es la evaporación de tanque media en la estación ‘Collacagua’ (6,1 mm/día),  $C_{(i)}$  representa la cota del bofedal  $i$  (msnm), obtenida a partir de las imágenes Landsat de Google Earth,  $C_{coll}$  corresponde a la cota de la estación ‘Collacagua’ (3.990 msnm), y  $E_{T(i)}$  es la evaporación de tanque trasladada al bofedal  $i$ .

Por otra parte, la relación entre la evapotranspiración de referencia y la que experimenta un suelo con vegetación está dominada por un factor de corrección conocido como coeficiente de cultivo ( $K_c$ ), el cual depende del tipo de cultivo y de su etapa de desarrollo, entre otros factores.

De esta forma la demanda hídrica de vegas y bofedales queda definida por:

$$ET_c = K_c \cdot E_{cr} \quad \text{Ecuación 14}$$

donde:  $ET_c$  evapotranspiración de las plantas (mm/día) y  $E_{cr}$  evapotranspiración de un cultivo de referencia, el cual se calcula con las dos ecuaciones planteadas arriba.

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 siete unidades a las que se le asignaron coeficientes de cultivo en función del período del año. En la presente investigación debido a la falta de información, 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 (0,68) de los propuestos por Salazar *et al.* (2001) para las diferentes unidades, excluyendo los determinados para afloramientos de agua en superficie.

El área cubierta por vegas y bofedales se determinó a través del análisis de imágenes satelitales de Google Earth, captadas entre septiembre de 2004 y diciembre de 2006.

**c). Evaporación desde suelo del salar y su entorno**

Se consideró las mediciones de evaporación realizadas con la metodología del domo en la cuenca del Salar del Huasco, con las cuales se construyó una curva de evaporación versus profundidad de la napa, como parte del estudio de la DGA-PUC (2010).

Para estimar las descargas desde el acuífero se discretizó la superficie del salar determinando aquellas representativas de diferentes profundidades de la napa.

La relación entre la topografía del terreno y la elevación del nivel freático se obtuvo a partir de la información proporcionada por 40 punteras distribuidas homogéneamente sobre el área del salar (Collahuasi– GP Consultores, 2008), cuyos registros de nivel fueron efectuados por Collahuasi– GP Consultores en enero de 2007.

**3.1.1.2 Descarga a través de vertientes naturales**

Como se ha descrito en el apartado 2.6 en el Salar del Huasco existen lagunas permanentes y esporádicas, alimentadas superficialmente por vertientes que brotan en las márgenes occidental y sur del salar.

Las vertientes de mayor relevancia son las denominadas Huasco Norte, Ermitaño, Huasco López, Jalsuri y Huasco Sur (Figura 2-4). La Dirección General de Aguas realizó mediciones sistemáticas de caudales en dos vertientes ubicadas en el contorno oeste del salar (vertiente Huasco Norte y Ermitaño). En las vertientes del sector sur, Collahuasi–GP Consultores ha realizado aforos puntuales, evaluado la calidad de las aguas afloradas y evaporadas, y analizado los requerimientos hídricos de los humedales que ellas abastecen.

Se han reconocido tres lagunas permanentes (laguna Grande, laguna Jalsure y sistema de lagunas interiores) y dos lagunas estacionales (laguna Huasco Norte y

Laguna 1 (L<sub>1</sub>)), como se observa en la Figura 2-4. Mediante el análisis de imágenes satelitales Landsat captadas en el período 1973 – 2005 e imágenes de alta resolución Quickbird entre los años 2005 y 2007, Collahuasi–GP Consultores estimó la superficie de los espejos de agua en los 5 sistemas reconocidos.

## **3.2 Caracterización Hidrogeoquímica**

### **3.2.1 Antecedentes Hidrogeoquímicos**

Se recopilaron datos de análisis químicos que hayan sido tomados en las fuentes de agua de la cuenca de estudio. El primer antecedente revisado fue la base de datos química del Departamento de Estudios y Planificación (DEP) de la DGA, la cual fue complementada con información de otros estudios como son los informes de JICA-DGA-PCI (1995), Risacher et al. (1999), INVEREX (2001), Acosta (2004) y Collahuasi– GP Consultores Ltda. (2003; 2004; 2005).

Así también, como parte del desarrollo del estudio de la DGA-PUC “Levantamiento Hidrogeológico para el Desarrollo de Nuevas Fuentes de Agua en Áreas Prioritarias de la Zona Norte de Chile, XV, I, II y III Regiones”; entre los días 7 y 13 de setiembre de 2008 se efectuó una campaña de muestreo de aguas en la cuenca de estudio. En total se tomaron 21 muestras de agua, de las cuales nueve muestras corresponden a pozos, ocho a manantiales y cuatro a ríos. A todas las muestras se les realizaron análisis químicos e isotópicos en laboratorio, además de análisis físicos y químicos en campo.

Los iones mayoritarios en las aguas presentan concentraciones habitualmente superiores a 5 mg/L y suman el 99% en peso de las especies disueltas. Estos iones suelen ser los aniones: cloruro (Cl<sup>-</sup>), sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>) y bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) y los cationes: sodio (Na<sup>+</sup>), potasio (K<sup>+</sup>), magnesio (Mg<sup>+2</sup>) y calcio (Ca<sup>+2</sup>). El ión nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) se suele considerar dentro de los elementos mayoritarios aunque raramente sus altas concentraciones son de origen natural.



A fin de trabajar con la información disponible, se evaluó la calidad de los análisis químicos a través del cálculo del balance iónico de las muestras que reportaban todos los elementos mayoritarios ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{NO}_3^-$ ), donde la suma de miliequivalentes (meq) de aniones debe ser prácticamente igual a la suma de miliequivalentes (meq) de cationes. Este análisis se hace tanto para las aguas subterráneas como superficiales, las cuales deben mostrar siempre un equilibrio entre las cargas eléctricas de sus especies disueltas. Este equilibrio se comprueba teniendo en cuenta las contribuciones iónicas de los elementos mayoritarios calculando el error de balance mediante la siguiente fórmula:

$$\text{error}(\%) = 200 \cdot \frac{\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}}{\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones}} \quad \text{Ecuación 15}$$

El error máximo admitido (en valor absoluto) fue de un 10%. Las muestras con errores de balance superiores a los admitidos son poco confiables y no fueron consideradas en el análisis de los datos. Así también, los errores de balance negativos indican que la concentración de alguna (o algunas) de sus especies aniónicas han sido sobreestimadas, o bien que los análisis de las especies catiónicas han subestimado alguna de estas concentraciones. Los errores de balance positivos, indican lo contrario.

Adicionalmente, se verificaron las siguientes relaciones para evaluar la calidad de los análisis químicos:

$$\text{Sólidos Disueltos Totales (SDT)} \approx 0,55-0,76 \cdot \text{Conductividad } (\mu\text{S}/\text{cm})$$

$$\text{Sólidos Disueltos Totales (SDT)} = \Sigma \text{iones} + \text{Silicio (Si)}$$

$$\text{Conductividad } (\mu\text{S}/\text{cm a } 18^\circ\text{C}) \approx [85-90] \cdot \Sigma \text{ cationes (meq/L)}$$

Así también, generalmente en las aguas subterráneas los iones mayoritarios presentan las siguientes relaciones:

$$\text{Na (meq/l)} \gg \text{K (meq/l)} \quad \text{Ca (meq/l)} \geq \text{Mg (meq/l)}$$

$$\text{Ca (meq/l)} \geq \text{SO}_4 \text{ (meq/l)} \quad \text{Na (meq/l)} \geq \text{Cl (meq/l)}$$

### 3.2.2 Composición Química de las Aguas

Para el estudio de la composición de las aguas se utilizó los gráficos hidrogeoquímicos como son los diagramas de Piper, de Stiff y de Schoeller, los cuales representan el quimismo de las muestras a partir de las concentraciones de sus iones mayoritarios. Así también para evaluar los rangos de concentraciones existentes en las distintas fuentes de aguas (subterráneas, superficiales, precipitaciones) se emplearon los diagramas de caja. A continuación se detallan cada uno de los diagramas empleados:

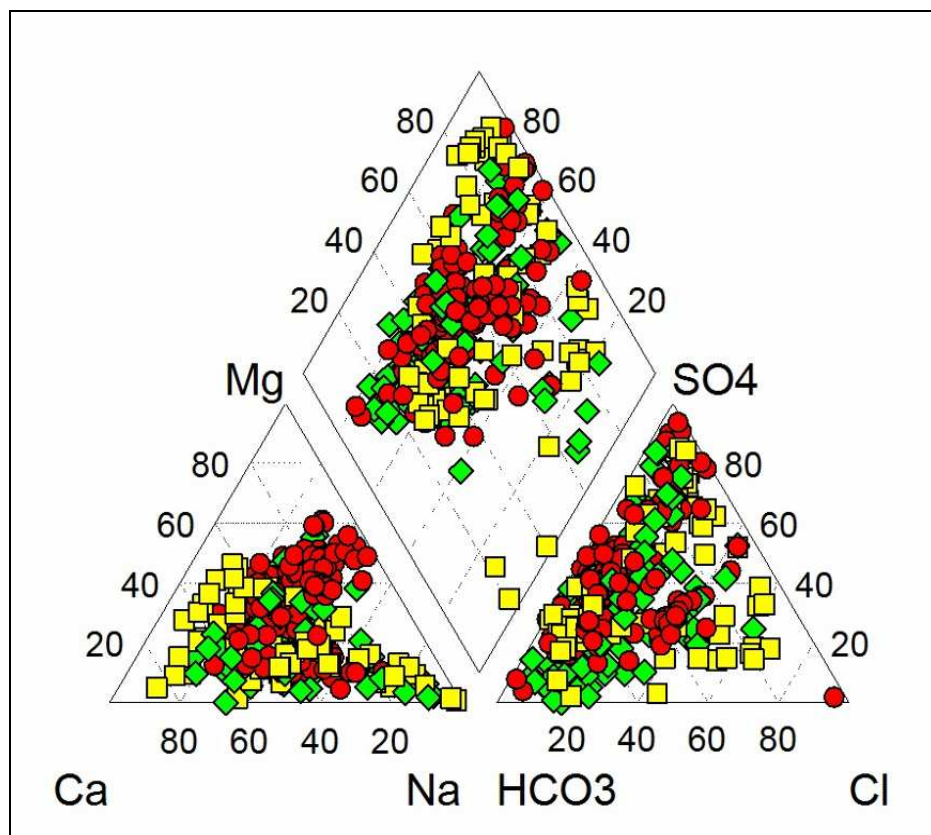
**Diagramas Piper y Durov:** Los diagramas Piper (Figura 3-3) proporcionan una visión de la composición de las aguas, sin tener en cuenta su grado de salinización. Permiten representar un número ilimitado de muestras en un mismo gráfico lo que, en una determinada área, proporciona una visión global de las distintas composiciones de agua existentes. También se pueden utilizar para estudiar la composición de una misma muestra en el tiempo. Las proporciones relativas de cationes y aniones son representadas en dos diagramas triangulares, y son proyectadas en un diagrama en forma de rombo que muestra la relación entre los aniones y cationes en conjunto. Cada muestra está representada con un mismo símbolo en cada uno de los diagramas.

Así, los tres símbolos en el diagrama, uno en cada triángulo y otro en el rombo, indican la concentración relativa de los iones disueltos mayoritarios constituyentes del agua natural y esto determina la denominación de un agua en cuanto a su composición.

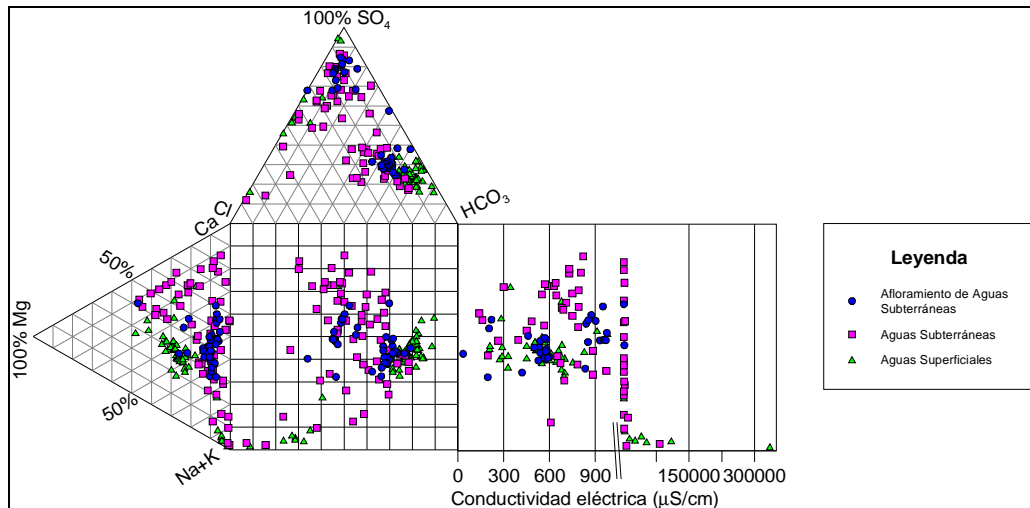
Los diagramas Durov (Figura 3-4) además relacionan la composición química de las aguas con los valores de conductividad eléctrica (CE), la cual representa la capacidad para conducir electricidad y se encuentra relacionada con la fuerza iónica de la solución (Vitoria, 2009).

**Diagramas de Stiff:** Consideran la concentración de los iones mayoritarios y son muy útiles para su representación espacial en un mapa y entender las variaciones

composicionales y de aumentos de concentraciones a lo largo de los sentidos de flujo, o atravesando sistemas hídricos particulares (salares, campos geotermales, formaciones geológicas particulares, etc.). Permiten identificar muy bien los distintos tipos de agua existentes en un área, además del grado de salinización de las mismas.

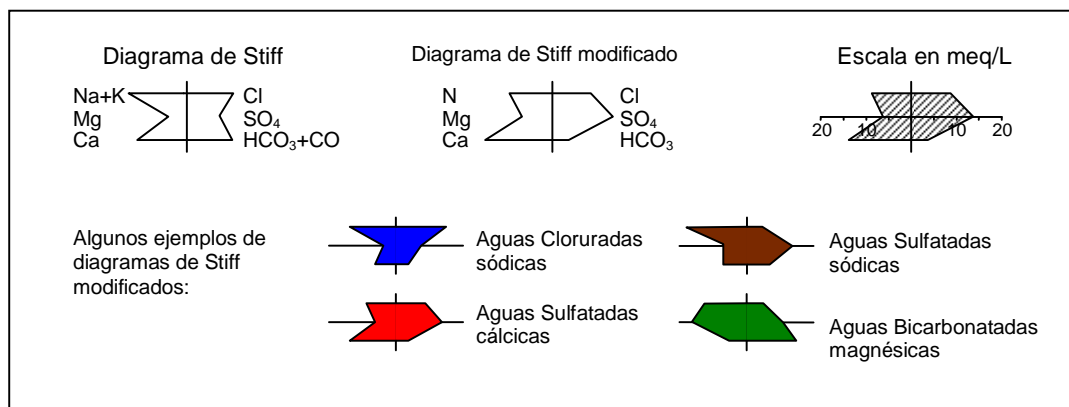


**Figura 3-3: Ejemplo de Diagrama de Piper**



**Figura 3-4: Ejemplo de Diagrama de Durov**

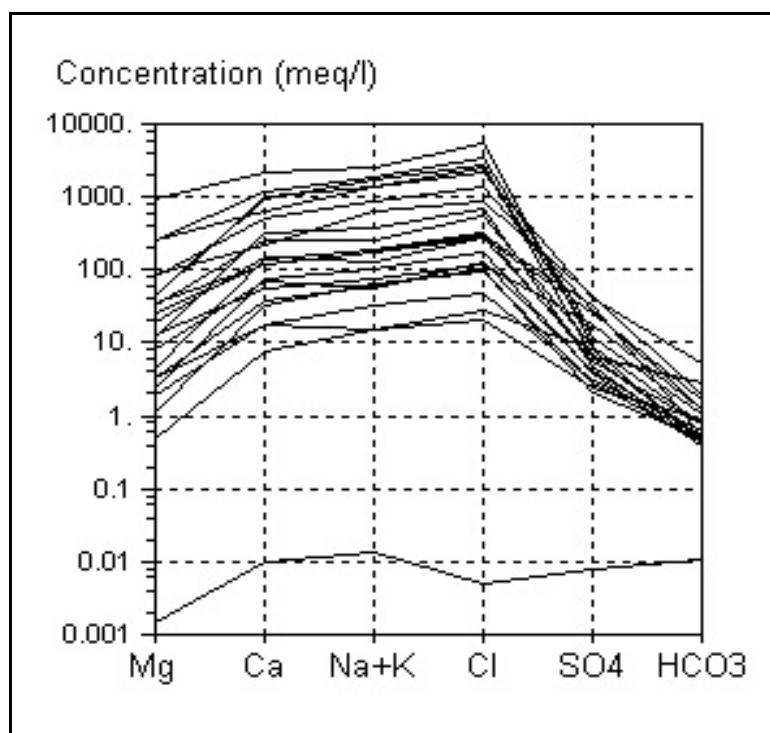
Los diagramas de Stiff (Figura 3-5) se encuentran divididos mediante una línea vertical, representando los aniones en el lado izquierdo y los cationes en el lado derecho. Las concentraciones son proporcionales a las escala gráfica horizontal de la figura por lo que cuanto más ancho es un diagrama, más mineralizada se encuentra el agua a la que representa.



**Figura 3-5: Ejemplos de Diagramas de Stiff**

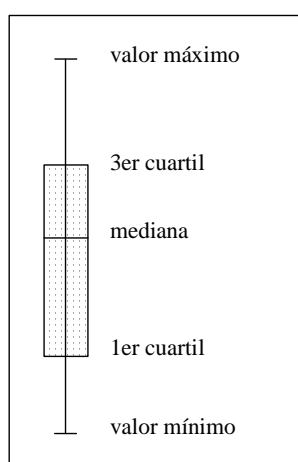
**Diagramas de Schoeller o de Columnas Verticales:** Permiten representar también varios análisis a la vez los cuales son fácilmente comparables. Se representan las concentraciones de distintos aniones, cationes o una suma de ellos, en miliequivalentes por litro (meq/l) utilizando una escala logarítmica, y uniendo los puntos mediante una secuencia de líneas (Figura 3-6).

Si bien la escala logarítmica no es apropiada para observar pequeñas diferencias en la concentración de cada ión entre distintas muestras de agua, sí es útil para visualizar en un mismo gráfico las concentraciones de todos los elementos mayoritarios aunque estén presentes en concentraciones con distintos órdenes de magnitud, e incluso comparar muestras de salinidades muy diferentes. Se pueden observar bien las relaciones entre iones asociadas a la inclinación de las líneas. Sirve por lo tanto para estudiar evoluciones temporales de agua en un mismo punto y variaciones composicionales en aguas de diferentes localidades.



**Figura 3-6: Ejemplo de Diagrama de Schoeller**

**Diagramas de Caja:** Permiten conocer la distribución (normal o asimétrica) de cada parámetro representado junto con los valores máximos y mínimos del compuesto. También se presentan los cuartiles primero, segundo y tercero que representan el valor máximo del 25% de las muestras, la mediana y el valor máximo del 75% de las mediciones de todas las muestras, respectivamente (Figura 3-7).



**Figura 3-7: Ejemplo de Diagrama de Caja**

### 3.2.3 Composición Isotópica

Para el estudio de la composición isotópica de las muestras de agua se utilizaron los isótopos estables deuterio ( $^2\text{H}$ ) y oxígeno 18 ( $^{18}\text{O}$ ), los cuales se expresan mediante la desviación isotópica ( $\delta^2\text{H}$  o  $\delta^{18}\text{O}$ ) por mil (‰) respecto a un patrón internacional a partir de la expresión siguiente:

$$\delta(\text{‰}) = \frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{muestra}} - (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{V-SMOW}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{V-SMOW}}} \times 1000 \quad \text{Ecuación 16}$$

donde V-SMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water) corresponde al estándar internacional de referencia que representa la composición promedio del agua oceánica y es reproducido y entregado a los laboratorios de análisis por la Agencia

Internacional de Energía Atómica (IAEA) y  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  y relaciona a los isótopos “raros” ( $^2\text{H}$  y  $^{18}\text{O}$ ) respecto a los más abundantes ( $^1\text{H}$  y  $^{16}\text{O}$ ).

Los valores positivos de la desviación isotópica ( $\delta$ ) indican que la muestra tiene una mayor concentración del isótopo pesado correspondiente ( $^2\text{H}$  ó  $^{18}\text{O}$ ) que el estándar, está enriquecida, y al contrario, un valor negativo, indica que la muestra está empobrecida en el isótopo pesado respecto al patrón internacional.

El fraccionamiento isotópico se produce cuando se da una reacción o cambio de estado de un cuerpo de agua y éste cambia su composición isotópica (por diferencias de reactividad de los isótopos).

La utilización de las composiciones isotópicas de la molécula de agua, y el análisis de estos fraccionamientos, permitió conocer los procesos físico-químicos que han afectado al agua y por lo tanto conocer su origen y evolución. Este análisis se realizó a través de la caracterización isotópica del agua de lluvia, dado que ésta representa en general la mayor fuente de recarga hídrica en los acuíferos.

### 3.2.3.1 *Composición de las precipitaciones:*

Para la evaluación de la composición isotópica ( $\delta^2\text{H}$  y  $\delta^{18}\text{O}$ ) del agua de lluvia se utilizó como referencia la ecuación denominada recta meteórica mundial (MWL, meteoric water line), la cual fue definida por Craig en 1961 como:

$$\delta\text{D} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10 \quad \text{Ecuación 17}$$

Así también, se utilizó la recta meteórica sin exceso de deuterio (término libre en la MWL) y la recta meteórica local (LMWL), definida por Aravena et al. (1999) para la zona norte de Chile como:

$$\delta\text{D} = 7,8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 9,7 \quad \text{Ecuación 18}$$

Las composiciones isotópicas de cualquier lluvia presentan una relación entre ellas que las sitúa sobre la MWL, y en cada localidad sobre la LMWL, muy parecida a la anterior. Considerando que en el Altiplano chileno la precipitación es la única fuente

de recarga de los acuíferos, es muy probable que la composición de las lluvias sea parecida a la de las aguas subterráneas. Sin embargo, parte de las aguas de lluvia no llegan a recargar al acuífero porque son afectadas por la evaporación cuando se encuentran como humedad del suelo. Así, las aguas de recarga en el acuífero son aguas mezcla entre la composición promedio de las lluvias y de éstas con una cierta afección por la evaporación, por lo que su composición se sitúa entre la recta MWL y la recta MWL sin exceso de deuterio.



## 4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Caracterización Hidrogeológica

#### 4.1.1 Marco Geológico

##### 4.1.1.1 *Geología Estructural*

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

#### **Fallas**

Es posible apreciar a escala macro-estructural, la presencia de un dominio de fallas, con dirección N-S (Figura 4-1). Una importante falla se presenta en el límite oeste del salar, la que pone en contacto a la Ignimbrita Huasco (Tsh) con los sedimentos cuaternarios (Qs), que rellenan la cuenca sedimentaria que se corresponde a un graben, limitado a ambos lados por fallas NE-SW. Estas estructuras tienen una gran importancia desde el punto de vista hidrogeológico, ya que pueden funcionar como zonas de alta conductividad hidráulica o como barreras para el flujo de agua subterránea (Tröger y Gerstner, 2004).

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

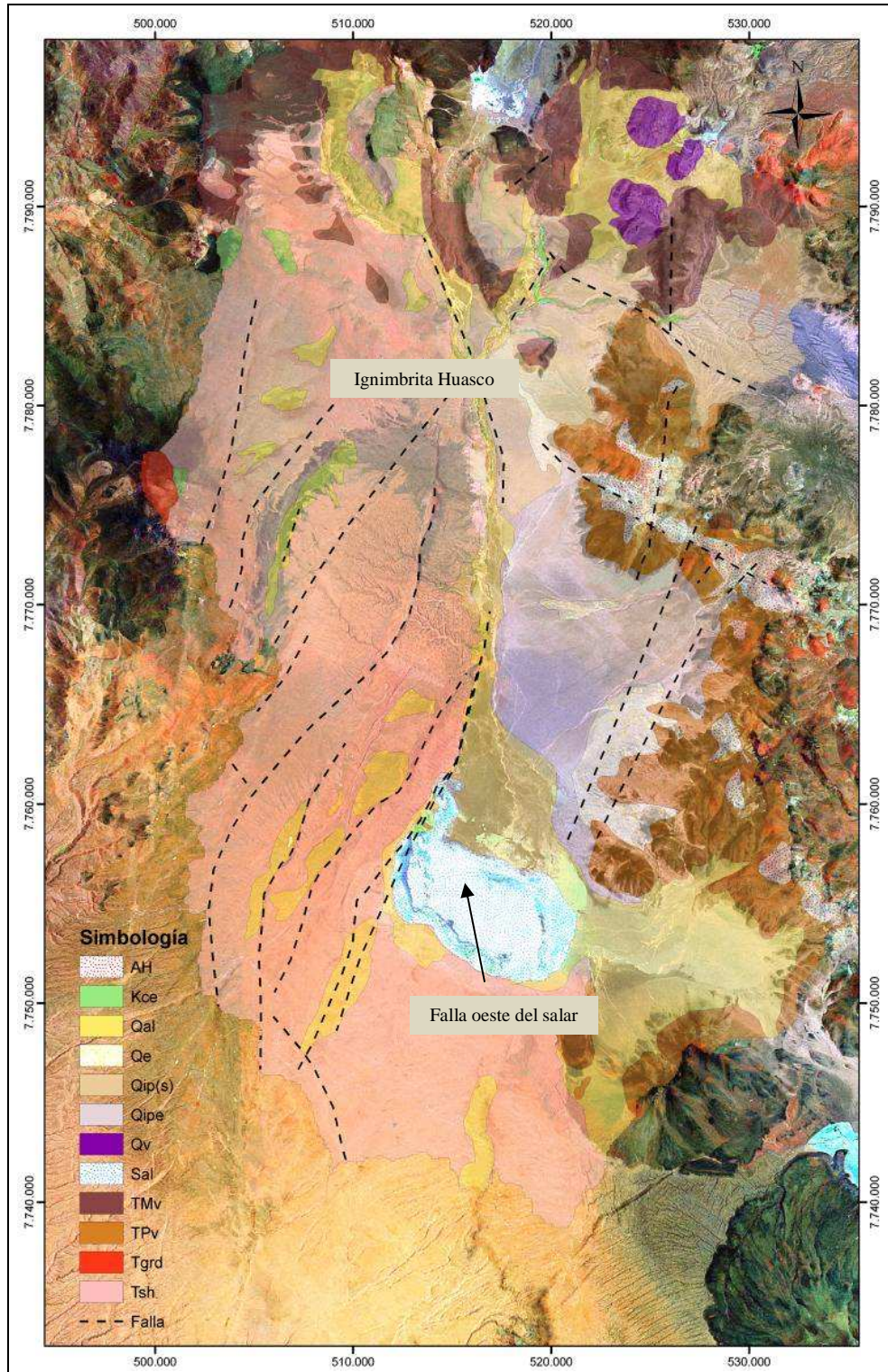


Figura 4-1: Fallas reconocidas en la cuenca Salar del Huasco

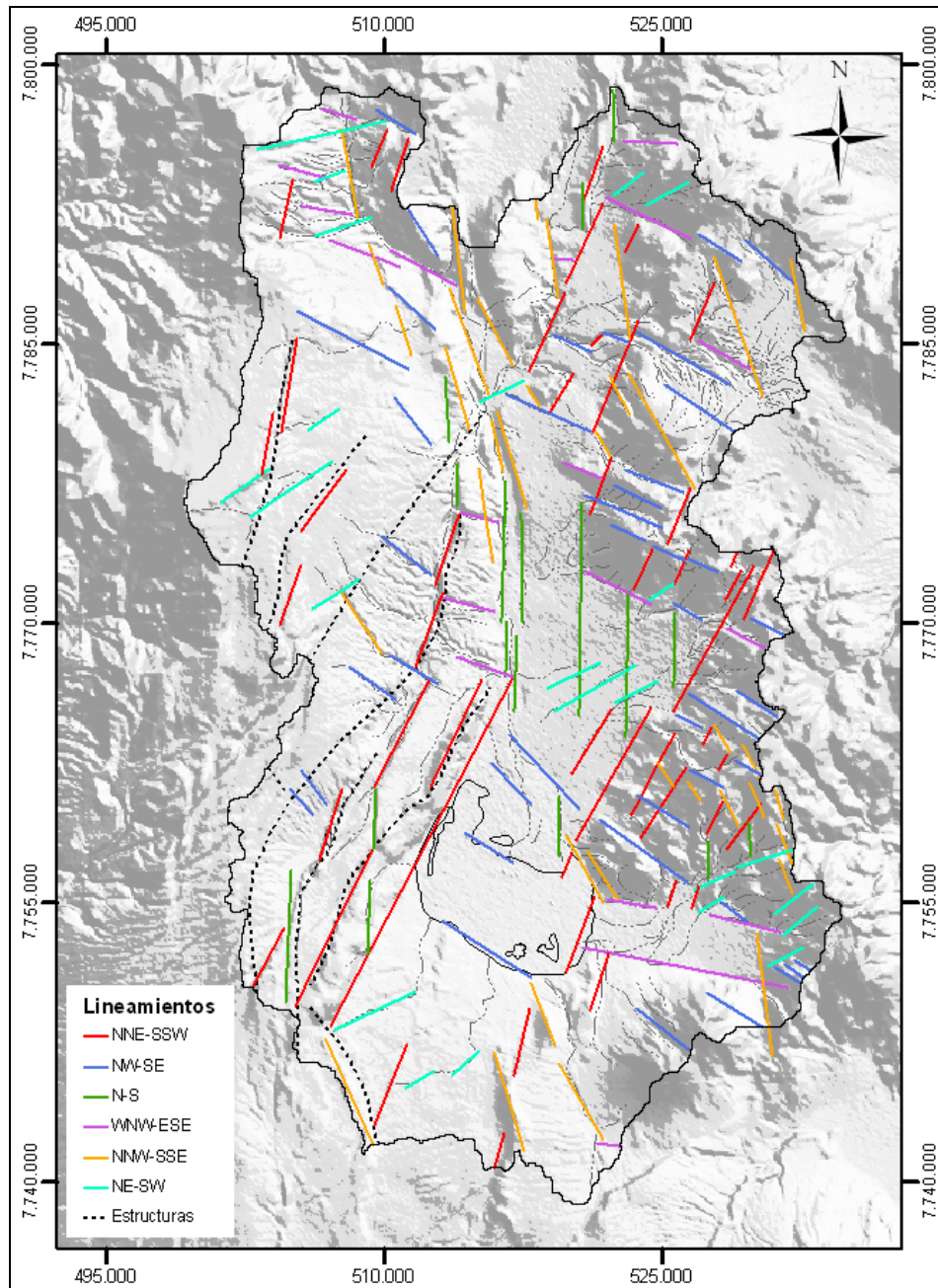
### **Lineamientos**

Estructuras como fallas, fracturas y diaclasas, suelen expresarse en superficie mediante rasgos lineales. En esta cuenca las estructuras se expresan por alineación de topografía, patrón de drenaje lineal y afloramientos de roca truncados (Figura 4-2).

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

#### ***4.1.1.1 Estratigrafía de Pozos***

En la cuenca del Salar del Huasco existen 44 sondajes, que en total suman 8 806 m perforados. De las 44 perforaciones, 27 corresponden a pozos de exploración de la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi (CMDIC), y se identifican con la letra E-(n° pozo), 15 corresponden a pozos de producción y se identifican con la letra P-(n° pozo), y dos son parte del estudio JICA-DGA, 1995 identificados como J-G y J-10. La mayoría de los sondajes se encuentran distribuidos dentro de un sistema estructural que limita el oeste de la cuenca, mientras una fracción menor está en Pampa Rinconada, al este del salar.



**Figura 4-2: Principales lineamientos reconocidos en la cuenca Salar del Huasco**

La mayoría de pozos cuentan con información estratigráfica de detalle. En la Tabla 4-1 y Anexo A se presentan las características generales de los pozos. En general, éstos se distribuyen sobre las pampas formadas por relleno volcanosedimentario, en las zonas topográficamente deprimidas de la cuenca, y a lo largo del segmento norte del río Collacagua, donde están en contacto con la Ignimbrita Huasco, por el oeste, y con los depósitos de relleno, hacia el este (Figura 4-3). El sector del salar propiamente tal carece de perforaciones profundas y consecuentemente de toda información litoestratigráfica.

**Tabla 4-1: Pozos profundos en la cuenca Salar del Huasco**

Pozo	Toponimia	UTM Norte (m)	UTM Este (m)	Elevación (msnm)	Profundidad (m)
E1	Pampa Sillillica	7.765.349,8	520.502,2	3.894,61	250
E2	Pampa Sillillica	7.765.996,5	521.615,8	3.928,47	250
E3	Pampa Sillillica	7.764.203,3	520.985,7	3.882,80	250
E4	Pampa Sillillica	7.763.086,7	521.476,8	3.838,80	223
E5	Pampa Sillillica	7.766.498,7	520.358,3	3.899,02	206
E6	Pampa Sillillica	7.767.647,6	520.217,4	3.905,58	255
E7	Pampa Rinconada	7.752.890,4	525.800,2	3.819,30	252
E8	Pampa Rinconada	7.751.913,6	525.913,0	3.816,81	164
E9	Pampa Rinconada	7.753.802,0	525.700,8	3.826,93	177
E10	Pampa Rinconada	7.754.812,3	525.594,4	3.839,19	160
E11	Sillillica Norte	7.771.072,0	516.779,0	3.829,33	246
E12	Sillillica Norte	7.771.075,0	516.792,0	3.829,12	35
E13	Sillillica Norte	7.771.111,0	517.781,0	3.846,21	252
E14	Sillillica Norte	7.772.227,0	516.693,0	3.837,02	220
E15	Sillillica Norte	7.772.205,0	516.701,0	3.836,97	30
E16	Sillillica Norte	7.773.315,0	516.830,0	3.841,04	250
E17	Sillillica Norte	7.772.682,0	517.838,0	3.844,73	252
E18	Peña Blanca	7.777.863,0	516.757,0	3.855,45	180
E19	Peña Blanca	7.780062,0	516.112,0	3.864,14	168
E20	Peña Blanca	7.776523,0	518.983,0	3.962,47	186
E21	Pampa Batea	7.780888,0	519.593,0	4.025,78	174
E22	Río Batea	7.782.944,0	520.287,0	4.011,29	180

<b>Pozo</b>	<b>Toponimia</b>	<b>UTM Norte (m)</b>	<b>UTM Este (m)</b>	<b>Elevación (msnm)</b>	<b>Profundidad (m)</b>
E23	Caserio Collacagua	7.783.842,0	517.413,0	3.900,40	204
E24	Peña Blanca	7.780.032,0	516.122,0	3.863,92	18
E25	Peña Blanca - Collacagua	7.782.900,0	520.261,0	-	60
E26x	Peña Blanca - Collacagua	7.780.380,0	514.184,0	-	280
E27	Sillillica Norte	7.770.791,0	514.885,0	-	250
P1	Pampa Sillillica	7.765.368,9	520.535,6	3.895,49	246
P2	Pampa Sillillica	7.767.653,1	520.257,6	3.907,12	250
P3	Pampa Sillillica	7.766.497,1	520.398,2	3.900,18	219
P4	Pampa Sillillica	7.763.075,9	521.439,5	3.862,21	198
P5	Pampa Rinconada	7.752.924,2	525.789,7	3.819,12	250
P6	Pampa Rinconada	7.751.957,1	525.912,3	3.816,73	134
P7*	Pampa Rinconada	7.753.770,7	525.716,3	3.826,54	177
P8*	Sillillica Norte	7.771.074,0	516.811,0	3.829,14	240
P8A	Sillillica Norte	7.771.116,7	516.744,8	3.829,43	230
P9	Sillillica Norte	7.772.726,3	517.812,6	3.844,97	246
P10	Sillillica Norte	7.773.338,7	516.770,8	3.840,90	248
P11	Sillillica Norte	7.771.101,2	517.779,6	3.846,22	234
P12	Peña Blanca	7.780.033,0	516.145,0	3.864,09	180
P13	Río Batea	7.782.905,0	520.272,0	4.009,56	180
P14	Sillillica Norte	7.770.829,6	514.878,7	3.872,43	240
J-10	Pampa Sillillica	7.766.372,0	517.668,0	3.813,50	205
J-G	Pampa Peña Blanca	7.775.786,0	516.639,0	3.849,90	157

\* Pozos sin estratigrafía.

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

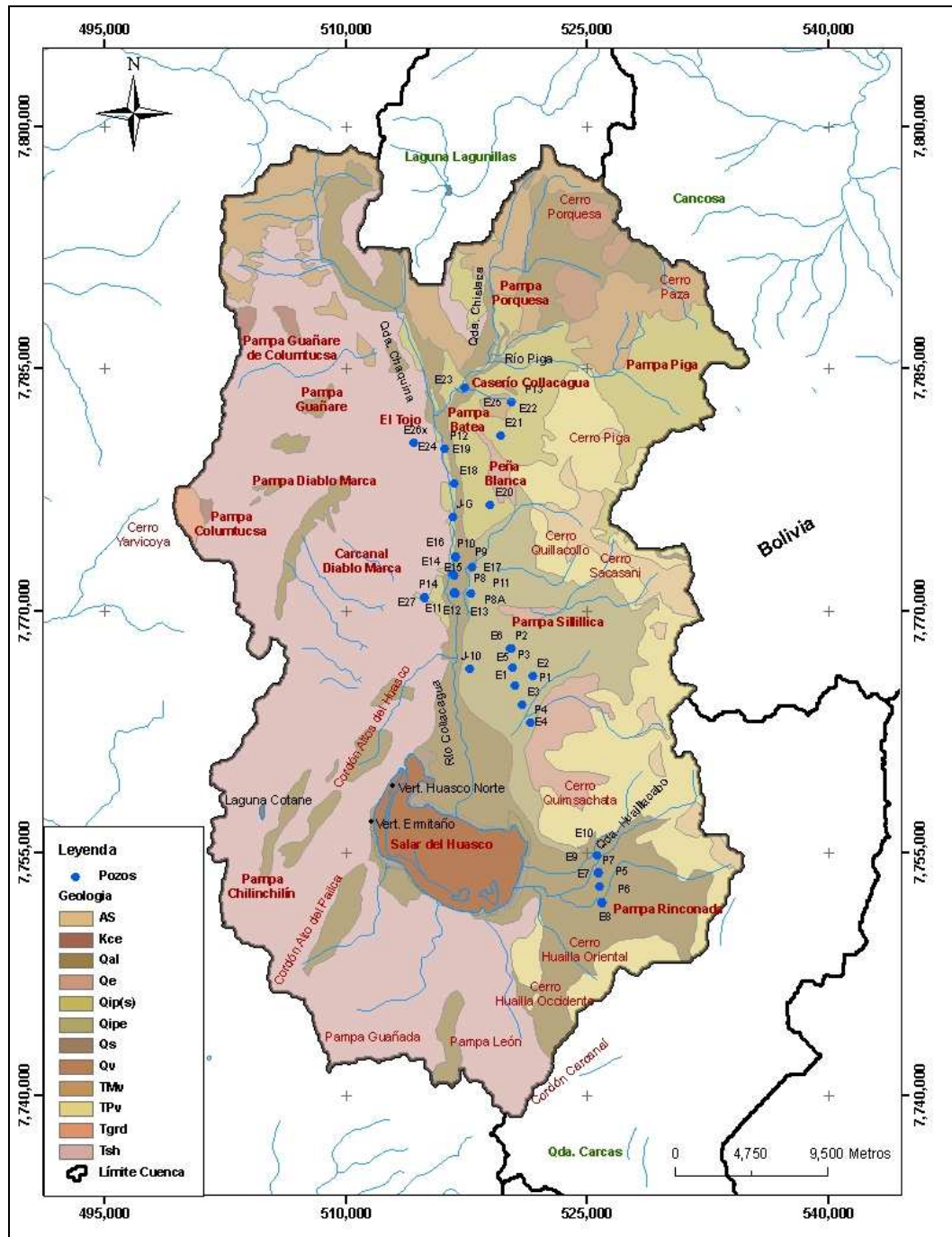


Figura 4-3: Ubicación de pozos de exploración y producción en la cuenca del Salar del Huasco

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

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

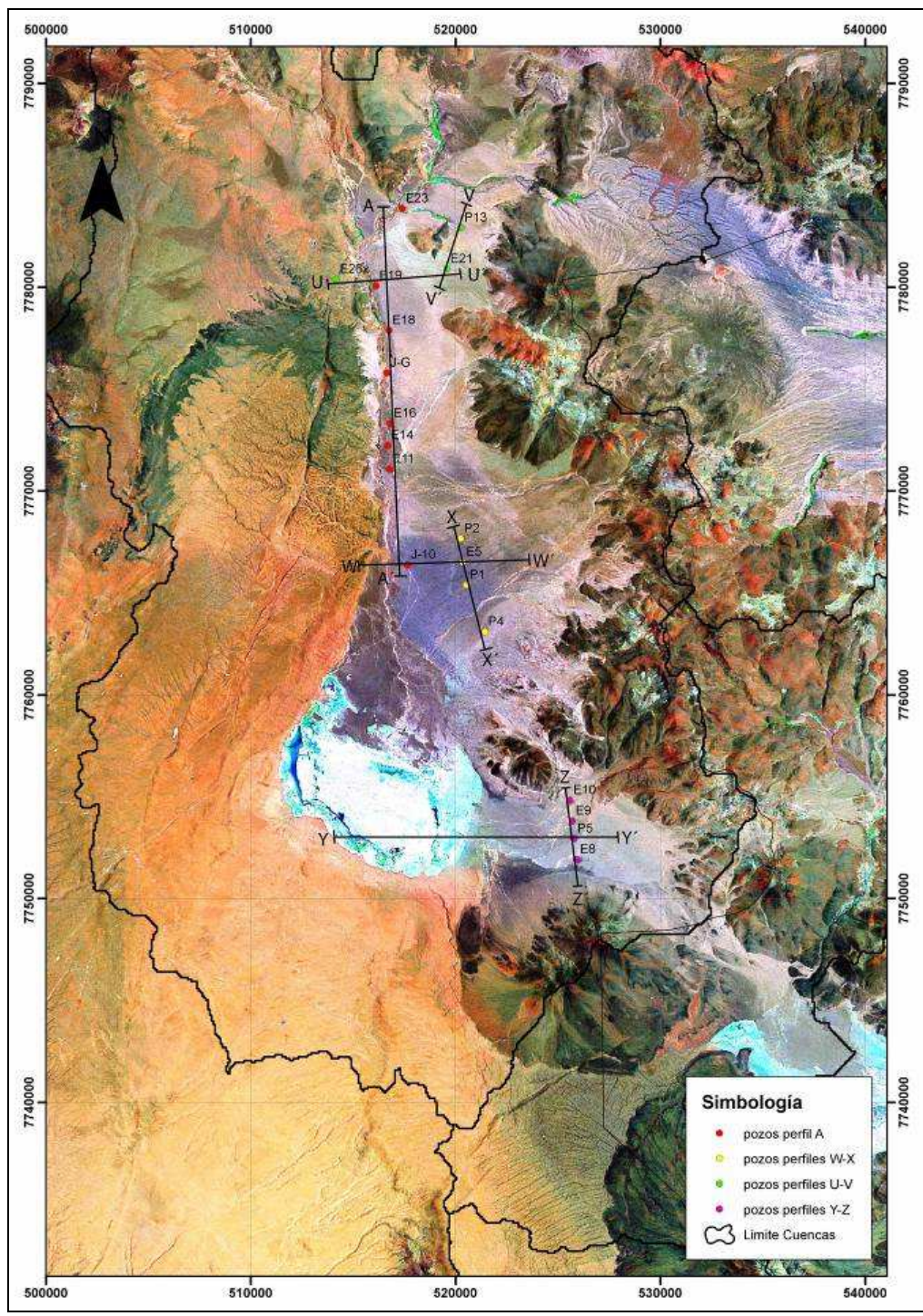
Al este del salar, en Pampa Rinconada, los pozos E-9, P-5 y E-8 presentan un nivel de gravas con arcilla cuyo espesor alcanza fácilmente 100 m. En P-5 se observa un nivel de tobas de 40 m de espesor sobre la roca volcánica reconocida en la base de todos los pozos.

#### **4.1.2 Unidades de Sub-superficie**

La descripción estratigráfica de los diferentes sondajes ha permitido agrupar las unidades estratigráficas principales a fin de facilitar su interpretación. La correlación entre las estratigrafías de los diferentes sondajes admite aproximarse a la distribución espacial de las secuencias de depositación en la sub-superficie y también a la geometría de la cuenca. En la Figura 4-4 se muestran los perfiles trazados en la cuenca, los cuales fueron realizados como parte del estudio de la DGA-PUC, (2009).

A continuación se presenta la interpretación de cada uno de los perfiles trazados.





Fuente: DGA-PUC, 2010  
**Figura 4-4. Ubicación de perfiles estratigráficos en cuenca Salar del Huasco (proyección sobre imagen LANDSAT)**

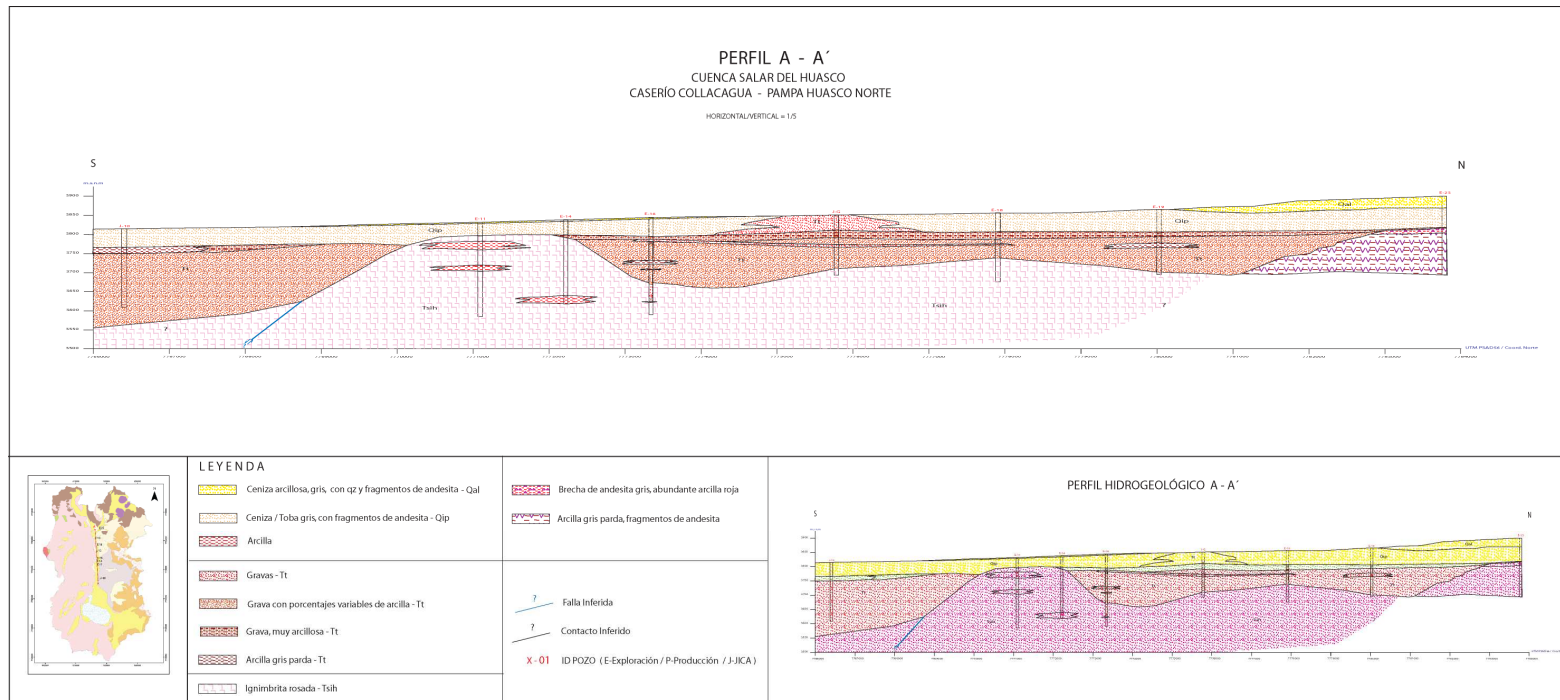
***Perfil A – A' (perfil A)***

Este perfil se reconstruyó en base a la integración de la información litológica obtenida a partir de los pozos J-10, E-11, E-14, E-16, J-G, E-18, E-19 y E-25. Consiste en un perfil longitudinal orientado sur a norte (Figura 4-6), que reconstruye la subsuperficie de la cuenca, coincidiendo con el sector donde se reconocen los depósitos asociados al flujo del río Collacagua, y coincidiendo también con la traza de una de las estructuras principales reconocidas en la cuenca del Salar del Huasco, donde se ponen en contacto rocas de la Ignimbrita Huasco, por el oeste, con depósitos terciarios, por el este.

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

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

Subyace a la unidad ignimbrítica cuaternaria una potente unidad de espesor variable, que se constituye principalmente por porcentajes variables de gravas y arcillas; y gravas, arenas y arcillas aisladas. En el perfil A (Figura 4-5) se reconoce una estratificación de los depósitos terciarios, que es de distribución homogénea a lo largo del perfil. La mayor potencia del depósito consiste en gravas con abundantes arcillas. El contenido de arcillas en las gravas varía de manera rítmica, entre gravas con abundante contenido en arcilla, y gravas con contenidos menores de arcillas, favoreciendo el almacenamiento preferencial del agua. Es importante notar que en el techo de la unidad se observa una capa con altos contenidos en arcilla, de unos 10 m de espesor, y que se compone por arcillas hacia el sur, y arcillas con pocas gravas, hacia el norte. Este estrato influye en el funcionamiento hidráulico de la cuenca, ya.



Fuente: DGA-PUC, 2009

Figura 4-5: Perfil A-A' en la cuenca del Salar del Huasco

que actuaría como semi-confinante. Los pozos E-16, J-G y E-18, permiten inferir que a unos 70 – 80 m de profundidad existe un depósito de gravas, de alto potencial hidráulico, de unos 3 - 4 m de espesor.

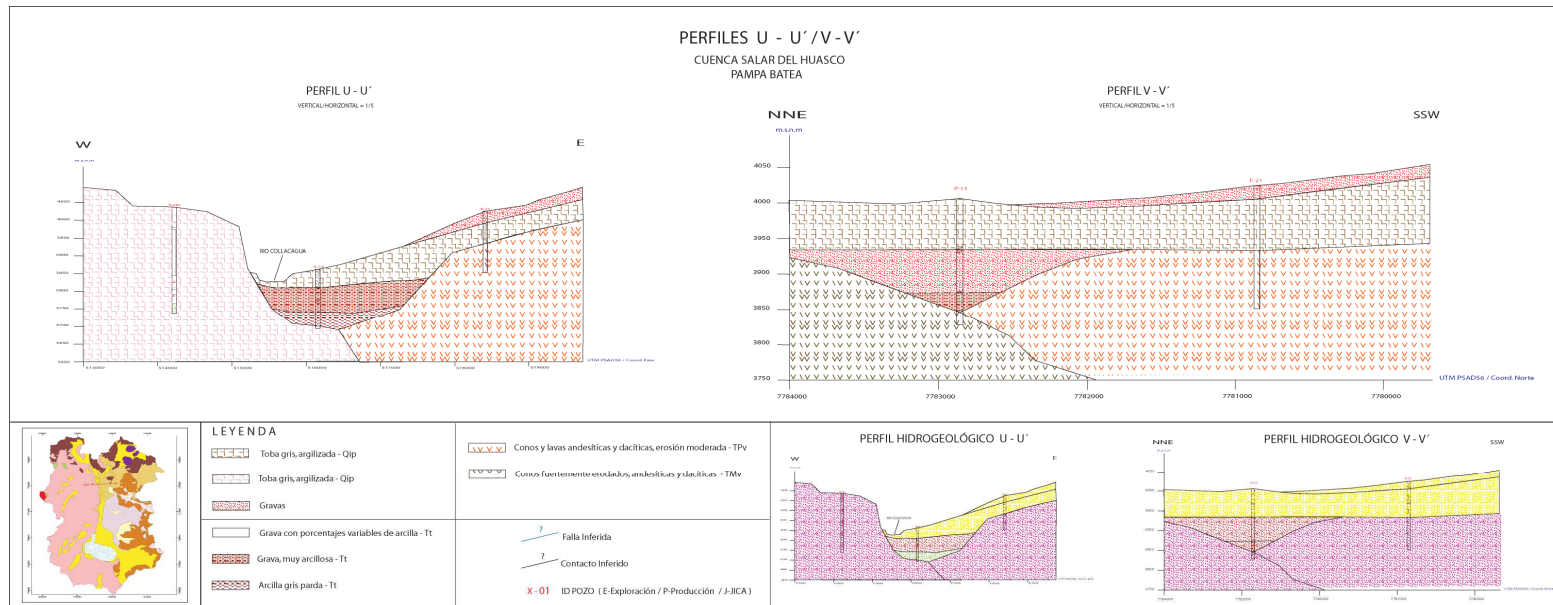
Los depósitos terciarios sobreyacen a rocas que corresponden a la Ignimbrita Huasco (Tsih). La roca tobácea tiene una morfología irregular que condiciona las potencias variables de los depósitos terciarios a lo largo del perfil. Bajo los pozos E-11 y E-14, la Ignimbrita Huasco subyace a la Ignimbrita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

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

Los perfiles U y V (Figura 4-6) describen el sector norte de la cuenca sedimentaria, donde hacia el este, se ubica la Pampa Batea

El perfil U es un perfil transversal, que se construye a partir de la información litológica de los pozos E-26X, E-19 y E-21. El perfil V es un perfil longitudinal, que también busca caracterizar los depósitos de la Pampa Batea, y se reconstruye a partir de los pozos P-13 y E-21.

El perfil U muestra rocas tobáceas de la Ignimbrita Huasco (Tsih) que se depositan al oeste, y que se ponen en contacto con rocas volcánicas del Plioceno (TPv) al este. Sobreyacen a estos, en el sector de la cuenca sedimentaria, unos 100 m de depósitos terciarios (Tt), que en este sector se constituye por arcillas gris-pardas en la base, y gravas muy arcillosas hacia el techo. Sobre los depósitos sedimentarios, se extiende la Ignimbrita Pastillos (Qip), que proviene del NE, y que rellena la Pampa Batea. Algunos sectores de la Pampa Batea se encuentran cubiertos por extensos conos aluviales, que pueden alcanzar hasta 15 m de espesor.



Fuente: DGA-PUC, 2009

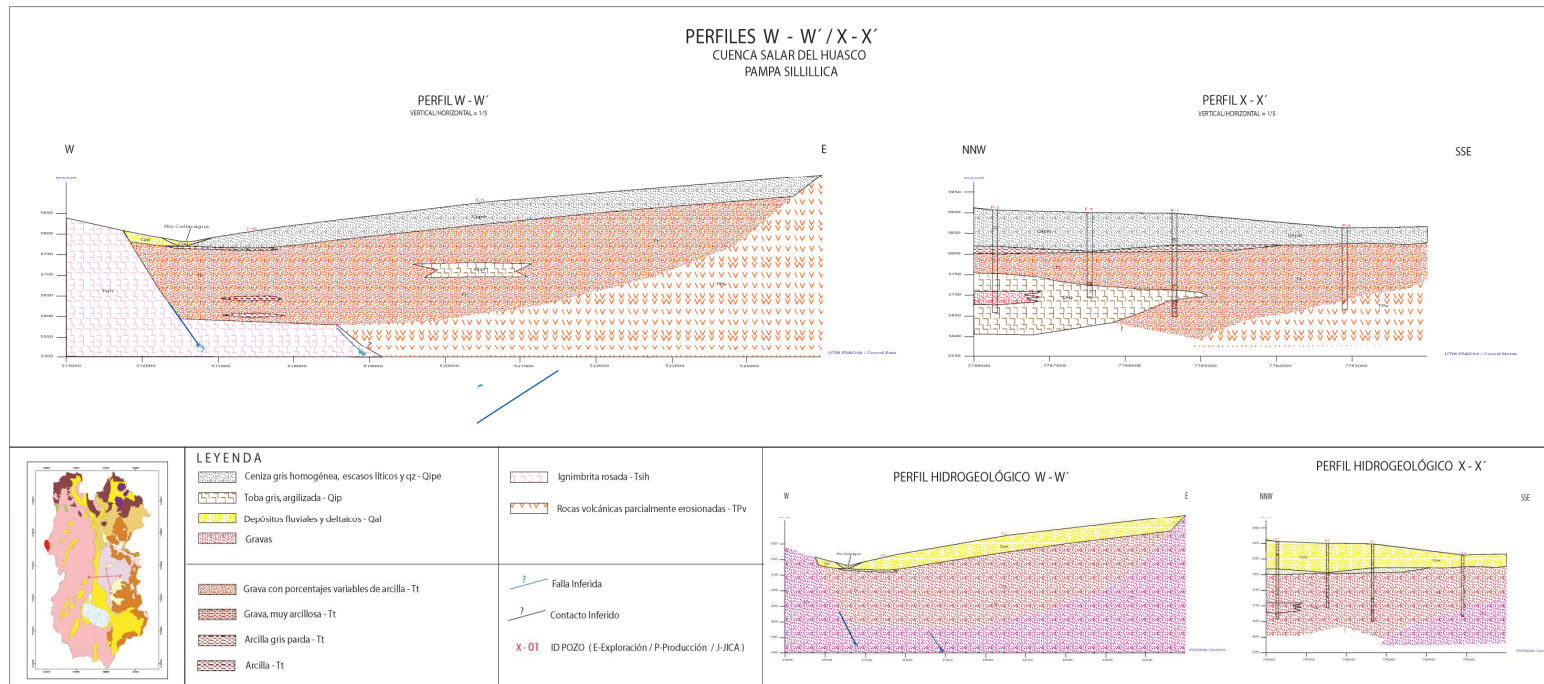
Figura 4-6: Perfiles transversales U y V en el Salar del Huasco

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

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

Los perfiles W y X (Figura 4-7) describen el sector central de la cuenca sedimentaria, donde hacia el este se ubica Pampa Sillillica. El perfil W es un perfil transversal, que se construye a partir de la información litológica de los pozos J-10 y E-5. El perfil X es un perfil longitudinal, que también busca caracterizar los depósitos de Pampa Silillica, y se reconstruye a partir de los pozos P-2, E-5, P-1 y P-4.

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



**Fuente: DGA-PUC, 2009**

**Figura 4-7: Perfiles transversales W y X en Salar del Huasco**

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

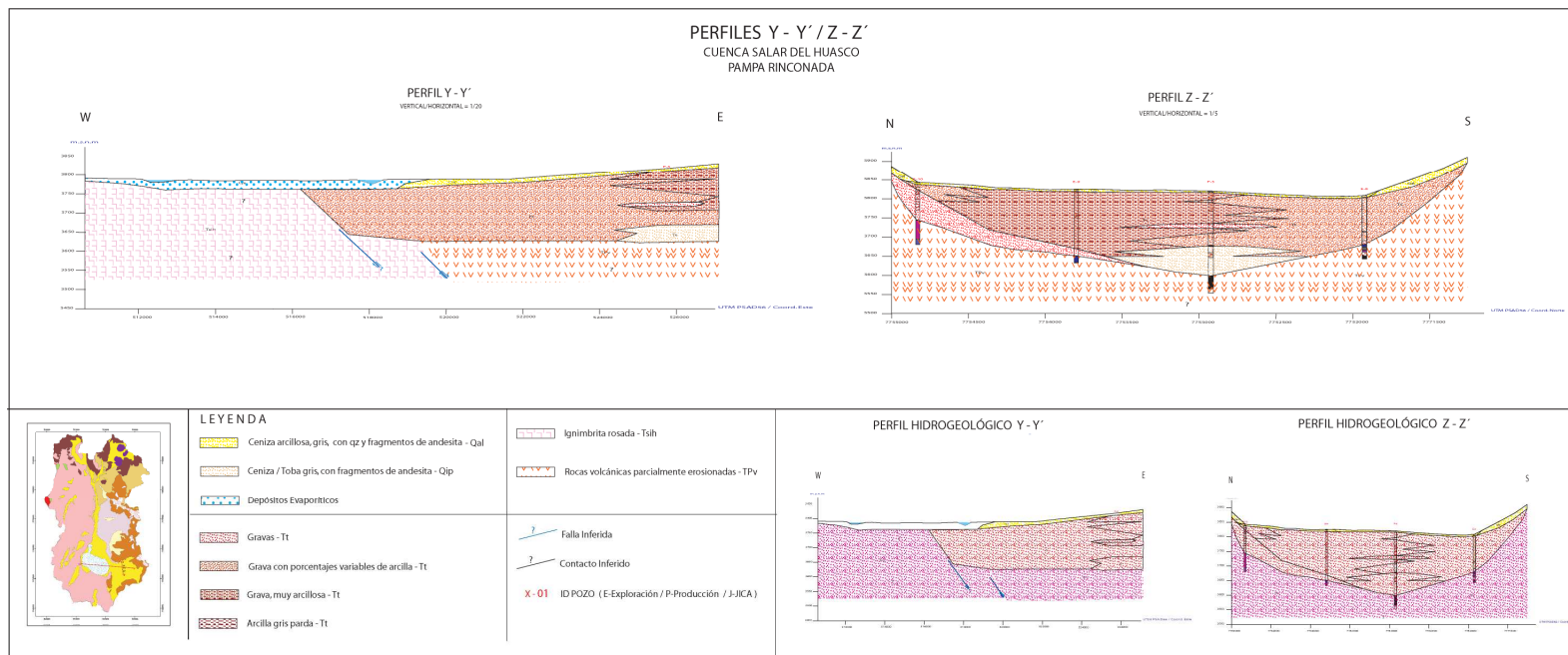
***Perfil Y – Y' / Perfil Z – Z' (perfil Y – perfil Z)***

Los perfiles Y y Z (Figura 4-8) describen al sector sur de la cuenca sedimentaria, donde hacia el este del salar del Huasco se ubica la Pampa Rinconada. El perfil Y es un perfil transversal, que se construye a partir de la información litológica del pozo P-5. El perfil Z es un perfil longitudinal, que busca caracterizar los depósitos de Pampa Rinconada, y se reconstruye a partir de los pozos E-10, E-9, P-5 y E-8.

El perfil Y describe la geología de subsuperficie bajo el salar. A pesar de que no existen datos litológicos para el sector del salar propiamente tal, puede inferirse que la mayor parte del salar se deposita sobre la Ignimbrita Huasco (Tsih). Más al este se produce un hundimiento estructural, que está cubierto por los depósitos terciarios (Tt) que rellenan la cuenca.

En el perfil Y el pozo P-5 indica que el relleno sedimentario se compone de una alternancia de gravas con bajos contenidos en arcilla, y gravas con alto porcentaje de arcilla. Hacia el final de la perforación, se reconoce la toba argilizada de color gris, que sobreyace a lavas pliocénicas (TPv).





Fuente: DGA-PUC, 2009

Figura 4-8: Perfiles transversales Y y Z en Salar del Huasco

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

#### **4.1.3 Geometría Acuífera y Unidades Hidrogeológicas**

En base a los siete perfiles detallados en la sección 4.1.2 se reconocen tres unidades hidrogeológicas, cuyas características se presentan a continuación:

##### **Acuífero Superior**

Se compone por el conjunto de depósitos sedimentarios que recubren de manera uniforme a las unidades más antiguas. Los depósitos que conforman esta unidad hidrogeológica son los depósitos aluviales (Qal) que se reconocen en Pampa Rinconada; depósitos fluviales (Qf) que se reconocen sobre el lecho del río Collacagua, depósitos aluviales de ceniza y lapilli (Qipe) en Pampa Sillillica, Ignimbrita Pastillos (Qip) en Pampa Batea; y los depósitos de salar (Qs) que conforman el Salar del Huasco. Excluyendo a Qs, estos depósitos son de alta permabilidad. Acosta (2004) indica que se trata de depósitos con una conductividad hidráulica importante, de 6 – 60 m/día, sin embargo, su distribución es restringida. En los perfiles hidrogeológicos se observa que presenta un espesor constante (~50 m) a lo largo del valle del río Collacagua como se observa en el perfil A-A' (Figura 4-5). En el norte en los perfiles U-U' y V-V' (Figura 4-6) se limita a la ribera este del río y la ladera de los centros volcánicos, donde su espesor varía entre 50 y 100 m, alojado principalmente en la Ignimbrita Pastillos. Los perfiles W-W' y X-X' (Figura 4-7) realizados en Pampa Sillillica indican que en este sector se aloja en depósitos de ceniza (Qipe), cuyo espesor promedio es de 50 m y aumenta a 100 m hacia el NNW. En el sector sur (Figura 4-8) de la cuenca se limita a formar una

delgada cobertura sobre los acuíferos medio e inferior. Corresponde a depósitos evaporíticos y aluviales.

### **Acuífero Medio**

El acuífero medio está formado por los depósitos terciarios, que se correlacionan con las unidades Media e Inferior de la Formación Collacagua. Esta unidad hidrogeológica se compone por una secuencia rítmica de gravas con altos porcentajes de arcilla (> 50%), y gravas con bajos porcentajes de arcilla (< 50%). Además, es común encontrar entre estos depósitos horizontes de gravas o arcillas. Siguiendo el eje principal de la cuenca en el Perfil A-A' (Figura 4-5) se reconoce en el techo de la unidad una capa de arcilla hacia el sur y elevados contenidos de arcilla hacia el norte, lo que tiene efecto semi-confinante. Su espesor es variable, acuniéndose en algunos sectores y alcanzando potencias de poco más de 100 m en Pampa Batea (Figura 4-6) y hasta 200 m en Pampa Sillillica (Figura 4-7). En estos perfiles que describen las pampas, se reconocen también horizontes más arcillosos y de toba hacia la base de la unidad, reduciendo el potencial hidrogeológico localmente. A pesar de los altos contenidos de arcilla, existen datos que indican que la unidad posee una alta permeabilidad, y corresponde al acuífero principal (Acosta, 2004). En el sector del salar se presenta con ligeras variaciones, ya que su cobertura es muy delgada, litológicamente presenta mayores porcentajes de arcilla y su espesor se mantiene constante, cercano a los 180 m, excepto en los márgenes de la depresión que rellena, cuya base son los depósitos volcánicos del acuífero inferior.

### **Acuífero Inferior**

Se compone por la Ignimbrita Huasco (Tsih) y las lavas del Mioceno superior – Plioceno (TMv – TPv), las cuales se podrían definir como el basamento de la cuenca sedimentaria. Este basamento constituye un medio altamente fracturado, permitiendo el almacenamiento del recurso. Estos paquetes formacionales configuran un medio heterogéneo, ya que además de la variabilidad espacial en el desarrollo de fracturas, se presentan intercalaciones de lavas, tobas y zonas de alteración (Acosta, 2004). Perforaciones realizadas en el marco del mismo estudio, indican que su espesor

superaría los 250 m en la parte central de la cuenca. Al este del salar, donde una importante zona de falla incrementa la permeabilidad de la roca, se han estimado conductividades de 0,5 y 13 m/d (Acosta, 2004).

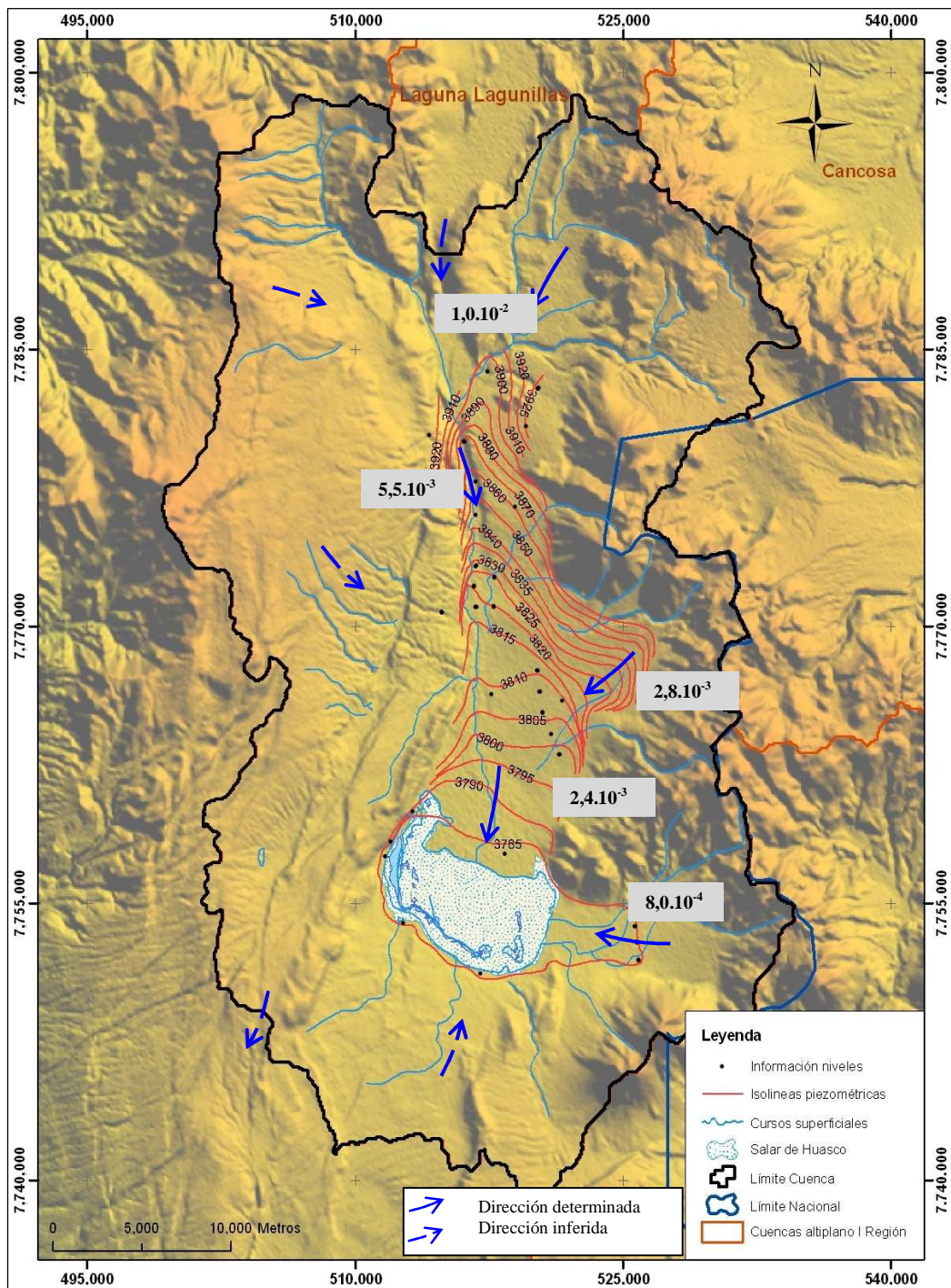
#### **4.1.4 Piezometría del Acuífero**

##### ***4.1.4.1 Cuenca del Salar del Huasco***

La ubicación de los puntos de medición de niveles de agua subterránea en la cuenca de estudio se presenta en el Anexo B. Esta información fue tomada del estudio de Acosta (2004), debido a que es uno de los estudios que más datos presenta en la cuenca y su información coincide con los valores determinados durante la construcción de los mismos. Los antecedentes de los pozos E25, E27 y P14 corresponden a mediciones efectuadas por INVEREX (2000-2002), debido a que éstos no fueron considerados por Acosta.

Los registros del nivel del agua subterránea obtenidos en el año 2008 se presentan en el Anexo B, los cuales han sido comparados con las mediciones efectuadas por INVEREX durante la construcción y monitoreo de los pozos de exploración (años 2000 a 2002), así como con los datos tomados por Collahuasi- GP Consultores en 2002 y los presentados por Acosta (2004). Los valores de la profundidad del nivel estático medidos en las diferentes campañas fueron correlacionados con las cotas de terreno y las alturas de brocal, asociadas a cada pozo con el fin de obtener el nivel de las aguas subterráneas en relación al nivel medio del mar. No se cuenta con datos de altura de brocal para los pozos E27 y P14, por lo que se les asignó un valor de 0,41 m equivalente a la altura de brocal media de todos los pozos que poseen información. Cabe indicar que no se cuenta con ningún registro de nivel en el pozo E25.

En la Figura 4-9 se muestra el mapa de isopiezas de la cuenca, basados en los datos de nivel medidos por Acosta (2004).



**Figura 4-9: Superficie equipotencial de las aguas subterráneas en la cuenca del Salar del Huasco**

De la Figura 4-9 se observa que los flujos subterráneos escurren predominantemente en sentido norte-sur con algunos aportes en sentido noreste-suroeste en el sector de Pampa Sillillica y este-oeste en Pampa Rinconada, siempre con zona de descarga en el salar.

El pozo ubicado más norte en la cuenca (E23) presenta un nivel piezométrico de 3.888 msnm, mientras que las cotas registradas en la cercanía del salar alcanzan los 3.780 msnm. Esta diferencia se traduce en un gradiente hidráulico de  $3,9 \cdot 10^{-3}$ . El gradiente promedio desde el salar hasta el sector de Pampa Sillillica Norte es de  $2,5 \cdot 10^{-3}$ . Entre este punto y el área del Caserío Collacagua el gradiente hidráulico aumenta a  $5,5 \cdot 10^{-3}$ . Este aumento permite suponer un incremento en la permeabilidad de los suelos o una disminución en la velocidad del flujo asociada a un incremento en la sección pasante.

En el sector de Pampa Sillillica se observa un gradiente aproximado de  $2,8 \cdot 10^{-3}$ , es decir un 25% menor que el gradiente determinado en sentido preferencial de escurrimiento. Finalmente, la zona de Pampa Rinconada muestra un bajo gradiente hidráulico de sólo  $8,0 \cdot 10^{-4}$ . En la Tabla 4-2 se presentan los gradientes calculados y los pozos utilizados en su determinación.

**Tabla 4-2: Gradientes Hidráulicos calculados en Salar del Huasco**

Desde zona	Hacia zona	Pozos usados	Gradiente
Caserío Collacagua	Salar	E23 – lagunas	$3,9 \cdot 10^{-3}$
Sillillica Norte	Salar	P8 – lagunas	$2,4 \cdot 10^{-3}$
Caserío Collacagua	Sillillica Norte	E23 – P8	$5,5 \cdot 10^{-3}$
Pampa Sillillica NE	Pampa Sillillica SO	E2 – E3	$2,8 \cdot 10^{-3}$
Pampa Rinconada	Salar	E9 – lagunas	$8,0 \cdot 10^{-4}$

La laguna Huantija, ubicada en la zona de descarga de la cuenca de Laguna Lagunillas tiene una elevación de 4.017 msnm. Asumiendo que dicha laguna es representativa del nivel piezométrico de las aguas subterráneas de la cuenca, la diferencia de cota entre el acuífero y el pozo E23 sería de 129 m, estableciendo un

gradiente hidráulico de  $1.10^{-2}$ . En este sentido, la información de niveles permite suponer la presencia flujos aportantes desde la cuenca de laguna Lagunillas.

El área de descarga de la cuenca de quebrada Carcas se encuentra a 3.733 msnm, cota máxima que tendría el acuífero en el sector, su diferencia de elevación con respecto al salar de Huasco es de 47 m y el gradiente hidráulico mínimo alcanzaría los  $2.10^{-3}$ . Sin embargo, se observa que los niveles piezométricos en el sector de Pampa Rinconada son levemente mayores a los existentes en el salar, lo que descartaría un flujo entre ambas cuencas al menos por el margen sureste. Finalmente, considerando el pozo BNA 017 00 263-5 (nivel estático 1.235 msnm) y la elevación del salar, es posible determinar una diferencia piezométrica entre el Salar del Huasco y la zona de Pica de 2.545 m, equivalente a un gradiente hidráulico de  $4,1.10^{-3}$ . Este gradiente permite plantear la hipótesis de una posible conexión subterránea hacia la pampa del Tamarugal

Por otro lado, de las mediciones de los niveles del agua subterránea realizados en los años 2001, 2002 y 2008 se observa que en la mayoría de los pozos no se presentan variaciones significativas, por lo que se asume que el sistema acuífero se encuentra en equilibrio. Sin embargo, estas mediciones reflejan que existe una fuerte relación con la topografía de la cuenca y con la red de drenaje principal, revelando una probable conexión hidráulica entre el acuífero y el río Collacagua. Los rangos de profundidad observados en los distintos sectores de la cuenca se describen a continuación.

- ***Pampa Rinconada:*** el nivel estático presenta un valor medio de 39 m, con un rango entre 32 y 53 m. Los pozos habilitados en la zona se ubican a una elevación media de 3.823 msnm y se encuentran en las cercanías de quebradas con escurrimientos esporádicos;
- ***Pampa Sillilica:*** Las profundidades del nivel estático varían entre 65 y 97 m, con una media de 89 m. La elevación media de los sondajes es de 3.890 msnm y se ubican a 4 km de distancia del río Collacagua;

- ***Pampa Sillillica Norte:*** Si bien los pozos ubicados en esta zona presentan una elevación mayor a la registrada en Pampa Rinconada, con una media de 3.840 msnm, los niveles estáticos son más someros, con una profundidad media de 21 m, y valores mínimos y máximos de 11 m y 47 m. A diferencia de lo ocurrido en Pampa Rinconada, los sondajes de Sillillica Norte fueron instalados en las cercanías del río Collacagua (alrededor de 400 m de distancia)
- ***Pampa Peña Blanca:*** La gran mayoría de los pozos habilitados presenta profundidades menores a 3 m, a excepción de los pozos E26x y E20, que presentaron profundidades de 86 y 102 m, respectivamente. Estos dos pozos se ubican a más de 2 km del río Collacagua, mientras que los restantes se distancian del cauce por 200 m.

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

En base a lo anterior, es posible concluir en forma preeliminar que en las cercanías de la desembocadura del río Piga el acuífero medio-inferior posee un mayor potencial hidráulico que el acuífero superior. Alrededor de 7 km al sur, en el sector



de Pampa Sillillica Norte, el acuífero superior presenta niveles piezométricos mayores, por lo que recargaría al acuífero medio e inferior.

#### **4.1.4.2 Salar del Huasco**

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

Durante las campañas realizadas el 2004, gran parte de las punteras construidas presentaron niveles piezométricos levemente superiores a la superficie del terreno, lo que revelaría la presencia de un estrato superficial impermeable y un acuífero confinado (semi-confinado). Sin embargo, las mediciones realizadas en abril del 2007 en el nuevo set de punteras no reflejan dicho fenómeno. Esta situación puede ser explicada por la diferencia en la profundidad de las punteras construidas en ambos períodos o puede deberse a un leve descenso en los niveles piezométricos. Si se consideran las punteras instaladas durante los años 2002 y 2003 con una profundidad de 1 metro, se observa que ninguna de ellas presenta niveles surgentes. Por lo tanto, la configuración podría corresponder a un acuífero superficial de baja potencia separado por un estrato impermeable de un acuífero inferior de mayor carga hidráulica.

La Figura 4-10 presenta la ubicación de todas las punteras existentes en el área del salar y los niveles piezométricos medidos en enero del 2004 y 2007. El prefijo POX representa el año durante el cual las punteras fueron construidas y la superficie

cubierta por lagunas corresponde a la digitalización de una imagen satelital captada en noviembre de 2006.

De la referida figura es posible observar que la posición del nivel freático en las inmediaciones del salar es superior al nivel superficial de las lagunas, lo que permitiría un flujo subterráneo hacia la zona ocupada por ellas. De esta forma, su origen sería de tipo mixto, con aportes provenientes de vertientes ubicadas en el extremo oeste (Ermitaño y Huasco Norte) y sur (V. Sur, Huasco Lítez y Jalsuri) del Salar y en, menor medida, desde las aguas subterráneas.

En el sector norte del salar las punteras P02-12 y P02-14 presentan niveles freáticos superiores a 3.785 msnm, existiendo un gradiente hidráulico que favorece el flujo hacia las lagunas interiores de  $1,8 \cdot 10^{-3}$ . Por el este, considerando las punteras P07-8 y P07-17, es posible calcular un gradiente hidráulico de  $3,6 \cdot 10^{-3}$  entre el margen oriental del salar y el sistema Jalsuri. Por el sur, en el sector de Huasco Lítez, las punteras P07-20 y P07-22 determinan un gradiente favorable hacia la laguna de  $1,5 \cdot 10^{-3}$ . Finalmente, en el sector oeste del salar se aprecia un leve descenso en los niveles a medida que nos acercamos a las lagunas. Utilizando las mediciones realizadas en las punteras P07-5 y P02-17, el gradiente hidráulico obtenido es de  $2,4 \cdot 10^{-3}$ .

Destaca el nivel observado en la puntera P02-19 con una profundidad del nivel freático de 3.777,2 msnm, tiene una cota 3 m menor que las registradas en las 4 punteras que lo rodean (P07-10, 21, 29 y 30). Este piezómetro tiene una profundidad de 5 m por lo que podría representar el nivel del acuífero inferior, lo cual mostraría un flujo vertical descendente hacia los estratos inferiores. Esta situación es contradictoria con las surgencias observadas en gran parte de las punteras instaladas en el período 2002-2003, las que reflejan un mayor nivel de energía en el acuífero inferior. De la misma forma, el nivel registrado es alrededor de 2,5 m menor que la cota superficial existente en las lagunas. Ante estas diferencias de niveles, es importante contar con un mayor registro de mediciones en las punteras instaladas en el salar.

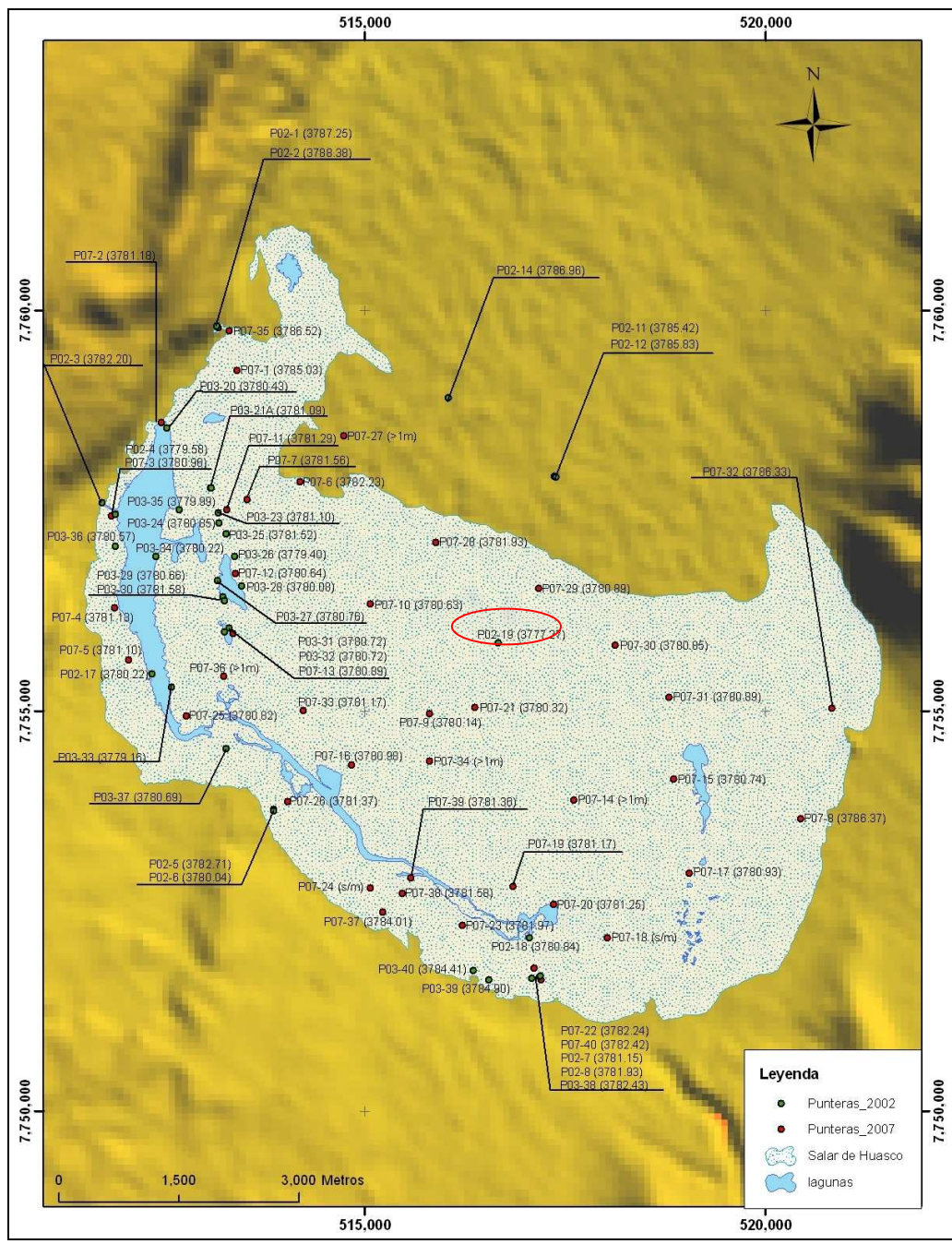


Figura 4-10: Punteras instaladas en Salar del Huasco

#### **4.1.5 Propiedades Hidráulicas**

En la Tabla 4-3 y Tabla 4-4 se presentan los valores de los parámetros hidráulicos (transmisividad (T), conductividad hidráulica (k) y coeficiente de almacenamiento (S)) del acuífero obtenidos con la interpretación de las pruebas de bombeo. Dicha interpretación se ha realizado considerando los pozos de observación cercanos, los mismos que de acuerdo a Acosta (2004) representan valores confiables.

La discusión de los resultados se realiza de manera agrupada de acuerdo a los sectores del acuífero (Figura 4-11) en donde se ubican los pozos.

##### **Sector 1: Pampa Sillilica**

Este sector comprende los pozos de producción P1, P2 y P3, y sus pozos de exploración correspondientes E1, E6 y E5 (Figura 4-11).

En este sector los mejores ajustes obtenidos fueron con los métodos correspondientes a acuíferos confinados como Theis y Cooper & Jacob, de acuerdo a lo determinado por INVEREX (2000-2002) y Acosta (2004).

Los valores de T, considerando sólo los pozos de observación y los métodos de mejor ajuste, varían de 3.946 m<sup>2</sup>/d a 5.357 m<sup>2</sup>/d, los resultados de K se encuentran entre 24 y 47 m/d y los valores de S entre  $5,36 \cdot 10^{-4}$  y  $1,06 \cdot 10^{-3}$ .

##### **Sector 2: Pampa Rinconada**

En este sector se encuentran los pozos de producción P5 y P6 y sus respectivos pozos de exploración E7 y E8. El mejor ajuste se obtuvo aplicando el método de Hantush, empleado para acuíferos semi-confinados, al igual como fue determinado por INVEREX (2000-2002) y Acosta (2004).

Los valores de T, teniendo en cuenta sólo los pozos de observación y el método de mejor ajuste, son de 2.837 m<sup>2</sup>/d y 3.946 m<sup>2</sup>/d. Los resultados de K son de 18,2 m/d y 21,6 m/d y S de  $8,85 \cdot 10^{-6}$  y  $1,62 \cdot 10^{-3}$ .

**Tabla 4-3: Propiedades hidráulicas del acuífero de la cuenca Salar del Huasco**

Sector	Pozo	Pozo	Caudal	Transmisividad Hidráulica - T				Conductividad Hidráulica - K			
		Obs.	(L/s)	(m <sup>2</sup> /d)				(m/d)			
				Theis	Cooper y Jacob	Hantush	Recup. Theis	Theis	Cooper y Jacob	Hantush	Recup. Theis
Pampa Sillillica	P1	*	95	1.440	1.440	1.192,32	-	9,2	9,2	7,6	-
	P1	E1		4.507,2	4.564,8	4.507,2	-	27,9	28,3	27,9	-
	P2	*	95	4.219,2	4.219,2	2.203,2	-	27,7	27,7	14,5	-
	P2	E6		4.622,4	3.945,6	3.830,4	-	28,9	24,7	24	-
	P3	*	95	1.857,6	2.174,4	747,36	-	14,7	17,2	5,9	-
	P3	E5		5.356,8	5.356,8	3.945,6	-	47,3	47,3	34,8	-
Pampa Rinconada	P5	*	75	2.923,2	5.328	1.192,32	3.945,6	13,6	24,7	5,5	18,3
	P5	E7		7.300,8	3.945,6	3.945,6	4.406,4	33,6	18,2	18,2	20,3
	P6	*	60	551,52	2.606,4	266,4	7.185,6	5,4	25,7	2,6	70,8
	P6	E8		20,88	3945,6	2.836,8	6.580,8	158,8	30	21,6	50,1
Pampa Sillillica Norte	P8A	*	50	n.a.	n.a.	n.a.	884,16	n.a.	n.a.	n.a.	4,1
	P8A	E11		1.163,5	884,16	861,12	884,16	5	3,8	3,7	3,8
	P8A	E12		1.612,8	1.612,8	1.398,24	-	70	70	60,7	-
	P8A	P8		12.42,7	1.192,32	590,4	-	5,4	5,2	2,6	-
	P9	*	60	360	360	440,64	360	1,6	1,6	2	1,6
	P9	E17		705,6	884,16	705,6	655,2	3,1	3,8	3,1	2,8
	P10	*	50	113,62	80,64	74,88	80,64	0,5	0,3	0,3	0,3
	P10	E16		201,6	146,88	113,9	360	0,9	0,6	0,5	1,5
	P11	*	40	139,82	139,68	114,91	146,88	0,7	0,7	0,6	0,7
	P11	E13		339,84	338,4	256,32	360	1,5	1,5	1,1	1,6
	P14	*	85	558,72	557,28	331,2	-	2,9	2,9	1,7	-
P14	E27		15.552	13.075,2	12.211,2	-	76,8	64,6	60,3	-	

**Tabla4-4: Propiedades hidráulicas del acuífero de la cuenca Salar del Huasco**

Sector	Pozo	Pozo	Caudal	Coef. de Almacenamiento S		
		Obs.	(L/s)	Theis	Cooper y Jacob	Hantush
Pampa Sillillica	P1	*	95	-	-	-
	P1	E1		$2,67.10^{-3}$	$2,42.10^{-3}$	$2,67.10^{-3}$
	P2	*	95	-	-	-
	P2	E6		$1,06.10^{-3}$	$1,88.10^{-3}$	$2,11.10^{-3}$
	P3	*	95	-	-	-
	P3	E5		$1,80.10^{-4}$	$1,24.10^{-4}$	$5,36.10^{-4}$
Pampa Rinconada	P5	*	75	-	-	-
	P5	E7		$1,36.10^{-8}$	$8,78.10^{-6}$	$8,85.10^{-6}$
	P6	*	60	-	-	-
	P6	E8		$9,93.10^{-10}$	$1,31.10^{-3}$	$1,62.10^{-3}$
Pampa Sillillica Norte	P8A	*	50	-	-	-
	P8A	E11		$1,39.10^{-4}$	$4,79.10^{-4}$	$4,79.10^{-4}$
	P8A	E12		$8,26.10^{-3}$	$4,86.10^{-3}$	$8,15.10^{-3}$
	P8A	P8		$6,22.10^{-2}$	$5,31.10^{-2}$	$7,41.10^{-2}$
	P9	*	60	-	-	-
	P9	E17		$1,31.10^{-2}$	$8,07.10^{-3}$	$1,31.10^{-2}$
	P10	*	50	-	-	-
	P10	E16		$1,62.10^{-3}$	$2,83.10^{-3}$	$3,80.10^{-3}$
	P11	*	40	-	-	-
	P11	E13		$1,98.10^{-3}$	$1,16.10^{-3}$	$4,67.10^{-3}$
	P14	*	85	-	-	-
	P14	E27		$9,38.10^{-5}$	$2,79.10^{-4}$	$6,40.10^{-4}$

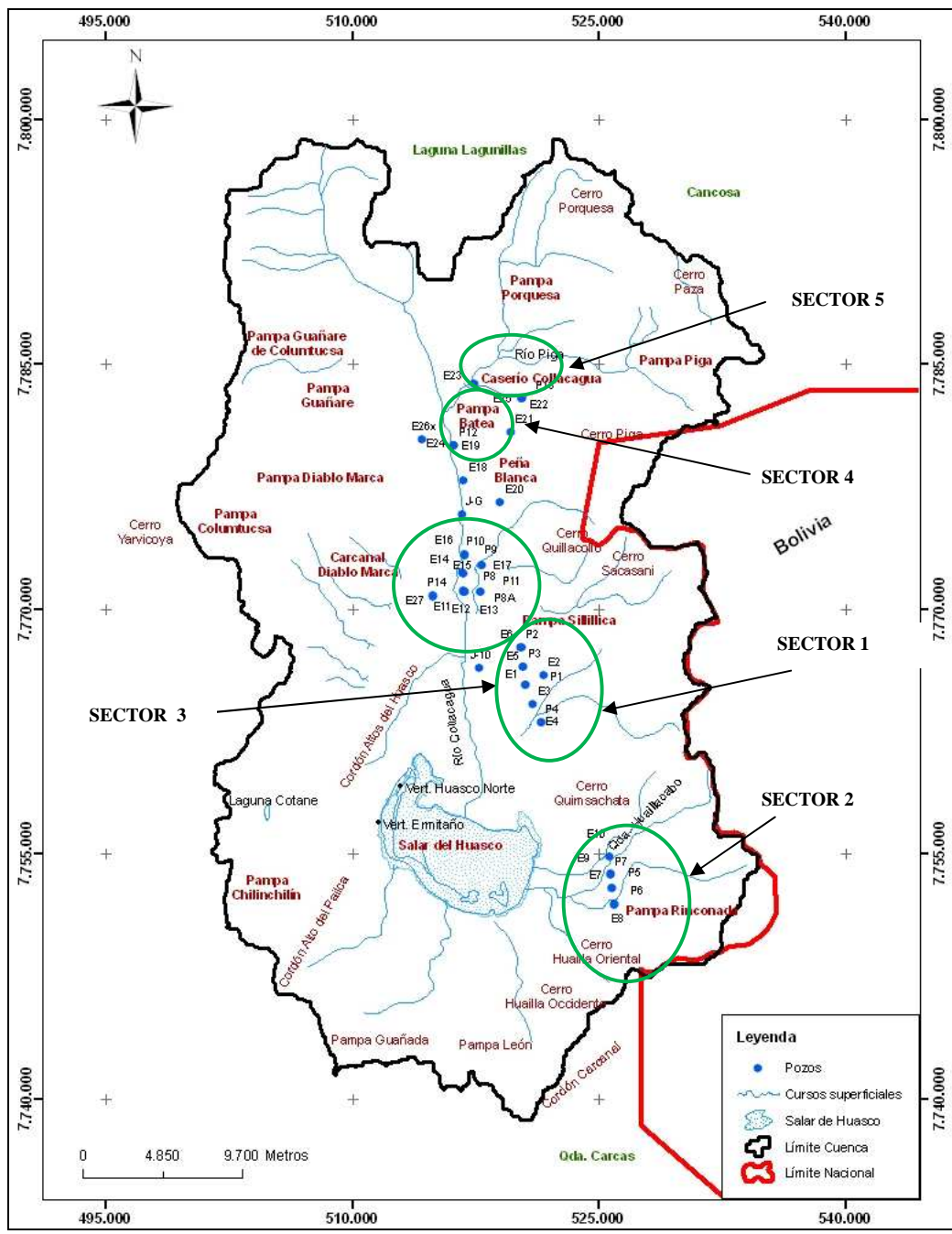


Figura 4-11: Ubicación de sectores en la cuenca del Salar del Huasco

**Sector 3: Pampa Sillilica Norte**

Comprende los pozos P8A, P9, P10, P11 y P14, con sus respectivos pozos de exploración E11, E12, P8, E17, E16, E13 y E27. El método de Hantush, aplicado para acuíferos semi-confinados, presentó el mejor ajuste en la mayoría de los pozos.

Los valores de T, considerando sólo los pozos de observación y el método de mejor ajuste, varía entre 114 m<sup>2</sup>/d y 12.211 m<sup>2</sup>/d; los valores de K se encuentran entre 0,5 m/d a 61 m/d.

**Sector 4: Pampa Peña Blanca y Pampa Batea**

No se contó con información de pruebas de bombeo en este sector, sin embargo, se presentan los resultados obtenidos por Collahuasi- GP Consultores (2003) y que cuentan con las gráficas de los ajustes realizados.

Este sector comprende al pozo P12 y al pozo de observación E19. Los valores de T, considerando sólo el pozo de observación y los métodos aplicados para acuíferos confinados, varían entre 314 m<sup>2</sup>/d y 376 m<sup>2</sup>/d. El valor de K se encuentra entre 1,9 m/d a 2,3 m/d y S varía entre  $8,74 \cdot 10^{-4}$  y  $5 \cdot 10^{-4}$ .

**Sector 5: Río Batea y Caserío Collacagua**

Tampoco para este sector se contó con información de pruebas de bombeo, sin embargo, se presentan los resultados obtenidos por Collahuasi- GP Consultores (2003) ya que cuentan con las gráficas de los ajustes realizados.

Comprende al pozo P13 y al pozo de observación E22. Los valores de T, considerando sólo el pozo de observación y los métodos aplicados para acuíferos confinados, varían entre 4.464 m<sup>2</sup>/d y 5.774 m<sup>2</sup>/d; los valores de K entre 44,8 y 57,9 m/d y S de  $4,71 \cdot 10^{-3}$  a  $4,24 \cdot 10^{-3}$ .



#### 4.1.6 Conexión con otras cuencas

Diversos estudios han planteado la relación entre el Salar del Huasco y el flujo subterráneo que alimenta a los acuíferos de la Pampa del Tamarugal. Margaritz et al. (1990) señalan un posible flujo regional que se infiltraría en el Altiplano y alcanzaría el relleno sedimentario de la zona central mediante los sistemas de fracturas de las rocas paleozoicas y mesozoicas. Se ha identificado que la principal recarga de la Pampa del Tamarugal es producida por las precipitaciones que ocurren en la zona alta de las quebradas en la falda occidental de la cordillera, que luego desembocan en la depresión central (Margaritz et al., 1989; Houston, 2002). Este fenómeno se combinaría con flujos subterráneos responsables de los afloramientos de agua permanentes en la misma ladera (p. ej. Pica, Quebrada de Alona, Quebrada de Caya) cuya recarga se atribuye a flujos regionales producidos por la fusión de nieve en el Altiplano (Margaritz et al., 1989; Margaritz et al., 1990).

En el estudio de la geoquímica de la cuenca del Salar de Pintados, Risacher et al. (1999) establecen que las recargas principales a este sistema serían por la quebrada de Tarapacá y otras quebradas menores, cuyos flujos descenderían por la ladera colindante a la cuenca del Salar del Huasco. Esta hipótesis se apoya en la cuña de agua bicarbonatada que penetra en la pampa desde la ladera occidental de la cordillera, específicamente en el sector ubicado entre Pica y la quebrada Chacarillas (Figura 4-12). Sin embargo, al analizar la relación que podría existir entre la hidrogeoquímica de los salares del Huasco y de Pintados, Risacher et al. (1999) utilizando principalmente el magnesio (Mg) como elemento guía, no observa una relación directa. Las aguas cercanas a la cordillera poseen las concentraciones más bajas de Mg, mientras que las del Salar del Huasco poseen concentraciones sustancialmente mayores que las de otras cuencas altiplánicas. Concluyen que difícilmente habría una infiltración importante desde el relleno sedimentario de la cuenca Salar de Huasco, y atribuyen las diferencias de Mg a la litología. A pesar de esta conclusión, el Salar del Huasco como parte de un mosaico de salares del Altiplano que en conjunto contribuirían a la recarga de la Pampa del Tamarugal,



Fuentes: [Google Earth, 2009; Risacher et al., 1999]

**Figura 4-12: Relación espacial entre los salares del Altiplano y los tipos de agua zonificados en la cuenca del Salar de Pintados por Risacher et al., 1999.**

**Las flechas indican la dirección que seguiría el flujo de acuerdo a la composición química de las aguas**

podría aportar sus aguas ricas en Mg, pero éstas se diluirían al generarse una mezcla de aguas con distintas composiciones químicas. Este postulado puede apoyarse en el hecho de que el mismo estudio menciona como un punto interesante el que en Pica se reconocen cuatro tipos distintos de agua, que incluyen algún contenido de magnesio.

También Tröger et al. (2004) planteó que las estructuras de orientación aproximada norte-sur que se encuentran al oeste del salar constituyen una barrera hidráulica para el flujo subterráneo proveniente de este lado de la hoya hidrográfica. Esto debido a que son transversales a la topografía y a los flujos de agua subterránea inferidos, definiendo como parte del graben una divisoria hidrogeológica. El mismo autor, de forma similar a lo planteado por Risacher et al. (1999), descarta la posibilidad de que

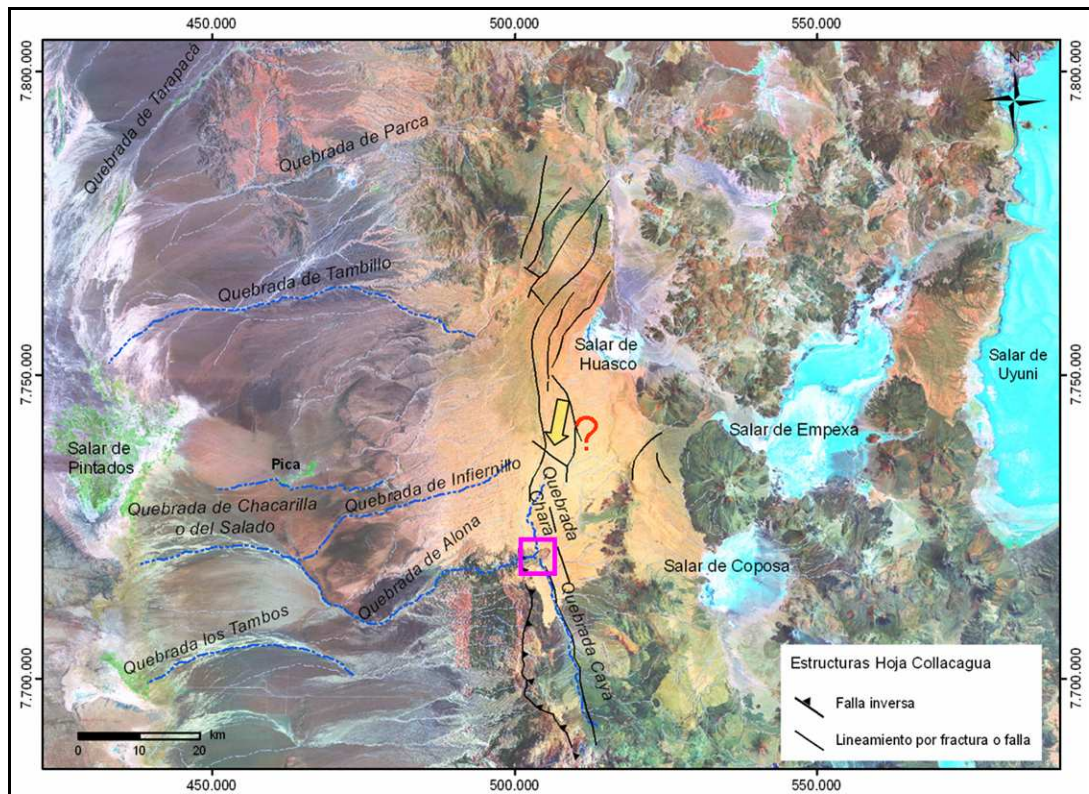
las aguas del acuífero sedimentario de Huasco estén vinculadas al sector de Pica u otras áreas afluentes a la Pampa del Tamarugal debido a la composición química de las aguas.

Los datos isotópicos de que se dispone, respaldan el hecho de que la recarga al sector acuífero de Pica proviene de los Altos de Pica, en alturas que superan los 3.500 msnm. En el estudio realizado por el convenio DGA – CCHEN (1998) se descarta el hecho de que el agua subterránea de los sectores en la parte alta de la cuenca Pampa del Tamarugal provenga de la cuenca Salar del Huasco, debido al afloramiento de vertientes en la parte oeste del propio salar. Además, se apoyan en la edad relativa de las aguas del acuífero de Huasco, que presenta datación ( $^{14}\text{C}$  y  $^3\text{H}$ ) similar al de otras cuencas endorreicas de la zona, como la misma Pampa del Tamarugal y finalmente en el error de cierre de balance que entrega el Balance Hídrico de Chile (1987) con la información hasta esa fecha disponible. Salvo esta última conclusión, las otras no parecen concluyentes sobre el tema, aunque son elementos que representan interesantes tesis sobre la conexión. La falta de un monitoreo continuo de precipitación, magnitud y contenido isotópico, dificulta realizar conclusiones certeras respecto a las zonas de recarga de los acuíferos en estas cuencas.

Siguiendo con el postulado de Tröger et al. (2004), Collahuasi-GP Consultores el 2006 realizó la investigación “Antecedentes Levantamiento Geofísico TEM Salar del Huasco”, cuya conclusión indica que las fallas de orientación aproximada norte-sur no serían limitantes para los flujos subterráneos desde el oeste de la cuenca con dirección al salar, dado que han producido un fracturamiento que ha inducido estructuras más pequeñas de forma transversal, a través de las cuales habrían escurrimientos hacia la depresión.

DGA-PUC (2009) planteó que las fallas principales de orientación NNE-SSW sobre las que se discute, podrían eventualmente representar caminos preferenciales que transporten una fracción del agua de recarga en la sección oeste de la cuenca hacia la Pampa del Tamarugal. Considerando la discusión planteada por Risacher et al.

(1999) sobre la posible influencia de la cuenca del Salar del Huasco sobre la quebrada de Chacarilla (Figura 4-13), se tienen algunas evidencias que mantienen en pie la discusión. Por un lado existen lineamientos estructurales que se podrían comportar como fracturas de flujo preferencial, por otro, la mezcla de composiciones químicas encontradas en Pica y, finalmente, afloramientos de agua y parches de vegetación en la cabecera de quebrada Alona indican que ésta se mezclaría con los aportes provenientes del sur (quebrada Caya) para dar lugar a bofedales aguas abajo en la quebrada de Chacarilla.



**Figura 4-13: Vista regional donde se destacan las estructuras de la Hoja Collacagua y las quebradas que desembocan en la Pampa del Tamarugal. La flecha con orientación aproximada norte-sur indica la eventual dirección de un flujo captado por la zona de drenaje poniente de la cuenca**

De acuerdo a todo lo indicado se hace necesario la utilización de colectores de precipitación para análisis isotópicos funcionando continuamente, junto a pluviómetros que permitan cuantificar la magnitud de estos aportes, lo que ayudaría a establecer la altura de recarga de las cuencas como Pintados y Salar del Huasco, del mismo modo que caracterizar hidrogeoquímicamente las aguas de las quebradas Alona, Caya y Chacarilla de forma independiente, que permitiría aportar más antecedentes para esta eventual relación recarga – descarga.

Por otra parte, la información piezométrica disponible en la cuenca Salar del Huasco está concentrada en el valle de Collacagua y las pampas aledañas, donde se ha realizado la principal exploración a la fecha. Además, se cuenta con información de pozos operados en la cuenca Lagunillas, por Compañía Minera Cerro Colorado (CMCC) de BHP Billiton. Los niveles piezométricos reportados a la DGA en el informe semestral de enero – junio de 2007 indican que la cota del agua subterránea estaría más alta que la registrada en los pozos de Huasco, así como de sus afloramientos que forman sistemas vegetacionales donde el agua subterránea aparece en superficie y evapora a la atmósfera. Los niveles del pozo P-4 en Lagunillas (más cercano a la cuenca Salar del Huasco), se encuentran a una cota en el rango aproximado de 4.010 – 4.017 msnm. Por su parte, la Laguna Huantija que es el principal cuerpo de agua en la cuenca Lagunillas presenta una cota aproximada igual a 4.017 msnm. En Huasco, los niveles de los pozos más septentrionales varían entre 3.860 y 3.930 msnm. Una eventual descarga desde Lagunillas a la cuenca Salar del Huasco se puede estudiar usando elementos químicos traza e isótopos, así como apoyándose en antecedentes geofísicos en las zonas de más probable conexión, para conocer el material de subsuperficie y las estructuras que estarían permitiendo u orientando este paso.

#### **4.1.7 Estimación de la Recarga**

La distribución espacial de las unidades litológicas en la cuenca de estudio en conjunto con la permeabilidad cualitativa asociada se muestra en la Figura 4-14.

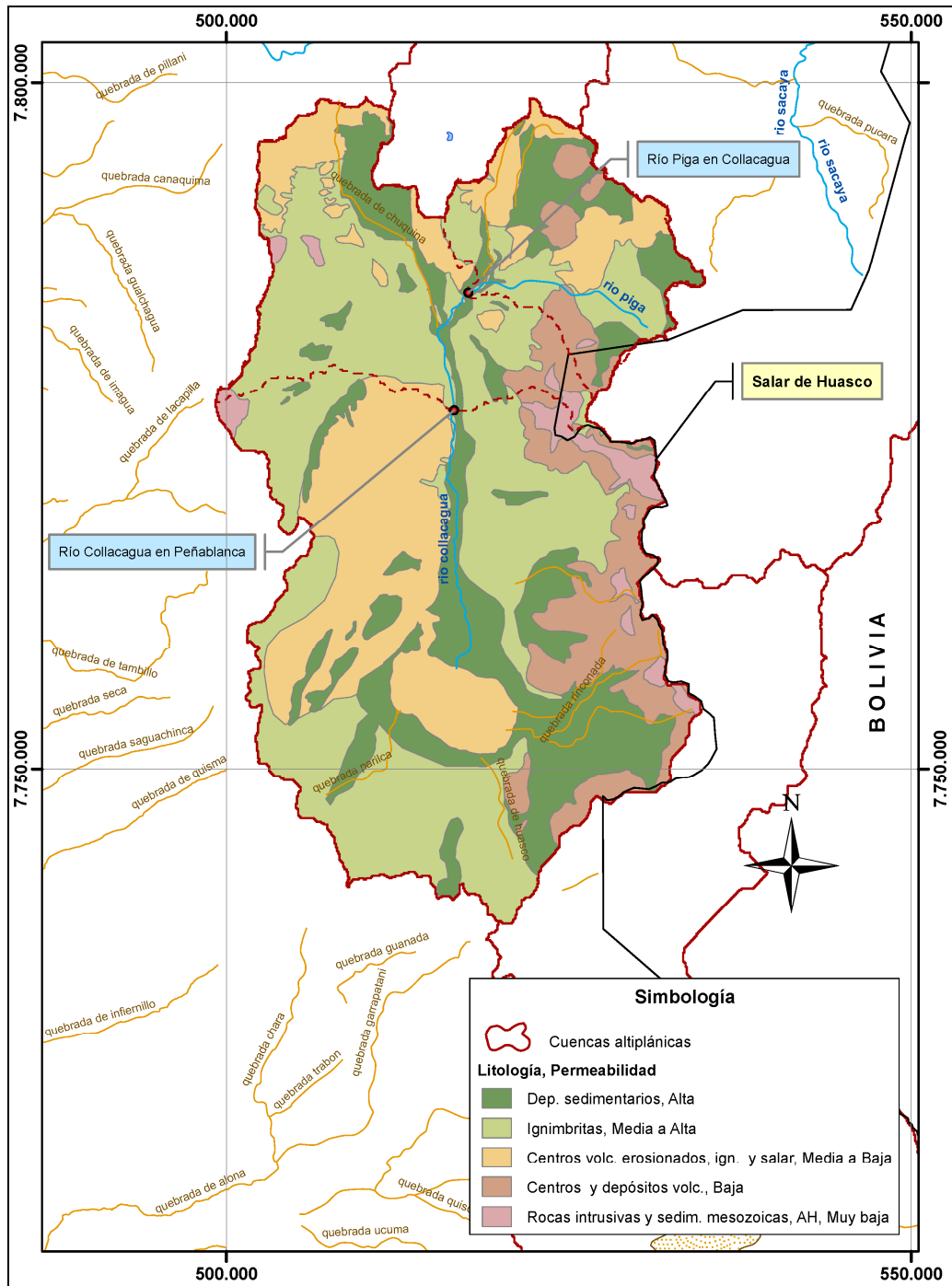


Figura 4-14: Unidades litológicas y características hidráulicas presentes en la cuenca del Salar del Huasco

La validación de los coeficientes  $C_I$  y  $C_E$  utilizados en el cálculo de la recarga se realizó a través de la comparación de los resultados obtenidos con las estimaciones realizadas en el “Estudio Hidrogeológico Conceptual y Numérico del Funcionamiento de la cuenca del Salar de Coposa” (DICTUC, 2005) para las subcuencas río Piga en Collacagua y río Collacagua en Peñablanca. Estas subcuencas se localizan al interior de la cuenca del Salar de Huasco según se muestra en la Figura 4-16. 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.

En el Proyecto de la DGA-PUC (2009) utilizando los valores originales de los coeficientes  $C_E$  y  $C_I$  y realizando una variación del  $\pm 20\%$  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 4-5 y Tabla 4-6, respectivamente. Adicionalmente se comparó con los resultados obtenidos en otros estudios. Cabe precisar que en el estudio de la DICTUC (2005) las recargas mínima y máxima se obtuvieron mediante el análisis de sensibilidad del valor del parámetro capacidad de agua por unidad de área, que el subsuelo es capaz de acumular en la zona de raíces (SVR); mientras que en el estudio de Acosta (2004) los valores de la recarga mínima y máxima se calcularon a través de un análisis de sensibilidad del parámetro profundidad de extinción de la evaporación.

En el Anexo C se presenta el detalle del cálculo de la recarga en las subcuencas del río Piga en Collacagua y río Collacagua en Peñablanca, respectivamente.

**Tabla 4-5: Comparación con otros estudios de la recarga anual de largo plazo en río Piga en Collacagua**

Fuente	Área	PP	Recarga Mínima			Recarga Media			Recarga Máxima		
	(km <sup>2</sup> )	(mm)	(mm)	(L/s)	(% PP)	(mm)	(L/s)	(% PP)	(mm)	(L/s)	(% PP)
DGA-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

Nota:

%P, porcentaje de la precipitación

\* obtenido con método HEC-modificado.

\*\* obtenido con método Balance de Masa.

**Tabla 4-6: Comparación con otros estudios de la recarga anual de largo plazo en río Collacagua en Peñablanca**

Fuente	Area	PP	Recarga Mínima			Recarga Media			Recarga Máxima		
	(km <sup>2</sup> )	(mm)	(mm)	(L/s)	(% PP)	(mm)	(L/s)	(% PP)	(mm)	(L/s)	(% PP)
DGA-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

Nota:

%P, porcentaje de la precipitación.

\* obtenido con método HEC-modificado.

\*\* obtenido con método Balance de Masa.

Los valores de recarga en los diferentes estudios para las dos subcuencas son similares a los obtenidos aplicando los coeficientes  $C_I$  y  $C_E$ , especialmente en la subcuenca del río Collacagua en Peñablanca. Por consiguiente, el método de cálculo de la recarga de largo plazo mediante coeficientes de escorrentía e infiltración entrega una buena estimación si se compara con métodos que utilizan series de precipitación y escurrimientos a nivel diario y mensual. Aplicando este método a la cuenca del Salar de Huasco y realizando una variación del  $\pm 20\%$  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 4-7. Adicionalmente se compara con los resultados obtenidos en otros estudios. En el Anexo C se presenta el detalle del cálculo de la recarga en la cuenca del Salar de Huasco.



**Tabla 4-7: Comparación con otros estudios de la recarga anual de largo plazo en la cuenca del Salar del Huasco**

Fuente	Área	PP	Recarga Mínima			Recarga Media			Recarga Máxima		
	(km <sup>2</sup> )	(mm)	(mm)	(L/s)	(% PP)	(mm)	(L/s)	(% PP)	(mm)	(L/s)	(% PP)
DGA-PUC (2009)	1.470,7	145,2	19,7	920,1	13,8	24,8	1.158,7	17,3	30,0	1.400,6	20,9
Acosta (2004)*	1.498,1	163,2	24,0	1.140,2	13,5	33,2	1.579,1	18,1	43,2	2.051,8	25,1

Nota:

%P, porcentaje de la precipitación.

\* obtenido con método Balance de Masa.

#### **4.1.7.1 Recarga desde otras cuencas**

Considerando lo discutido en el apartado 4.1.6 “Conexión con otras cuencas”, se ha planteado una eventual recarga al Salar del Huasco desde Lagunillas, en el norte, sin embargo, no hay evidencias suficientes ni estimaciones de su probable magnitud.

Los modelos conceptuales vigentes sobre el funcionamiento hidrogeológico de la cuenca Salar del Huasco no incluyen a la laguna Lagunillas como una zona de aporte, aunque ambas cuencas han sido definidas hidrográficamente como una sola en algunos de los antecedentes revisados. Se sugiere estudiar este potencial vínculo entre las cuencas para aclarar la influencia de la explotación en Lagunillas sobre el comportamiento de los recursos hídricos de Huasco, empleando elementos químicos traza e isótopos, apoyados con antecedentes geofísicos en las zonas de más probable conexión, para conocer el material de subsuperficie y las estructuras que estarían permitiendo u orientando este paso.

A pesar de esto, y en forma preliminar, se estima que por la somera profundidad del nivel freático en la zona de descarga por evaporación, la presencia de lagunas y la explotación actual en Lagunillas, la recarga se equilibraría con la suma de estos componentes de la descarga en la cuenca, mostrando que de existir una conexión ésta sería de poca magnitud.

#### **4.1.8 Estimación de la Descarga**

A continuación se presenta las estimaciones de las descargas de la cuenca del Salar del Huasco, a través de las distintas fuentes. Cabe precisar que estas estimaciones se presentaron en el estudio de la DGA-PUC (2009).

##### ***4.1.8.1 Descargas por evaporación***

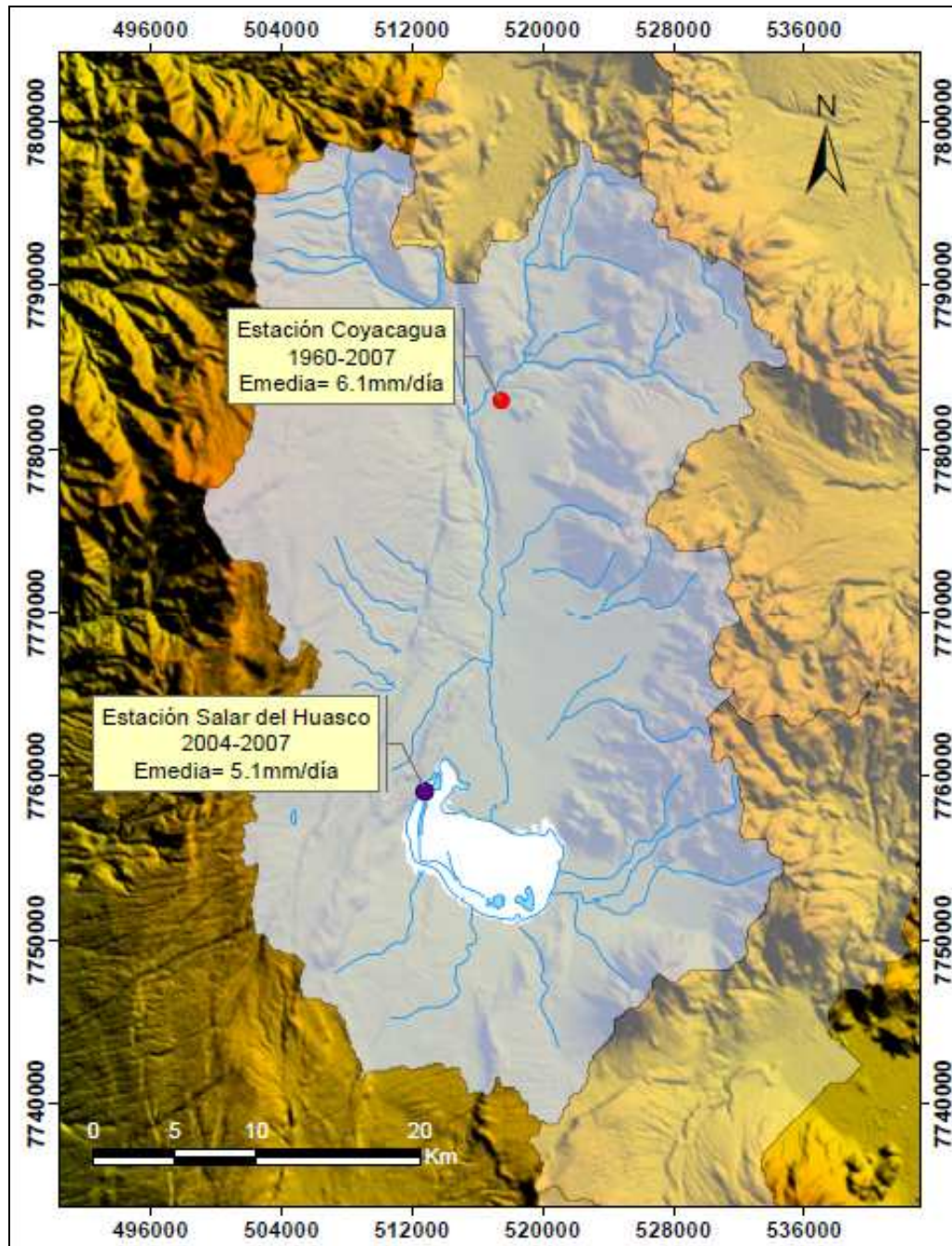
Comprende a las estimaciones de las descargas por evaporación desde superficies de agua libre (lagunas y cauces superficiales), desde sistemas de vegetación (vegas y bofedales) y desde las napas freáticas someras ubicadas bajo los suelos del salar.

##### **a) Evaporación desde cuerpos de agua libre**

La tasa de evaporación desde superficies libres fue calculada empleando la Ecuación 11.

Considerando la tasa media de evaporación de tanque registrada en la estación 'Collacagua' (DGA) y estación 'Salar del Huasco' (Collahuasi – GP Consultores), ambas ubicadas dentro de la cuenca (Figura 4-15), se generaron dos escenarios para determinar los flujos de descarga por evaporación. Para el primer escenario (E1) se adoptó el valor medio registrado en la estación 'Salar del Huasco' (5,1 mm/d), mientras que para el segundo escenario (E2) la evaporación de tanque se definió en base a la tasa media histórica de la estación Collacagua (6,1 mm/d).

El factor de corrección de tanque fue de 0,60 para ambos escenarios (coeficiente utilizado por la DGA en tanques evaporímetros instalados en el Altiplano). Cabe precisar que ambos evaporímetros son Clase A, del U. S. Weather Bureau, para los cuales el coeficiente de tanque empírico usado 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 se mueve en el rango de 0,45 -0,7; donde 0,6 aparece como un valor apropiado.



**Figura 4-15: Estaciones de evaporación de tanque consideradas en la cuenca Salar del Huasco**

Las tasas de evaporación calculadas desde superficies libres fueron de 3,32 mm/d para el primer escenario y de 3,97 mm/d para el segundo escenario.

El área ocupada por lagunas fue estimada a través del procesamiento de imágenes satelitales Landsat, captadas en noviembre de 2006, a partir de las cuales se determinó una superficie de 2,57 km<sup>2</sup>.

Otras zonas de agua libre donde ocurre evaporación, son aquellas correspondientes a escurrimientos superficiales. Los principales cauces presentes en la cuenca corresponden a los ríos Piga y Collacagua. Sus secciones fueron divididas en tramos a los que se ha asignado un ancho característico. El área estimada para cauces superficiales permanentes fue de 0,39 km<sup>2</sup>.

La Tabla 4-8 muestra una comparación de las descargas estimadas por evaporación desde superficies libres, entre el presente estudio y las propuestas por otros autores.

**Tabla 4-8: Evaporación desde superficies de agua libre (L/s).**

<b>Estudio</b>	<b>Lagunas salar</b>	<b>Cauces superficiales</b>
DGA – PUC (2009), E1	99	14
DGA – PUC (2009), E2	118	16
Acosta (2004)	178	25
Collahuasi– GP Consultores verano (2008)	102	-
Collahuasi-GP Consultores invierno (2008)	160	-

Los caudales de evaporación desde lagunas para los dos escenarios evaluados son similares a los adoptados por Collahuasi– GP Consultores para el período de verano, pero son hasta 35% menores que los propuestos por estos autores para el invierno y por Acosta (2004). La estimación del caudal evaporado desde cauces superficiales realizada por Acosta, presenta diferencias superiores al 80% y 50% con respecto a los escenarios 1 y 2 planteados en este estudio.

#### **b) Evaporación desde vegas y bofedales**

Fuera del área el salar se identificó alrededor de 50 sistemas de vegas y bofedales con un área total de 2,03 km<sup>2</sup>. Aplicando las ecuaciones 12, 13 y 14, el caudal de

descarga por evapotranspiración se estimó en el presente estudio en 58 L/s. Acosta (2004), reconoció una superficie de bofedales fuera del área del salar de 2,62 km<sup>2</sup>, determinando un flujo de evapotranspiración de 102 L/s.

Por su parte, el área de vegetación determinada dentro del área del salar fue de 1,55 km<sup>2</sup> en el presente estudio, con descargas por evapotranspiración de 48 L/s. La Tabla 4-9 presenta un cuadro comparativo con otras estimaciones realizadas en la zona del salar. Se observa que el caudal propuesto es similar a los de Collahuasi-GP Consultores, pero representan el 28% de la magnitud estimada por Acosta en 2004.

**Tabla 4-9: Evaporación desde vegas y bofedales en el entorno del Salar del Huasco.**

Estudio	Área vegetación	Evapotranspiración
	(km <sup>2</sup> )	(L/s)
DGA – PUC (2009)	1,55	48
Acosta (2004)	7,04	170
Collahuasi-GP Consultores verano (2008)	1,63	65
Collahuasi-GP Consultores invierno (2008)	0,95	21

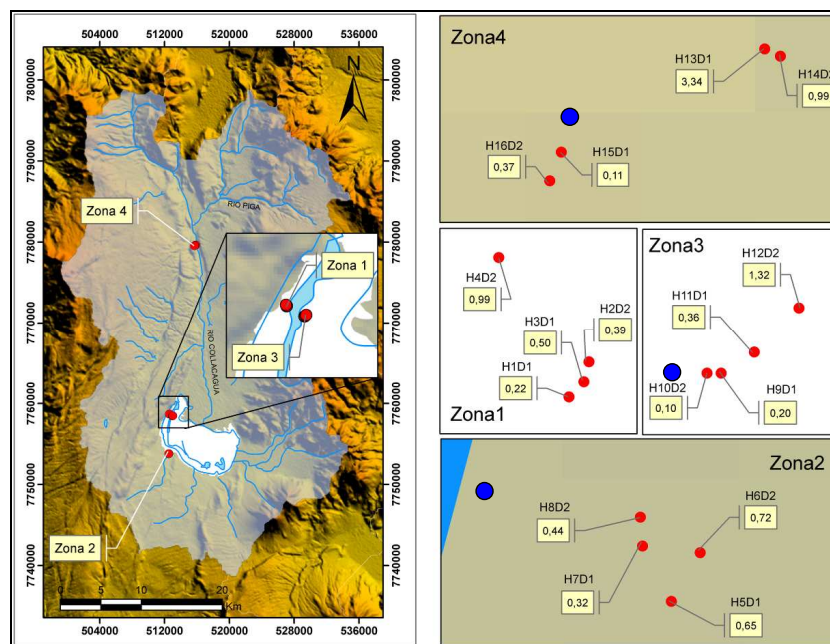
#### c) Evaporación desde suelo del salar y su entorno

En base a las mediciones de evaporación desde suelo realizadas en 16 puntos, distribuidos en 4 zonas en la cuenca del Huasco y a la cuantificación de la evaporación desde superficies libres en 3 de las cuatro zonas mencionadas, Johnson (2009) construyó una curva de evaporación versus profundidad de la napa.

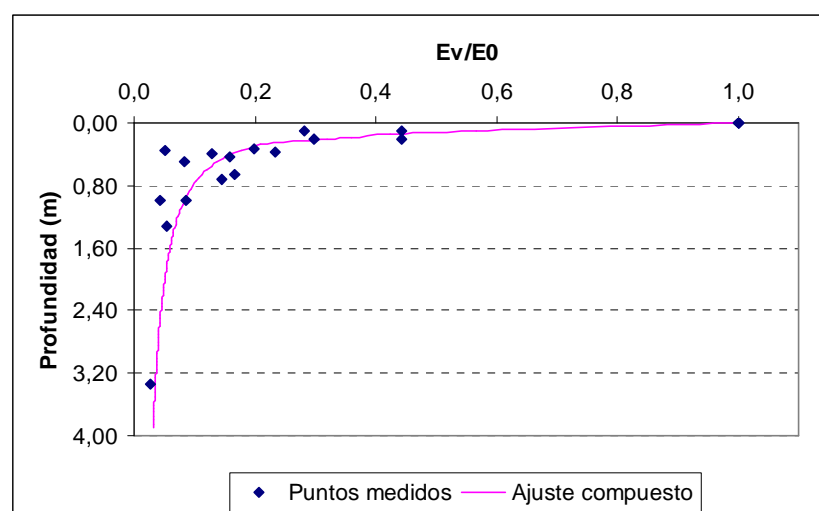
La Figura 4-16 presenta un esquema con la ubicación de las zonas y el detalle con los puntos en que se midió la evaporación. Se muestran además las profundidades del nivel freático asociadas, las que abarcaron el rango comprendido entre 0,1 y 3,34 m. Los círculos de color azul representan los puntos donde se evaluó evaporación superficial.

La Figura 4-17 muestra la curva de ajuste propuesta para la cuenca del Salar del Huasco. Se observa un alto grado de dispersión en las tasas registradas para profundidades de saturación similares, sin embargo, es posible distinguir una

tendencia común para el conjunto de datos disponibles. Los valores son presentados como tasas diarias de evaporación desde los suelos ( $E_v$ ), las que fueron normalizadas en función de las tasas de evaporación desde superficies libres ( $E_0$ ) obtenidas durante el mismo período de medición.



**Figura 4-16: Puntos de medición evaporación en la cuenca del Salar del Huasco**



**Figura 4-17: Curva evaporación–profundidad de la napa ajustada en la cuenca Salar del Huasco**

Las relaciones analíticas que describen dicha curva (Figura 4-17) pueden expresarse como:

$$E_N = e^{-5,7 \cdot z} \quad z < 0,27$$

$$E_N = 0,083 \cdot z^{-0,714} \quad z > 0,27$$

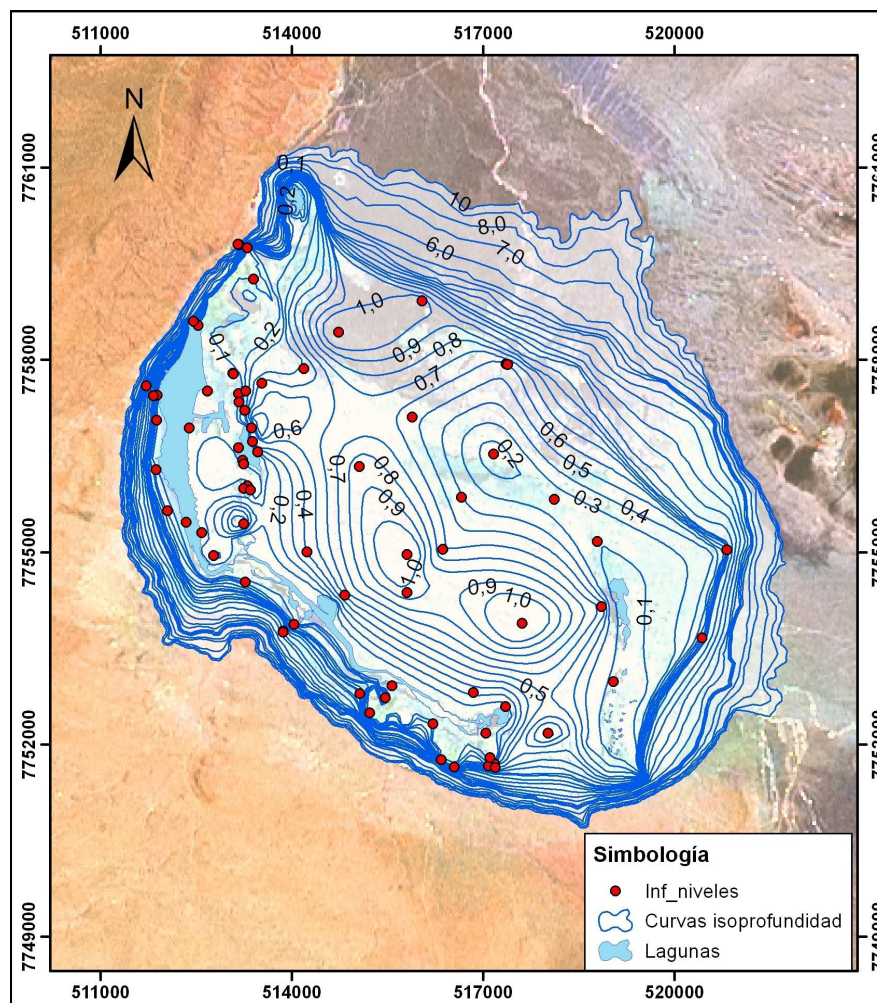
Donde  $E_N$  ( $E_v/E_0$ ) representa la tasa de evaporación normalizada (sin unidades) y  $z$  la profundidad del nivel freático asociado a dicha tasa (m). Para obtener valores de evaporación desde napas freáticas en la zona, los valores obtenidos de las relaciones anteriores deben ser multiplicados por la evaporación desde superficies libres correspondientes a la zona de estudio.

Al igual que en la evaluación de las descargas por evaporación desde superficies libres, se han evaluado dos escenarios. El primero de ellos corresponde a la utilización de la tasa de evaporación media de la estación ‘Salar del Huasco’ (Collahuasi– GP Consultores) y el segundo consideró la evaporación registrada en la estación Collacagua (DGA). Los valores de tanque fueron corregidos por un factor de 0,6; obteniéndose tasas de evaporación desde superficies libres de 3,32 mm/d para el escenario1 y de 3,97 mm/d para el escenario2

Para estimar las descargas desde el acuífero se discretizó la superficie del salar determinando aquellas representativas de diferentes profundidades de la napa. Las curvas de isopropundidad trazadas se muestran en la Figura 4-18, mientras que la Figura 4-19 presenta la superficie asociada a cada banda de profundidad del nivel saturado.

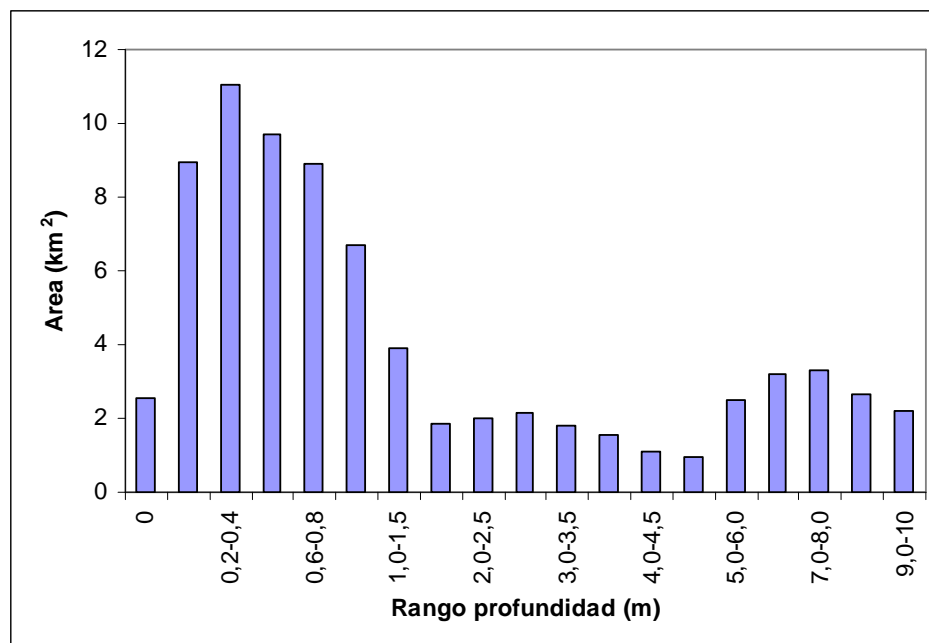
La relación entre la topografía del terreno y la elevación del nivel freático se obtuvo a partir de la información proporcionada por 40 punteras distribuidas homogéneamente sobre el área del salar (Collahuasi– GP Consultores, 2008). Los registros de nivel fueron efectuados por Collahuasi– GP Consultores en enero de 2007 y se presentan en el Anexo B.

El área de evaporación ( $A_e$ ) definida alcanzó los  $74 \text{ km}^2$ , considerando aquellos suelos donde la profundidad del nivel freático fuera menor a 10 metros. Cerca del 60% de  $A_e$  presenta napas más someras a 1 m.



**Figura 4-18: Curvas de isoprofundidad de la napa en el Salar del Huasco**





**Figura 4-19: Áreas por banda de isoprofundidad Salar del Huasco**

En la Tabla 4-10 se resumen los flujos de evaporación obtenidos para las distintas bandas de isoprofundidad. Los flujos estimados para el salar fueron de 480 y 575 L/s para los dos escenarios evaluados. Es posible apreciar que menos del 5% de las descargas totales se manifiestan cuando las napas se encuentran a más de 1,5 m de profundidad. Por lo tanto, los errores cometidos al omitir la evaporación generada desde napas más profundas son o debiesen ser despreciables.

**Tabla 4-10: Descargas por evaporación Salar del Huasco**

Banda	Profundidad	Área	Escenario 1		Escenario 2	
			Evap.	Descarga	Evap.	Descarga
	(m)	(km <sup>2</sup> )	(mm/día)	(L/s)	(mm/día)	(L/s)
0,0-0,1	0,05	6,009	2,49	176,87	2,98	211,56
0,1-0,2	0,15	3,927	1,41	68,04	1,69	81,38
0,2-0,3	0,25	5,201	0,80	53,04	0,95	63,44
0,3-0,4	0,35	4,860	0,58	32,75	0,70	39,17
0,4-0,5	0,45	4,621	0,49	26,02	0,58	31,13
0,5-0,6	0,55	5,055	0,42	24,67	0,50	29,51

Banda	Profundidad	Área	Escenario 1		Escenario 2	
			Evap.	Descarga	Evap.	Descarga
	(m)	(km <sup>2</sup> )	(mm/día)	(L/s)	(mm/día)	(L/s)
0,6-0,7	0,65	5,124	0,37	22,19	0,45	26,55
0,7-0,8	0,75	3,798	0,34	14,85	0,40	17,76
0,8-0,9	0,85	3,544	0,31	12,68	0,37	15,16
0,9-1,0	0,95	3,134	0,29	10,35	0,34	12,38
1,0-1,5	1,25	3,912	0,23	10,62	0,28	12,71
1,5-2,0	1,75	1,839	0,18	3,93	0,22	4,70
2,0-2,5	2,25	2,010	0,15	3,59	0,18	4,29
2,5-3,0	2,75	2,146	0,13	3,32	0,16	3,97
3,0-3,5	3,25	1,794	0,12	2,46	0,14	2,94
3,5-4,0	3,75	1,561	0,11	1,94	0,13	2,31
4,0-4,5	4,25	1,107	0,10	1,25	0,12	1,50
4,5-5,0	4,75	0,974	0,09	1,02	0,11	1,22
5,0-6,0	5,5	2,507	0,08	2,36	0,10	2,83
6,0-7,0	6,5	3,203	0,07	2,68	0,09	3,21
7,0-8,0	7,5	3,287	0,07	2,48	0,08	2,97
8,0-9,0	8,5	2,627	0,06	1,82	0,07	2,17
9,0-10	9,5	2,204	0,06	1,41	0,07	1,68
<b>Total</b>		<b>74,4</b>		<b>480,4</b>		<b>574,5</b>

En la Tabla 4-11 se presenta una comparación entre las descargas por evaporación desde los suelos obtenidas en el presente estudio con otras estimaciones disponibles que midieron la evaporación in situ utilizando lisímetros y tanques de evaporimétricos de bandeja. Se observa que el valor estimado por Collahuasi– GP Consultores para el período de verano es considerablemente mayor que el resto de las aproximaciones. Los valores registrados representan diferencias de un 30% con respecto a los propuestos por Acosta (2004) y por Collahuasi– GP Consultores para el invierno.

**Tabla 4-11: Evaporación desde los suelos del salar**

Estudio	Área	Evaporación
	(km <sup>2</sup> )	(L/s)
DGA – PUC (2009)	74,4	480 – 575
Acosta (2004)	54	687
Collahuasi– GP Consultores verano (2008)	46	1.454
Collahuasi– GP Consultores invierno (2008)	46	398

#### **4.1.8.2 Descarga hacia otra cuenca**

Del mismo modo que para el caso de la recarga desde otras cuencas, en la sección 4.1.5 se indica la existencia de una eventual descarga desde el Salar del Huasco hacia la cuenca de la Pampa del Tamarugal. Esta descarga se produciría a través del importante diaclasamiento y fracturamiento que hay en la zona de Altos de Pica, captando parte de la recarga en el sector oeste de la hoya hidrográfica de Huasco.

Se han realizado varios estudios que descartan esta posibilidad, basados en información geofísica, hidrogeoquímica e isotópica. No se han estimado valores de descarga y los modelos conceptuales vigentes, incluido el planteado en el presente estudio, consideran que la cuenca hidrogeológica recibe el aporte de toda el área delimitada por la cuenca hidrográfica.

#### **4.1.8.3 Descarga a través de vertientes naturales**

Las vertientes identificadas de mayor relevancia (Figura 4-20) se presentan a continuación:

La vertiente Huasco Norte, también conocida como Huasco Grande o Corriente. Se sitúa en el extremo noroeste del salar donde brota agua dulce (~600 µS/cm) alrededor de 4 m por sobre el nivel de la laguna principal, a una temperatura de 15,5° C y con un caudal medio de 26 L/s según los aforos realizados por la Dirección General de Aguas. Las condiciones de temperatura y salinidad del mantamiento difieren considerablemente de las observadas en el acuífero superior y en la laguna principal, por lo que se trataría de aguas provenientes de flujos más

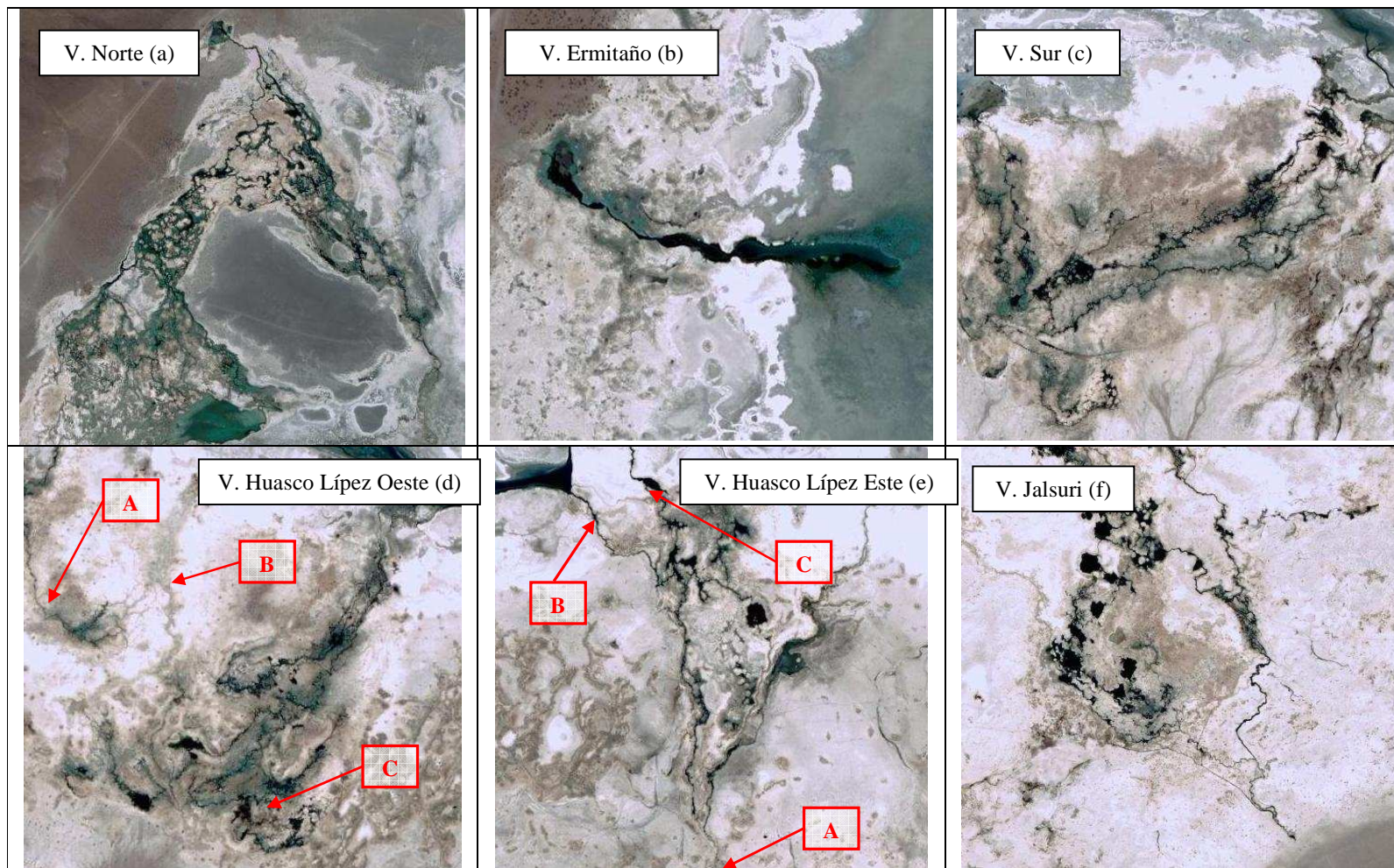


Figura 4-20: Vertientes ubicadas en Salar del Huasco

profundos que logran aflorar en superficie a través de grietas. El sistema Huasco Norte presenta el mayor bofedal existente en el salar con una superficie de vegetación estimada en  $0,5 \text{ km}^2$ , según mediciones realizadas en diciembre de 2003.

La vertiente Ermitaño está alrededor de 2,5 km al sur del sistema Huasco Norte. Los aforos realizados por la DGA determinan un caudal promedio de 23 L/s. En este caso, el afloramiento se produce alrededor de 2 m por sobre el nivel medio registrado en las lagunas.

La vertiente Huasco Sur está ubicada inmediatamente al oeste del sistema Huasco Lítez, y no descarga agua superficial a la laguna principal en forma continua, sin embargo, existe un canal que evidencia su conexión al menos en forma esporádica. Por el momento no se cuenta con mediciones directas del caudal aportante hacia la laguna permanente, pero se ha estimado el consumo evapotranspirativo del humedal en 1,7 L/s, con una variación estacional entre 1,2 y 2,5 L/s. El área de vegetación asociada al humedal alimentado por el afloramiento es de  $0,049 \text{ km}^2$ . Por su parte, la calidad de las aguas de abastecimiento al sistema ha sido evaluada en función de la conductividad eléctrica, reportándose valores entre 900 y  $1.000 \mu\text{S/cm}$ .

El sistema Huasco Lítez se ubica en el sector sur del salar y debido a su constitución morfológica, puede ser dividido en dos subsistemas, este y oeste (Figura 2-3). Los afloramientos del agua subterránea se manifiestan en áreas relativamente grandes pero bien definidas, desde donde escurren en dirección norte, alimentando bofedales y recargando finalmente la laguna permanente del salar. Las áreas de vegetación asociadas a ambos humedales poseen superficies de  $0,13$  y  $0,02 \text{ km}^2$  para los sistemas oeste y este, respectivamente. De los dos subsistemas establecidos, sólo el Este aporta aguas a la laguna en forma continua. De acuerdo a aforos efectuados cada 15 días durante enero y febrero de 2004 en tres secciones del sistema Huasco Lítez Este (Figura 4-20 (e)), los caudales aportantes hacia la laguna permanente son de 17,5 L/s, de los cuales 11,5 L/s corresponden a la sección B y 6 L/s al punto de aforo C. En la cabecera del afloramiento (punto A), el caudal estimado varió entre 4,3 y 5,3 L/s. En el sector oeste, la demanda evapotranspirativa

del humedal, representativa del caudal máximo que no generaría escurrimientos remanentes hacia la laguna permanente, ha sido estudiada por Collahuasi- GP Consultores, entregando valores de 0,6 L/s (entre 0,4 y 1,0 L/s) en el punto A; 1,1 L/s (entre 0,7 y 1,6 L/s) para la zona B y de 3,1 L/s (entre 2,1 y 4,6 L/s) para el sector C (Figura 4-20 (d)). Las conductividades eléctricas registradas varían entre los 900 y 1.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , valores que se mantienen relativamente constantes hasta descargar en la laguna permanente.

El humedal Jalsuri, ubicado en el extremo sureste del salar es alimentado por un afloramiento de agua subterránea de tipo puntal y esporádico, con un caudal, medido por Collahuasi-GP Consultores en enero de 2004, de 10,5 L/s. Esta agua escurre superficialmente hacia el norte, formando pequeñas lagunas de evaporación y un humedal de 0,10  $\text{km}^2$ .

Superficialmente el sistema del humedal Jalsuri no se encuentra conectado a la laguna permanente. En relación a sus parámetros físico-químicos, Collahuasi-GP Consultores midió en enero de 2004 una conductividad eléctrica de 896  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

En la zona central del salar, inmediatamente al norte de la laguna permanente existe una surgencia de relativa importancia, la cual alimenta superficialmente la laguna (Figura 2-4). En el sistema identificado, denominado Chullumpine, no se han realizado mediciones directas de caudal, pero mediante la realización de balances hídricos se ha estimado un flujo de 16 L/s.

En la Tabla 4-12 se muestra un cuadro resumen con la ubicación de las principales vertientes detectadas en el Salar del Huasco, adicionalmente se presenta el caudal determinado en cada una de ellas y el método de estimación utilizado.

**Tabla 4-12: Estimación de caudales en vertientes aportantes a lagunas del Salar del Huasco.**

Vertiente	Ubicación UTM		Caudal (L/s)	Fecha	Método	Fuente
	Este	Norte				
Huasco Norte (Noroeste del salar)	513.200	7.759.784	26	Varias <sup>a</sup>	Aforo	DGA
Ermitaño (Noroeste del salar)	511.765	7.757.548	23	Varias <sup>a</sup>	Aforo	DGA

Vertiente	Ubicación UTM		Caudal (L/s)	Fecha	Método	Fuente
	Este	Norte				
Huasco Sur (Sur del salar )	515.328	7.752.415	2,5	dic-03	Dda EVT <sup>b</sup>	Collahuasi-GP Consultores
Huasco Lipez Oeste (Sur del salar)						
A	516.266	7.751.988	1	dic-03	Dda EVT <sup>b</sup>	Collahuasi-GP Consultores
B	516.493	7.751.898	1,6	dic-03	Dda EVT <sup>b</sup>	Collahuasi-GP Consultores
C	516.457	7.751.712	4,6	dic-03	Dda EVT <sup>b</sup>	Collahuasi-GP Consultores
Huasco Lipez Este (Sur del salar)						
A	517.090	7.751.533	4,5	ene-04	Aforo	Collahuasi-GP Consultores
B	517.090	7.751.533	11,5	ene-04	Aforo	Collahuasi-GP Consultores
C	517.138	7.751.804	6,0	ene-04	Aforo	Collahuasi-GP Consultores
Jalsuri	519.400	7.751.612	10,5	ene-04	Aforo	Collahuasi-GP Consultores

Nota:

<sup>a</sup> Varias: corresponde al promedio de varias fechas en que se ha medido.

<sup>b</sup> Dda EVT: demanda evapotranspirativa.

#### **4.1.8.4 Descargas a través de obras de captación**

En la cuenca Salar del Huasco no existen derechos de agua subterránea otorgados, sino sólo solicitudes por parte de la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi (CMDIC), que aún se encuentran en trámite por parte de la Dirección General de Aguas.

Así también, existen derechos de aguas superficiales solicitados, sin embargo algunos de ellos fueron denegados, y otros se encuentran pendientes de resolución en el Juzgado de Letras. No obstante para la DGA considera estas solicitudes como entregadas. En la Tabla 4-13 se presentan los derechos de aguas solicitados.

**Tabla 4-13: Derechos de agua superficial solicitados en la cuenca Salar del Huasco por la Asociación Indígena Aymará (AIA) Laguna del Huasco. Las coordenadas están en datum PSAD 56, Huso 19 Sur. Todos corresponden al expediente NR-0103-789**

Captación	Ejercicio	Uso	Caudal solicitado	Coordenadas UTM	
			(L/s)	Norte	Este
Quebrada Coyacoyani	P/C	Agrícola	0,22	7.755.552	524.408
Quebrada Rinconada	P/C	Agrícola	5,0	7.755.404	524.552
Vertiente Jalsure	P/C	Agrícola	16,0	7.751.558	519.456
Vertiente Umakechina	P/C	Agrícola	12,0	7.751.454	517.304
Vertiente Huascolipe N°2	P/C	Agrícola	1,0	7.751.802	517.000
Vertiente Huascolipe N°1	P/C	Agrícola	1,5	7.751.906	517.204
Vertiente Huascolipe N°3	P/C	Agrícola	0,22	7.752.650	515.154
Vertiente Huascolipe N°4	P/C	Agrícola	13,0	7.752.758	515.154
Vertiente Huascolipe N°5	P/C	Agrícola	0,5	7.752.702	515.000
Vertiente Kakavinto	P/C	Agrícola	0,22	7.754.254	512.852
Vertiente Huasco Grande	P/C	Agrícola	20,0	7.757.000	511.608
Vertiente Chullumpire	P/C	Agrícola	24,0	7.754.956	513.704
Vertiente Baño Del Lalo	P/C	Agrícola	0,22	7.758.256	511.652
Vertiente Lukas	P/C	Agrícola	0,22	7.760.582	513.504
Vertiente Huasco Grande N°1	P/C	Agrícola	24,0	7.759.504	513.504
Total			118,10		

P/C: Permanente y continuo;.

#### 4.1.9 Balance de Recarga y Descarga

Montgomery *et al* (2003) plantean que debido a que las cuencas cerradas del Altiplano de Tarapacá han estado en equilibrio dinámico, la recarga del sistema debe ser igual a la suma de las estimación de la descarga evaporativa.

Realizando un balance de la cuenca, tomando en cuenta las recargas y descargas estimadas para cada una se tiene lo siguiente:



- La recarga total de la cuenca en un escenario medio de largo plazo fue estimada en 1.160 L/s, lo que considera únicamente los aportes por precipitación, dado que no se han probado otras entradas al sistema.
- Las descargas de la cuenca quedan definidas por la evaporación desde lagunas y napas someras en el área del salar, y sistemas vegetacionales mixtos alimentados por afloramientos de agua subterránea, como primera fuente. Estos sistemas vegetacionales se encuentran repartidos principalmente en el entorno del salar y en otras donde hay afloramientos de vertientes, primordialmente en los tributarios al Río Collacagua.

En la Tabla 4-14 se presentan los valores estimados de entrada y salida de la cuenca de estudio.

**Tabla 4-14: Entradas y salidas de toda la cuenca Salar del Huasco.**

<b>Entradas (IN)</b>	<b>Mínimo (L/s)</b>	<b>Medio (L/s)</b>	<b>Máximo (L/s)</b>
Recarga precipitación	920,1	1.158,7	1.400,6
Desde otras cuencas	-	-	-
<b>Total entradas</b>	<b>920,1</b>	<b>1.158,7</b>	<b>1.400,6</b>
<b>Salidas (OUT)</b>			
Evaporación <sup>a</sup>	699,0	757,0	815,0
Extracciones <sup>b</sup>	118,1	118,1	118,1
Hacia otra cuenca	-	-	-
<b>Total salidas</b>	<b>817,1</b>	<b>875,1</b>	<b>933,1</b>
<b>Balance (IN – OUT)</b>	<b>103,0</b>	<b>283,6</b>	<b>467,5</b>
<b>Porcentaje de diferencia</b>	<b>11%</b>	<b>24%</b>	<b>33%</b>

Nota:

<sup>a</sup> Considera los flujos desde cuerpos de agua libre, vegetación y napas freáticas someras.

<sup>b</sup> Consideran las extracciones superficiales asumidas por la DGA, dado que no hay derechos de agua subterránea aprobados.

<sup>c</sup> Resultado del balance con respecto al valor de las entradas al sistema (en valor absoluto).

Las posibles situaciones que estarían asociadas a las diferencias entre las entradas y las salidas del sistema se discuten a continuación:

**a. Metodología de estimación de parámetros del balance hídrico**

Las diferencias pueden atribuirse al error en la estimación de los parámetros de la ecuación del balance hídrico. Para el caso de la recarga, los valores obtenidos en el presente estudio 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. La estimación de las descargas por evaporación presenta mayor incertidumbre. Los valores de las descargas obtenidos son menores a las calculadas por Collahuasi-GP Consultores y Acosta (Sección 4.1.8). Estas diferencias se encuentran asociadas a los siguientes aspectos:

- ***La información del nivel freático.*** Actualmente se dispone de información de buena calidad sobre niveles del agua subterránea dentro del salar, debido a la instalación de una serie de punteras que permiten caracterizar con una buena cobertura espacial la profundidad del nivel saturado. La interpolación de los datos provistos por Collahuasi-GP Consultores da como resultado el mapa mostrado en la Figura 4-18, que es similar a lo presentado por Collahuasi – GP Consultores en sus reportes para estimar la descarga. Los valores finales difieren por el hecho de que la variación de la evaporación con la profundidad del nivel saturado que éstos consideran difiere de la propuesta en este estudio, lo que es descrito en los siguientes dos puntos.

Los niveles usados por Acosta (2004) están basados en los datos medidos por JICA - DGA (1995) y de la Poza Ermitaño, para caracterizar el área del salar y la zona húmeda al norte de éste. Para ello, consideró una división de todo este sector de descarga por evaporación en tres zonas, con profundidades discretas de 0,2; 0,4 y 0,6 m. Con la información actualmente disponible, comentada en el párrafo anterior, se cuenta con datos más claros de la variación del nivel saturado en la zona que se discute, por lo que es más conveniente usar dicha información.

- ***La curva de evaporación versus profundidad de la napa.*** En este estudio se construyó la curva de evaporación versus profundidad de la napa en base a las mediciones realizadas en la cuenca con el método del domo dentro del estudio de la DGA-PUC, 2009 (Figura 4-17). En el caso de Collahuasi – GP Consultores, éstos definieron una curva con las observaciones que tienen en lisímetros instalados en la cuenca. Finalmente, Acosta (2004) utilizó la curva propuesta por Grilli y Vidal (1986), en las tres profundidades que abordó, corrigiendo por la altura a la que se hicieron las mediciones de la curva (Salar de Atacama) y la altura del Salar del Huasco en que se encontraba trabajando.

De este modo, las curvas en cuestión difieren para cada una de las estimaciones de las descargas por evaporación. Resulta más confiable lo planteado en este estudio y lo hecho por Collahuasi – CP Consultores, dado que utilizaron datos medidos in situ. Aún así, los valores difieren considerablemente para la evaluación realizada por Collahuasi-GP Consultores en verano (Tabla 4-10).

- ***Superficie de lagunas y zonas de descarga.*** Otra de las fuentes de diferencias consiste en las áreas desde donde se produce evaporación. Este factor depende de la técnica de medición utilizada para su cálculo, así como el o los años de los que se dispone información de las imágenes satelitales. Los distintos autores presentan varias diferencias en este sentido.

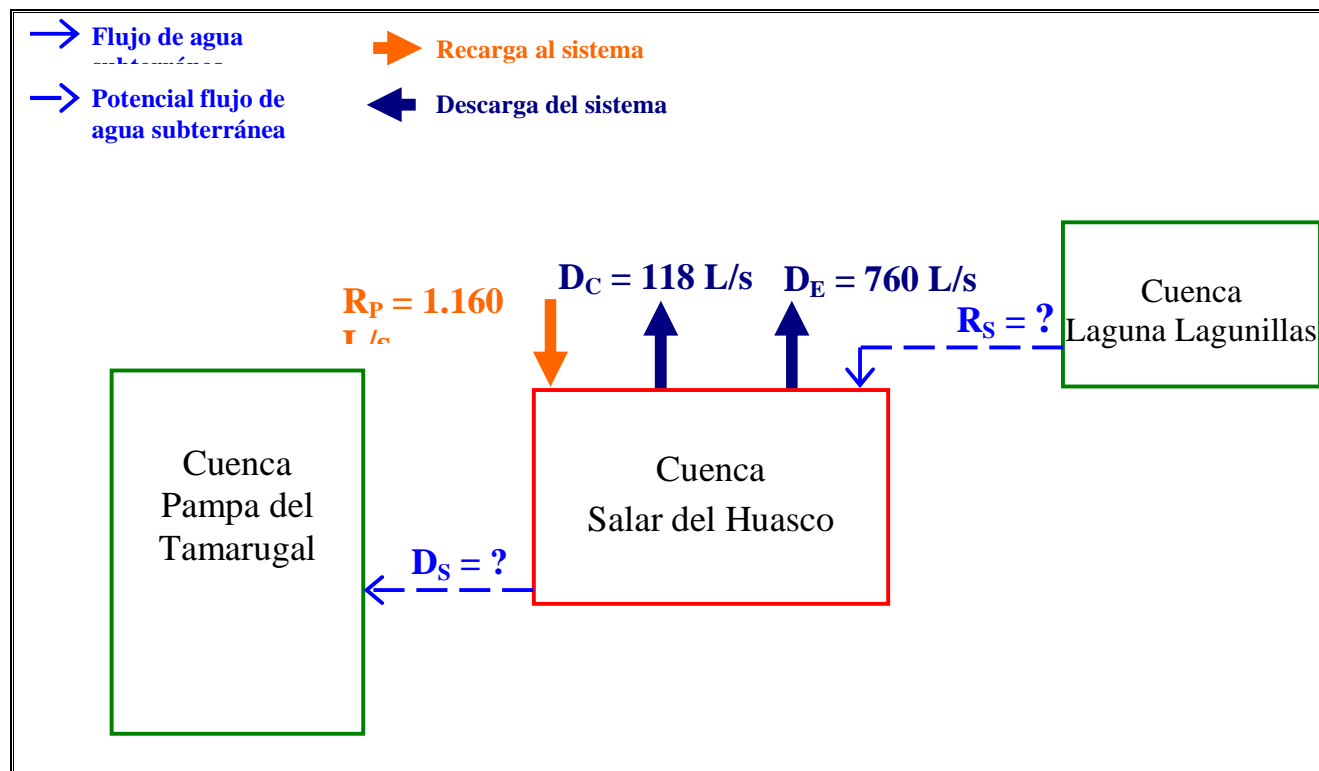
#### **b. Salidas subterráneas no considerados hacia otras cuencas**

En el apartado 4.1.6 se discute sobre la conexión con otras cuencas, donde se plantea las descargas desde la cuenca Salar del Huasco hacia la cuenca Pampa del Tamarugal. Estas han sido estudiadas, siguiendo el patrón de las aguas observadas por Risacher et al. (1999) y lo propuesto por Tröger et al. (2004). En la mayoría de los antecedentes se ha descartado, sin embargo, en el estudio de la DGA-PUC (2009) se indica la descarga a través de las fallas de orientación NNE–SSW al oeste del salar, que estarían vinculadas a la Quebrada Chara, una de las tributarias de la Quebrada Alona que descarga en el Salar de Pintados.

**c. Extracciones actuales son mayores a lo supuesto**

Es posible que del sistema se esté extrayendo más agua de lo que se encuentra otorgado. En la cuenca del Salar del Huasco existe un mayor conocimiento en este sentido, siendo incluso probable que algunas aguas superficiales otorgadas se encuentren sin aprovechamiento en forma continua y permanente.

En conclusión el modelo conceptual hidrogeológico del sistema acuífero del Salar del Huasco se muestra en la Figura 4-21, donde se presentan las recargas y descargas del sistema, así como los eventuales flujos subterráneos de salida.



**Figura 4-21: Modelo de entradas y salidas de la cuenca Salar del Huasco**

Notas:

$R_P$ : recarga por precipitación;

$D_C$ : descarga por obras de captación;

$D_E$ : descargas por evaporación;

$R_S$ : recargas subterráneas; y

$D_S$ : descargas subterráneas.

## 4.2 Caracterización Hidrogeoquímica

### 4.2.1 Antecedentes Hidrogeoquímicos

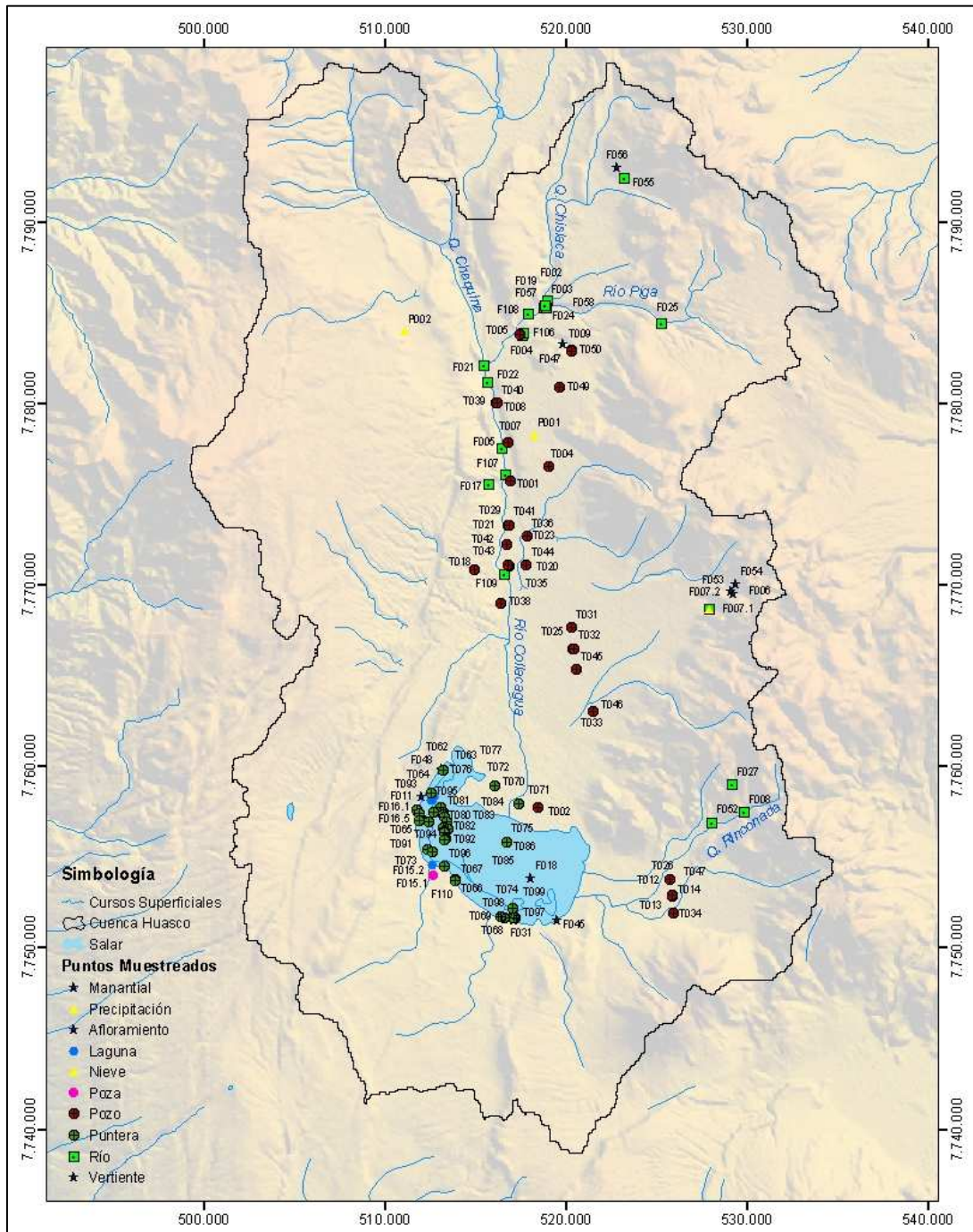
Los datos químicos fueron agrupados de acuerdo al tipo de fuente, ya sea aguas superficiales (ríos, lagunas y pozas); subterráneas (pozos y punteras cuyas profundidades de perforación son menores a 6 m); afloramientos de aguas subterráneas (manantiales o vertientes); y precipitación (lluvia y nieve); las cuales se han representado en la Figura 4-22.

El catastro inicial contaba con 326 análisis químicos en 183 puntos de la cuenca, sin discriminar la fuente de la que fueron tomados, de los cuales sólo 160 cumplen la condición de presentar un error de balance iónico, en valor absoluto de 10%, considerándose poco confiables aquellos que presentaban un error mayor (Tabla 4-15).

**Tabla 4-15: Datos hidrogeoquímicos disponibles por tipo de agua**

<b>Tipo de agua</b>	<b>Punto muestreo</b>	<b>Nº análisis químicos realizados</b>	<b>Nº análisis con balance iónico correcto</b>
Subterránea	72	144	59
Superficial	59	90	61
Afloramiento Agua Subterránea	50	76	40
Precipitación	2	16	0
<b>Total</b>	<b>183</b>	<b>326</b>	<b>160</b>

En cuanto a los datos isotópicos de deuterio y oxígeno-18, se trabajó con 128 análisis procedentes de 88 puntos de muestreo (Tabla 4-16). Estos datos provienen de 21 análisis realizados en los trabajos de campo del año 2008, 48 análisis recopilados de los estudios de Collahuasi– GP Consultores efectuados en 2003 y 2004, 4 análisis provenientes del estudio de Risacher et al. (1999) y 55 análisis de la base de datos de la DGA (DEP). En la Figura 4-23 se presentan los puntos de muestreo con información isotópica disponible, clasificados por el tipo de fuente.



**Figura 4-22: Distribución de muestras químicas en la cuenca del Salar del Huasco**

**Tabla 4-16: Datos isotópicos disponibles por fuente**

<b>Tipo de agua</b>	<b>Datos Isotópicos</b>
Subterránea	38
Superficial	25
Afloramiento Agua Subterránea	23
Precipitación	2
Total	88

En relación al análisis hidrogeoquímico de elementos minoritarios (definidos como los elementos que presentan concentraciones entre los 10 y 0,01 mg/L, y suman en general alrededor del 1% del contenido iónico total, por ejemplo el bromuro, yoduro, sílice, litio, estroncio, fosfato, nitrito, hierro, manganeso, aluminio, amonio, sulfuro, fluoruro) y los parámetros físico-químicos, dado que éstos no han sido utilizados para el cálculo del balance iónico, todas las muestras que contienen dicha información han sido consideradas para la caracterización de las aguas de la cuenca.

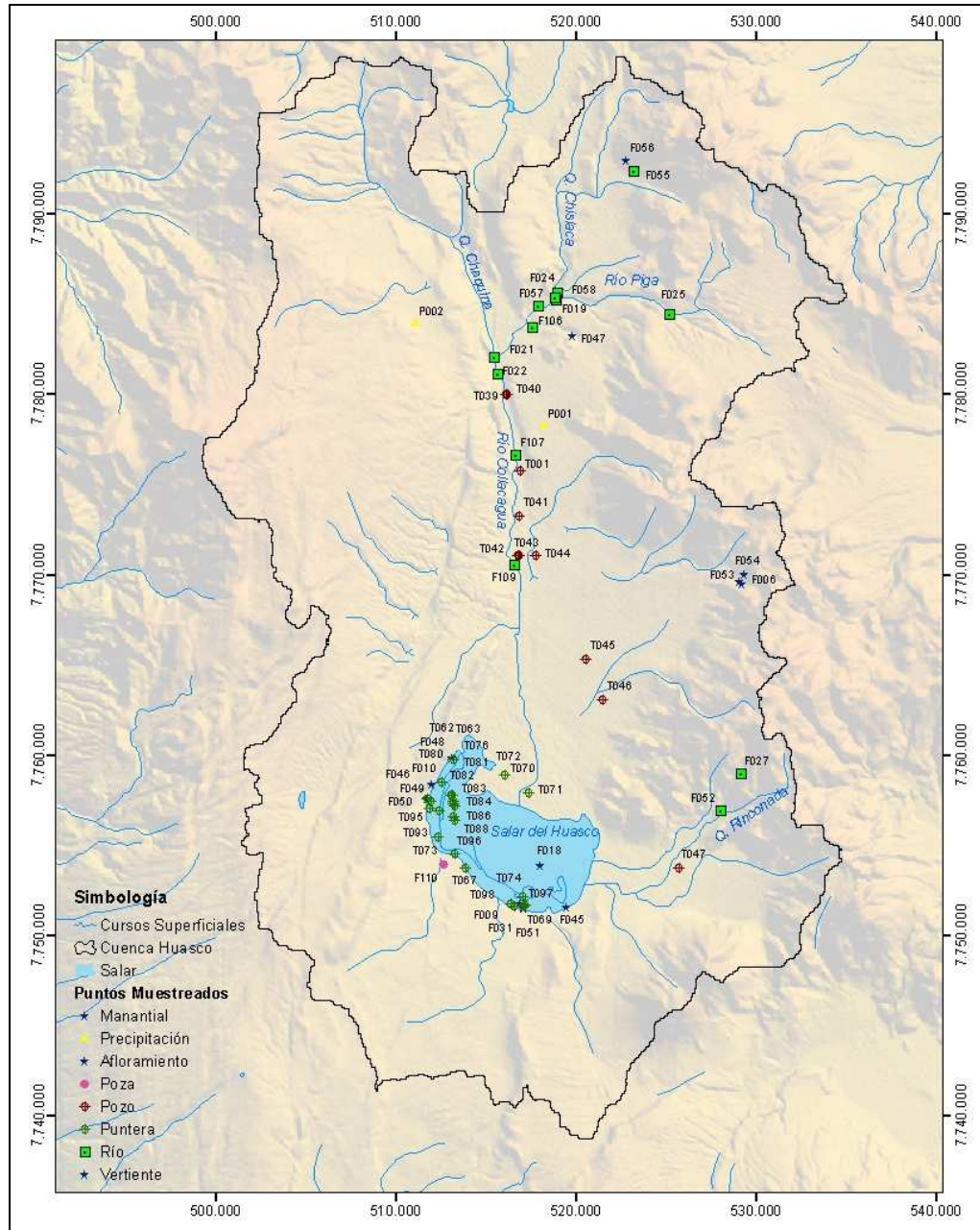
#### **4.2.2 Química General de las Aguas de la Cuenca**

A continuación se presenta el análisis de los parámetros físico-químicos de las muestras de aguas, así como el análisis de los parámetros mayoritarios. En el Anexo D se presenta la información referida a los elementos minoritarios.

##### **4.2.2.1 Parámetros Físico-Químicos**

Los parámetros físico-químicos estudiados son la temperatura, el pH y la conductividad eléctrica de las aguas. En la Figura 4-24 y Tabla 4-17 se presenta la distribución de valores de las muestras agrupadas de acuerdo al tipo de fuente (superficial, subterránea y afloramiento de aguas subterráneas), indicando las principales estadísticas (mínimo, máximo, mediana, primer cuartil y tercer cuartil). Cabe indicar que no se registraron datos de parámetros físico-químicos para las aguas de lluvia y nieve.

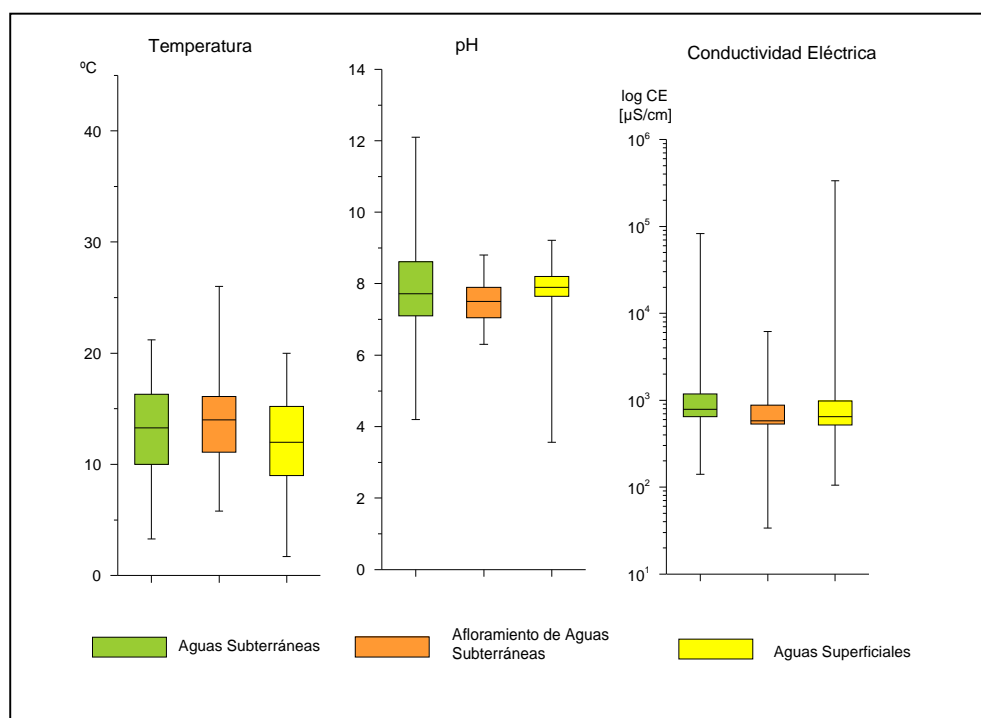




**Figura 4-23: Distribución de muestras isotópicas en cuencas del Salar del Huasco**

**Tabla 4-17: Distribución de los parámetros físico-químicos de las fuentes de agua en la cuenca del Salar del Huasco**

Parámetro	Cantidad	Máximo	Mínimo	Percentil 25	Mediana	Percentil 75
<b>Aguas Subterráneas</b>						
Temperatura (°C)	72	21,2	3,3	10,1	13,3	15,7
pH	94	12,1	4,2	7,1	7,7	8,6
Conductividad Eléctrica (μS/cm)	93	82 700	140	645	788	1 160
<b>Afloramiento de Aguas Subterráneas</b>						
Temperatura (°C)	37	26	5,8	11,1	14	15,8
pH	55	8,8	6,3	7,1	7,5	7,9
Conductividad Eléctrica (μS/cm)	44	6 180	33,9	536,8	579,5	859
<b>Aguas Superficiales</b>						
Temperatura (°C)	33	20	1,7	9,0	12,0	13,7
pH	82	9,2	3,6	7,7	7,9	8,2
Conductividad Eléctrica (μS/cm)	119	335 000	33,9	530	600	888,5



**Figura 4-24: Distribución de los parámetros físico-químicos de las aguas en la cuenca del Salar del Huasco**

## **Temperatura**

Las temperaturas del agua, medida in situ, se encuentran influenciadas por la temperatura del aire y la radiación solar para aquellas que están cerca o sobre la superficie del terreno, así como por el gradiente geotermal cuando las muestras de aguas subterráneas han sido tomadas a grandes profundidades. Temperaturas distintas a las esperadas por la naturaleza de la muestra y/o fecha de muestreo indican ciertas características del área o del flujo de las aguas subterráneas (por ejemplo, zona de hidrotermalismo, vertiente de alimentación subsuperficial, de flujo profundo, etc.).

La temperatura medida in situ en las aguas subterráneas varió entre 3,3 °C y 21,2 °C; mientras que en los afloramientos de aguas subterráneas oscilaron entre 5,8 °C y 26 °C. Las mayores temperaturas pueden considerarse como aguas termales, y corresponden a un agua de pozo (HUA.T046), con un valor de 21,2 °C, y una muestra de la vertiente Ermitaño (HUA.F016) con 26 °C; las que se ubican respectivamente en el sector Pampa Sillillica y al oeste del salar.

En las aguas superficiales se registraron valores de temperatura entre 1,7 °C y 20 °C. La mayor temperatura se registró en la laguna (HUA.F097).

## **pH**

Los valores de pH en las aguas subterráneas variaron entre 4,2 y 12,1, denotando aguas de características ácidas a básicas. El valor de pH más bajo fue reportado en la muestra de un pozo (HUA.T004) ubicado en el sector Pampa Peña Blanca (norte de la cuenca), sin embargo, no se cuenta con otras mediciones realizadas en el mismo punto que puedan corroborar el valor determinado en aquella ocasión. En los afloramientos de aguas subterráneas, los valores de pH oscilaron entre 6,3 y 8,8; denotando aguas de características principalmente básicas.

En las aguas superficiales se registraron valores de pH entre 3,6 y 9,2; denotando aguas de características ácidas a básicas. Los valores ácidos de pH se reportaron en dos puntos de muestreo (HUA.F027 y HUA.F052) ubicados en el río de la zona de

rinconada (sureste de la cuenca) donde se reconoce la unidad geológica de estratovolcanes que agrupa a la mayoría de los centros volcánicos del área.

En general se evidencia que los valores de pH tienden en la mayoría de muestras de agua de neutros a alcalino, debido a la capacidad buffer de las rocas volcánicas y carbonatadas (Risacher, 2003).

### **Conductividad Eléctrica**

Generalmente, la Conductividad Eléctrica (CE) se incrementa desde las zonas topográficamente más altas, que corresponde a las áreas de recarga donde hay precipitación, hasta las zonas topográficamente más bajas de las cuencas donde por el trayecto recorrido se ha producido un aumento de los sólidos disueltos. Cuando se observa salares en los depocentros de las hoyas hidrográficas, la evaporación contribuye enormemente en el aumento de estos dos parámetros.

Los valores de CE corresponden a aquellos medidos en el laboratorio. Los valores de este parámetro variaron entre 140  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 82.700  $\mu\text{S}/\text{cm}$  en las aguas subterráneas, siendo en general menor que las aguas superficiales. Las muestras tomadas en las punteras ubicadas en el entorno del salar presentaron los valores más altos, desde 450  $\mu\text{S}/\text{cm}$  hasta 82.700  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , mientras que las aguas de los pozos presentaron valores entre 140  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 1.290  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

En los afloramientos de aguas subterráneas, los valores de CE oscilaron entre 33,9  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 6 180  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Los valores más altos se registraron en los manantiales o vertientes ubicados cerca al salar.

Las aguas superficiales presentaron valores de CE entre 33,9  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 335.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , conteniendo al valor máximo y mínimo de entre todas las muestras. De todas éstas, las lagunas presentaron los valores más elevados, desde 678  $\mu\text{S}/\text{cm}$  hasta 335.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , y los ríos presentaron un rango entre 105  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 1.060  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

La CE y la concentración de sólidos totales disueltos (TDS) son dos parámetros que se relacionan de forma directamente proporcional a través de la expresión establecida por Custodio (1976):

$$\text{STD (mg/L)} \approx (0.55 - 0.76) \text{ CE } (\mu\text{S/cm})$$

El aumento de los elementos disueltos en el agua aumenta las cargas iónicas, aumentando la CE de la misma. En la Figura 4-25 se aprecia la relación de la CE con la concentración de TDS, donde se observa claramente que las aguas más salinas corresponden a las aguas superficiales (principalmente lagunas) ubicadas en el área del salar, las que se encuentran muy influenciadas por la evaporación. Las muestras de pozos, ríos, precipitación y vertientes se caracterizan por ser aguas dulces.

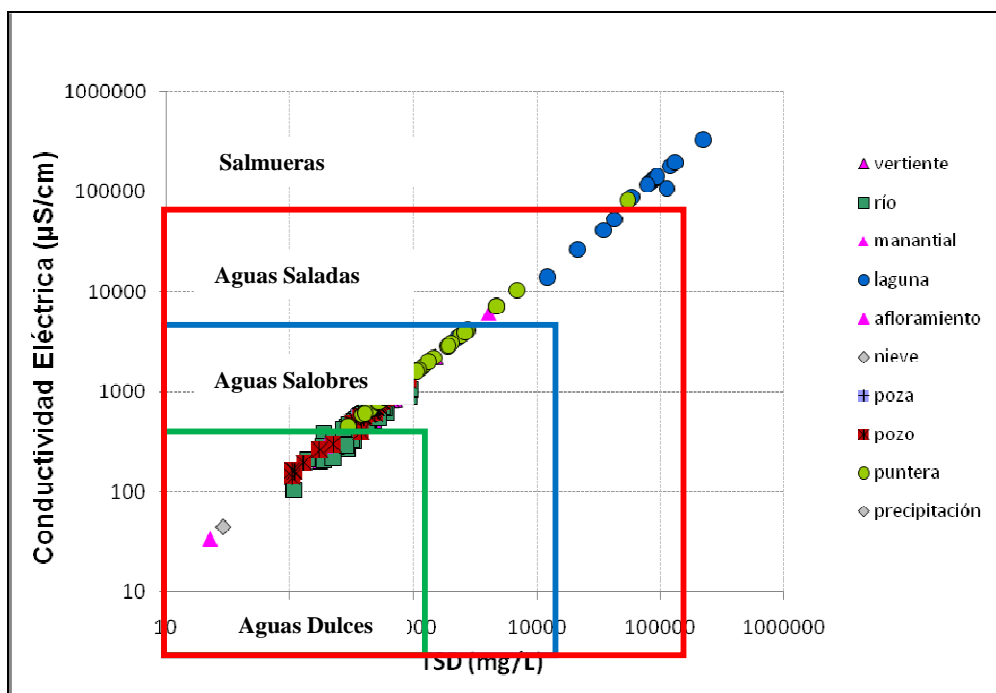


Figura 4-25: Relación de la conductividad eléctrica y los sólidos disueltos totales

#### 4.2.2.2 Elementos Mayoritarios y Composición de las Aguas

Los elementos mayoritarios considerados para la evaluación de la composición de las aguas son los siguientes:

Aniones: cloruro ( $\text{Cl}^-$ ), bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) y nitrato ( $\text{NO}_3^-$ )

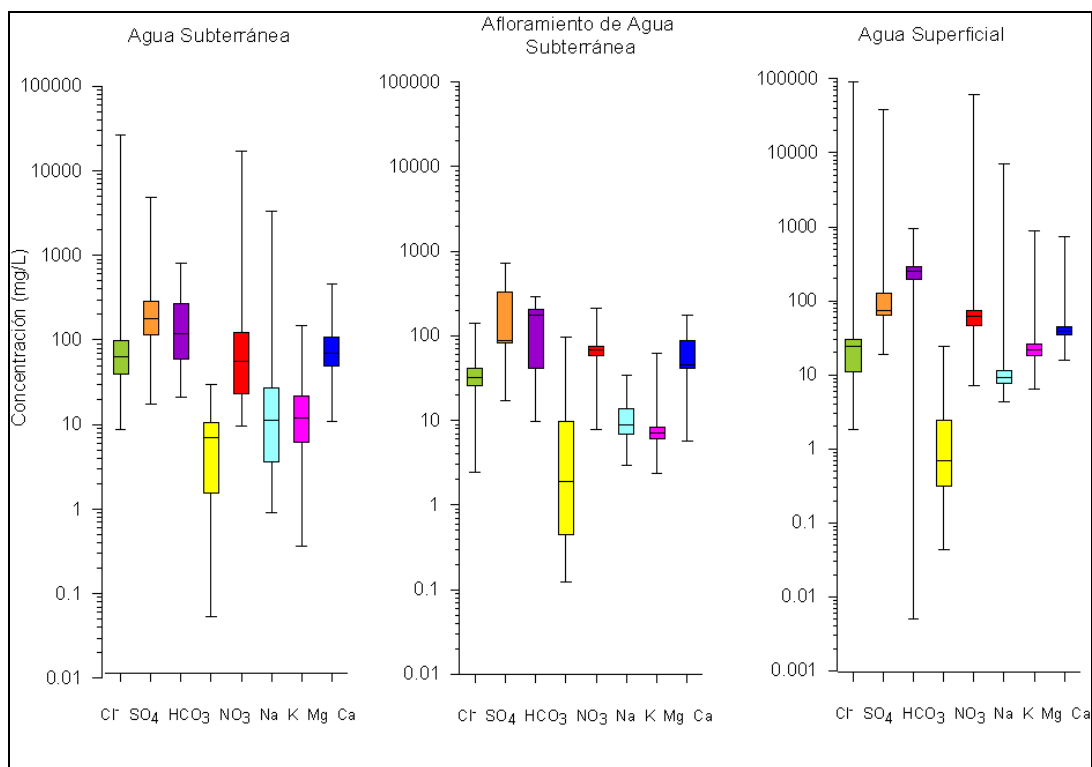
Cationes: sodio ( $\text{Na}^+$ ), calcio ( $\text{Ca}^{+2}$ ), potasio ( $\text{K}^+$ ) y magnesio ( $\text{Mg}^{+2}$ )

Las principales estadísticas de los elementos mayoritarios de las muestras agrupadas según tipo de fuente (subterránea, afloramiento de agua subterránea y superficial) se muestran en la Tabla 4-18 y Figura 4-26. Se observa que los elementos que presentan las más altas concentraciones (considerando la mediana) en las aguas subterráneas son el sulfato, bicarbonato, calcio, cloruro y sodio; mientras que en los afloramientos de aguas subterráneas son el bicarbonato, sulfato, sodio, calcio y cloruro. En las aguas superficiales los elementos con más altas concentraciones son el bicarbonato, sulfato, sodio, calcio, cloruro y magnesio.

**Tabla 4-18: Distribución de los elementos mayoritarios en las aguas de la cuenca del Salar del Huasco**

Elemento	Cantidad	Máximo mg/L	Mínimo mg/L	Percentil 25 mg/L	Mediana mg/L	Percentil 75 mg/L
<b>Aguas Subterráneas</b>						
$\text{Cl}^-$	58	26.358	8,6	39,7	62,6	97,15
$\text{SO}_4^{2-}$	58	4.928	17,3	115	180,3	282,9
$\text{HCO}_3^-$	58	822	20,8	59,6	120,7	262,3
$\text{NO}_3^-$	31	30,1	0,05	1,6	7,09	10,4
$\text{Na}^+$	58	16.812	9,7	23,5	55,6	121,8
$\text{K}^+$	58	3.358	0,9	3,6	11,1	26,6
$\text{Mg}^{+2}$	58	147	0,37	6,2	11,9	20,4
$\text{Ca}^{+2}$	58	455	11	48,6	70,2	107,1
<b>Afloramiento de Aguas Subterráneas</b>						
$\text{Cl}^-$	41	140	2,4	26	32	40
$\text{SO}_4^{2-}$	41	721	17,33	81,3	89,3	325,6
$\text{HCO}_3^-$	41	293,1	9,8	41,8	175,7	205
$\text{NO}_3^-$	18	97,4	0,1	0,4	1,9	9,7
$\text{Na}^+$	41	211	7,8	57,6	68	75,9
$\text{K}^+$	41	34,7	3	7	8,8	13
$\text{Mg}^{+2}$	41	62,9	2,4	6,1	7,1	8

Elemento	Cantidad	Máximo mg/L	Mínimo mg/L	Percentil 25 mg/L	Mediana mg/L	Percentil 75 mg/L
Ca <sup>+2</sup>	41	174	5,7	41,5	46	87
<b>Aguas Superficial</b>						
Cl <sup>-</sup>	61	89.692	1,8	11	24,1	29,6
SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	61	37.800	19,2	65	75	125
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	61	961,9	0,005	195,8	253,7	288
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	46	24,5	0,04	0,3	0,7	2,1
Na <sup>+</sup>	61	62.363	7	46	61,6	73,7
K <sup>+</sup>	61	7.120	4,4	7,8	9,1	11
Mg <sup>+2</sup>	61	872	6,4	18,5	21,9	25,5
Ca <sup>+2</sup>	61	750	15,8	34,9	38,9	42,1



**Figura 4-26: Distribución de los elementos mayoritarios**

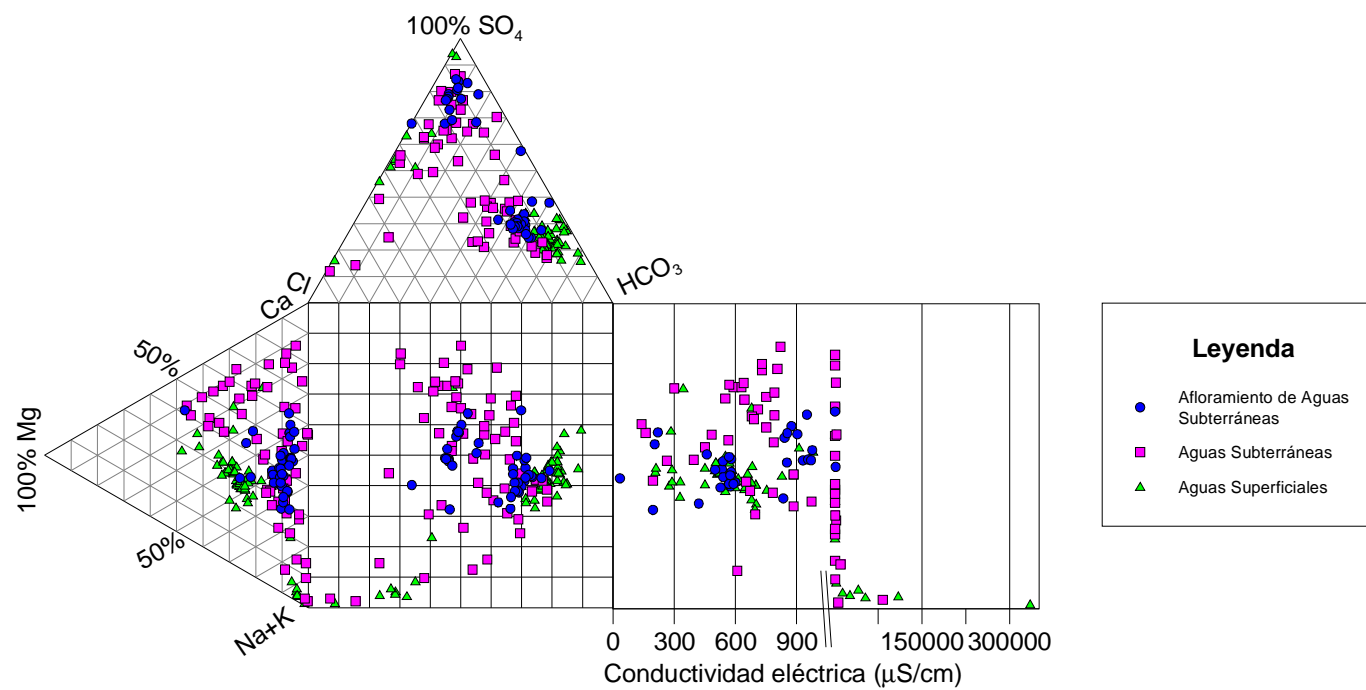
**a). Diagramas de Durov y Piper**

La composición química de las aguas agrupadas de acuerdo al tipo de agua, considerando además los valores de la conductividad eléctrica se presentan en los diagramas de Durov en la Figura 4-27 y Figura 4-28. Las muestras de aguas subterráneas evidencian concentraciones de datos en el área de aguas bicarbonatadas con una composición catiónica intermedia; sulfatadas generalmente entre cálcicas y sódicas, y también aguas cloruradas sódicas; mientras que los afloramientos de aguas subterráneas evidencian composiciones bicarbonatadas y sulfatadas generalmente entre cálcicas y sódicas. Las aguas superficiales presentan composiciones similares que las aguas subterráneas.

En todas las muestras de las aguas se observa que su composición química cambian en relación al incremento de la conductividad eléctrica; es decir, la evolución de la composición aniónica es de aguas bicarbonatadas a sulfatadas y a cloruradas; mientras que la composición catiónica es de aguas cálcicas a magnésicas y a sódicas.

En la Figura 4-28 se presenta también las composiciones químicas del total de muestras agrupadas por tipo de muestra de agua, donde se observa que aquellas tomadas en ríos presentan en la mayoría de los casos composiciones bicarbonatadas en cuanto a los aniones y entre cálcico- magnésicas para los cationes. Las vertientes, manantiales, afloramientos, pozas y pozos presentan composiciones de aguas entre bicarbonatadas y sulfatadas en cuanto a los aniones y entre cálcico-magnésicas y sódicas para los cationes. Las lagunas y punteras se caracterizan por presentar composiciones de aguas bicarbonatadas intermedias y sulfatadas-cloruradas o cloruradas sódicas. Las muestras con los más elevados valores de conductividad eléctrica fueron las muestras en la laguna, poza y punteras ubicadas cerca al salar. Esta dispersión de características indica que existen diferentes composiciones químicas de las muestras, las cuales varían dependiendo del tipo de fuente y del lugar donde fueron tomadas.





**Figura 4-27: Composición química de las aguas en la cuenca Salar del Huasco según tipo de agua.**

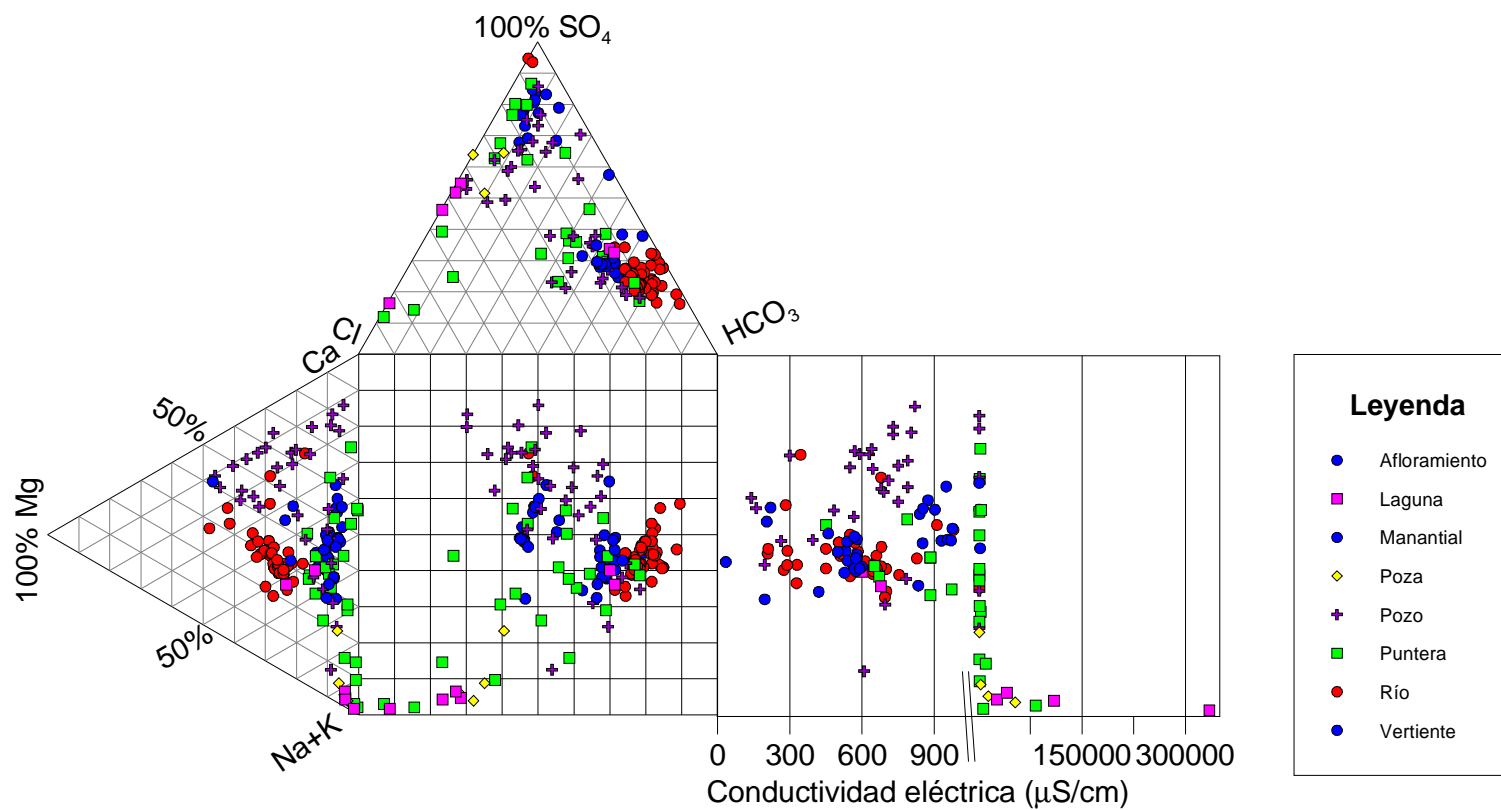


Figura 4-28: Composición química de las aguas en la cuenca Salar del Huasco según tipo de muestra de agua

Para entender la composición de las aguas y sus cambios dentro de la unidad hidrográfica de estudio, se representaron las distintas muestras por sectores (Figura 4-29), cuyas características se presentan a continuación:

**Sector 1: Sector Collacagua, Pampa Porquesa, Pampa Piga y quebrada Chislaca, al norte de la cuenca**

En este sector se tiene agrupaciones de las aguas con concentraciones bicarbonatadas intermedias (Figura 4-30), a excepción de una muestra correspondiente a un manantial ubicado en el sector de Pampa Porquesa, que se caracteriza por tener una mayor proporción de sulfatos y menor de sodio y potasio. En general, estas muestras tienen valores de conductividad bajos (desde 275  $\mu\text{S}/\text{cm}$  hasta 1 160  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ), dentro del rango de aguas dulces, y sus composiciones son concordantes con aguas jóvenes cercanas a las zonas de recarga de la cuenca.

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

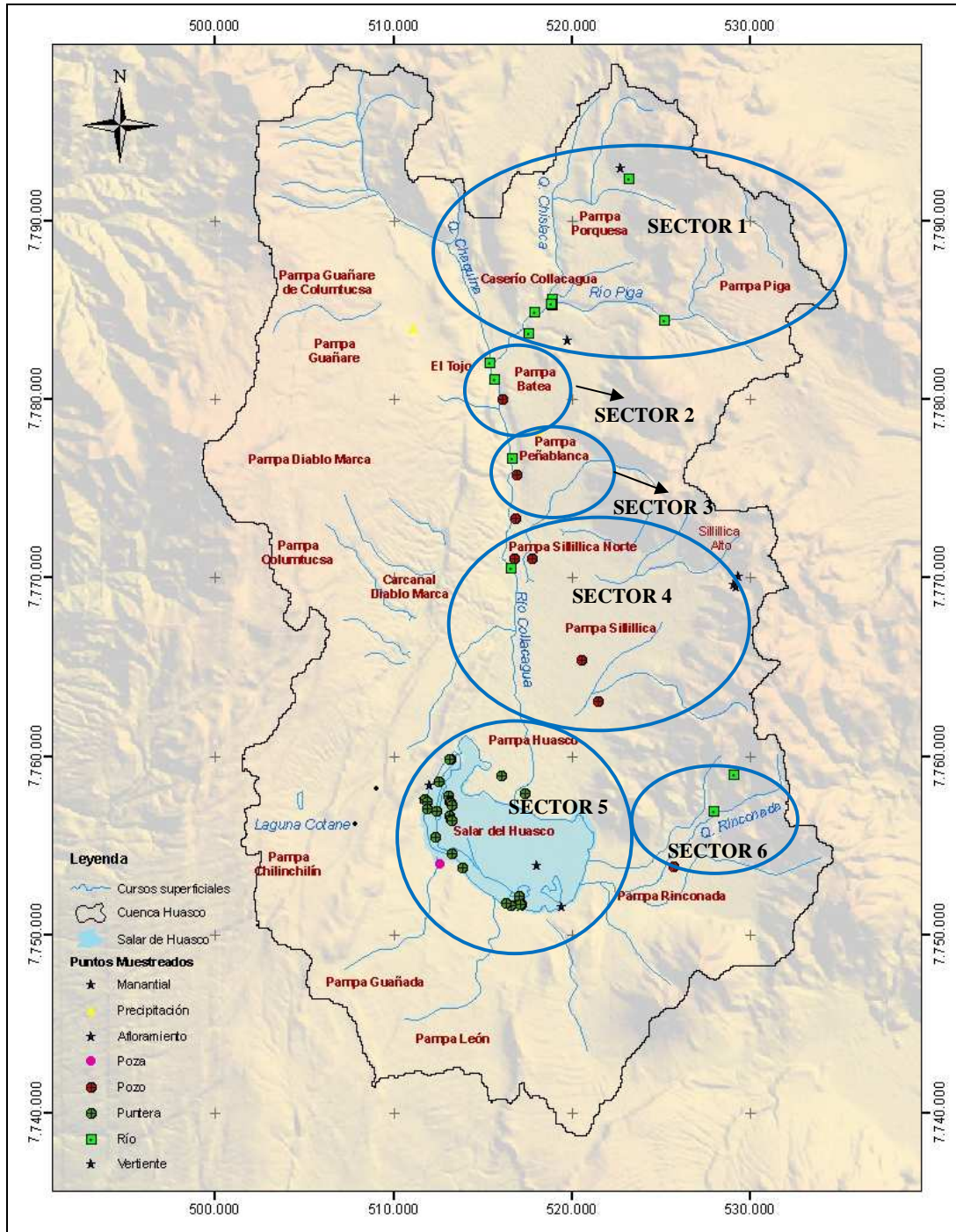
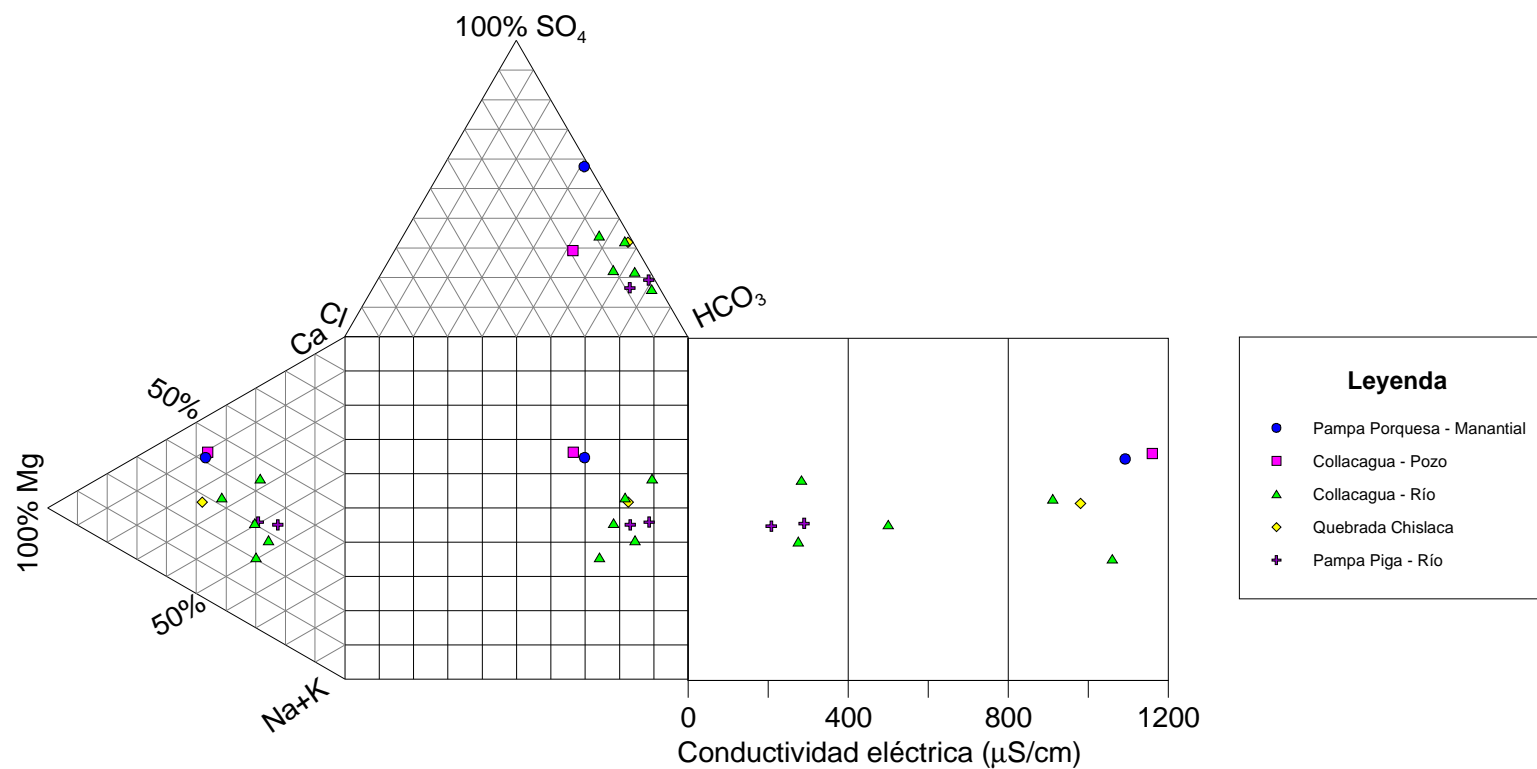


Figura 4-29: Toponimia de la cuenca y puntos de muestreo Salar del Huasco



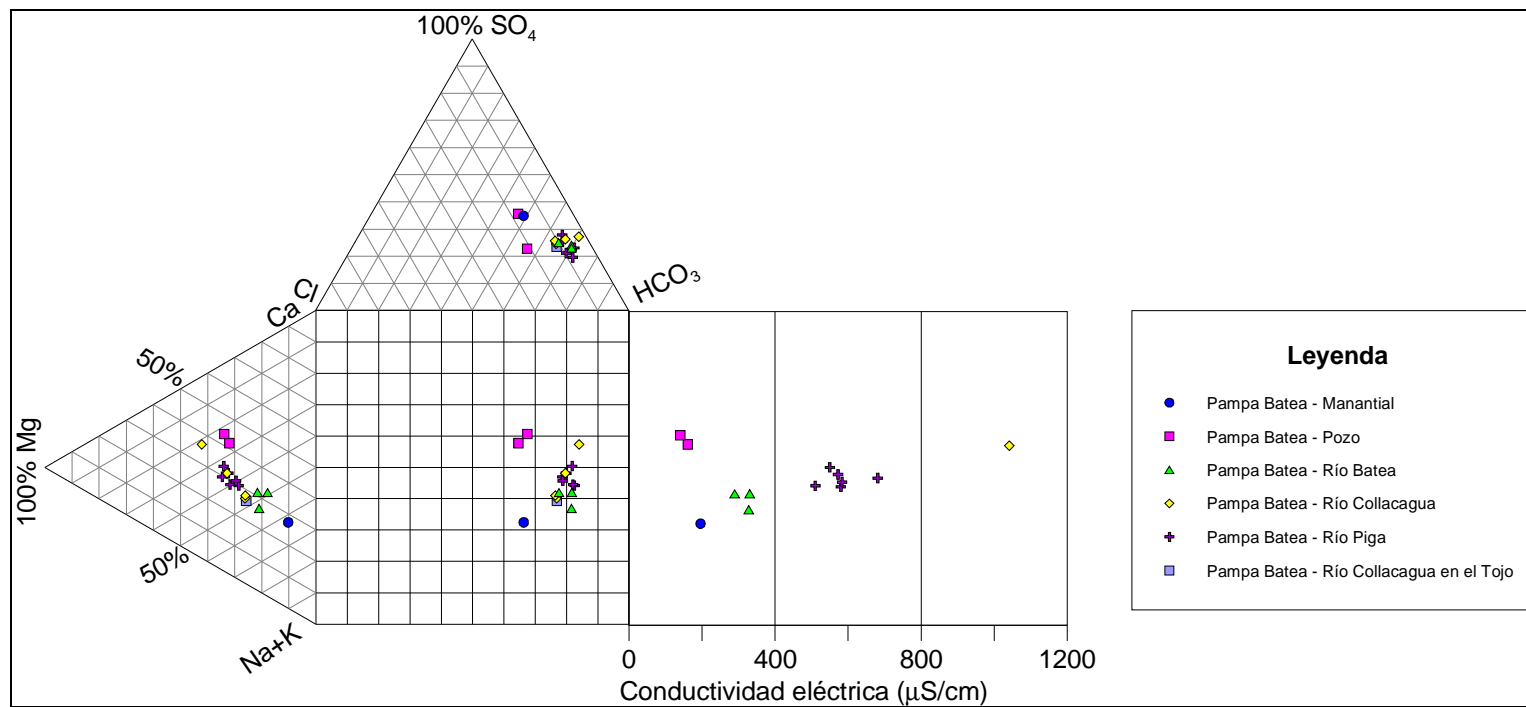
**Figura 4-30: Composición química de muestras en el sector 1: Collacagua, Pampa Porquesa, Pampa Piga, y quebrada Chislaca**

## **Sector 2: Sector Pampa Batea y río Batea**

En este sector las agrupaciones de muestras son similares a las presentadas en el sector anterior, es decir, se caracterizan por tener concentraciones de datos en el área de aguas bicarbonatadas intermedias a sódicas (Figura 4-31). En particular, las muestras tomadas en ríos presentan esta evolución de composiciones, mientras que los dos pozos de esta área presentan aguas bicarbonatadas cálcicas y el manantial de Pampa Batea una composición bicarbonatada sódica. Estas composiciones indican también aguas relativamente jóvenes, aunque algo más maduras por su mayor concentración de sodio. Las conductividades eléctricas de las muestras varían entre 140  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 1.041  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

En relación a los cursos de aguas superficiales, se observa que el río Piga en el sector de Pampa Batea (al este de la cuenca, Figura 4-29) mantiene sus características bicarbonatadas en su composición aniónica, variando entre aguas sódicas a cálcicas en su composición catiónica; incrementándose además los valores de conductividad eléctrica a rangos entre 339  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 1.041  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . El río Batea, entre el caserío Collacagua y El Tojo, se caracteriza por su composición bicarbonatada sódica, con conductividades eléctricas bajas (desde 240  $\mu\text{S}/\text{cm}$  hasta 328  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). A la altura de El Tojo, se observa que este curso mantiene su composición bicarbonatada entre cálcica y sódica, con una conductividad eléctrica de 640  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , la que permanece relativamente constante en su recorrido, en puntos muestreados aguas abajo.

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



**Figura 4-31: Composición química de muestras en el sector 2: Pampa Batea y río Batea**

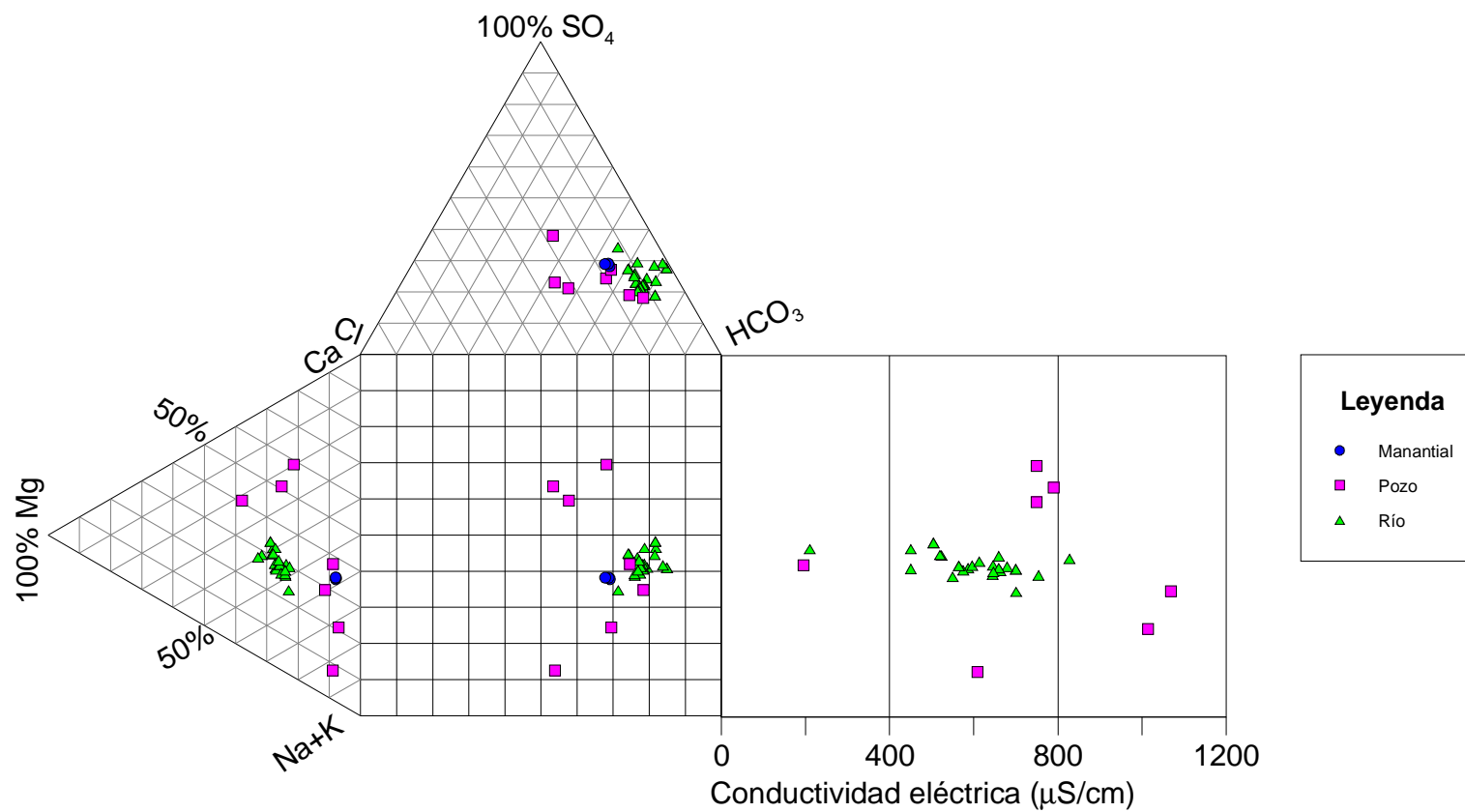
### **Sector 3: Sector Pampa Peña Blanca**

Las aguas superficiales (ríos y manantiales) se caracterizan por presentar composiciones químicas con concentraciones bicarbonatadas entre cálcicas y sódicas, con una mayor proporción de sodio y potasio (Figura 4-32). Esto estaría mostrando que la composición química del río Collacagua sigue manteniéndose en su recorrido en dirección sur. Así también, se evidencia un incremento de la conductividad eléctrica a un valor máximo de 828  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , lo que estaría indicando que las sales disueltas aumentan en la dirección del flujo. Esto se asocia a un aumento en el contenido de los cloruros, a excepción de las aguas del quebrada Chislaca, que estarían vinculadas con un mayor contenido de bicarbonatos, sulfatos y calcio (Acosta, 2004).

Para el caso de las aguas subterráneas (pozos) se observa que coinciden con el grupo químico de las aguas superficiales, sin embargo, presentan una mayor dispersión de composiciones, evidenciándose aguas bicarbonatadas cálcico-magnésicas y aguas intermedias en cuanto a los aniones y sódico-cálcicas o sódicas en cuanto a los cationes (Figura 4-32). Estas muestras corresponden a los pozos J-G, E24, P12, E18 y E19, que presentan profundidades entre 18 y 180 metros y valores de conductividades eléctricas que varían entre 195  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 1.069  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

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





**Figura 4-32: Composición química de muestras en el Sector 3: Pampa Peña Blanca**

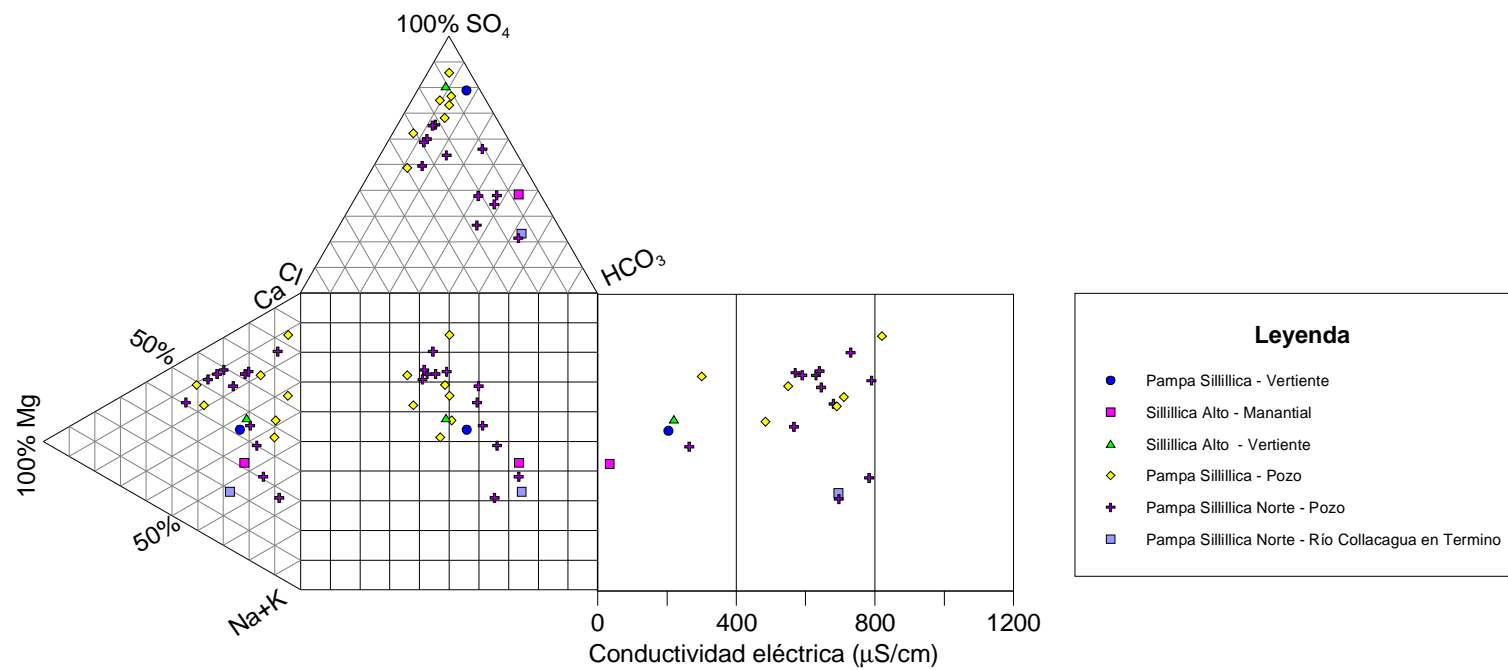
**Sector 4: Sector Pampa Sillillica Norte, Pampa Sillillica y Sillillica Alto**

En el sector de Pampa Sillillica Norte hay agrupaciones variables de aguas (Figura 4-33), con concentraciones bicarbonatadas intermedias, sulfatadas-cálcicas y cálcico-magnésicas. Para el caso de la muestra del río Collacagua en término (HUA.F109), donde las aguas desaparecen ya que se infiltran completamente, se observa que mantiene en su recorrido su composición química bicarbonatada sódica, con una conductividad eléctrica de 695  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

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

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

En el área de Sillillica Alto las dos muestras de vertientes, también sobre los estratovolcanes de la Formación Sillillica, presentan concentraciones de aguas diferentes, una bicarbonatada sódica y la otra sulfatada cálcico-magnésica, con valores de conductividad eléctrica de 33,9  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 220  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .



**Figura 4-33: Composición química de muestras en el Sector 4: Pampa Silillica Norte, Pampa Silillica y Silillica Alto**

### **Sector 5: Sector Pampa Huasco y Salar del Huasco**

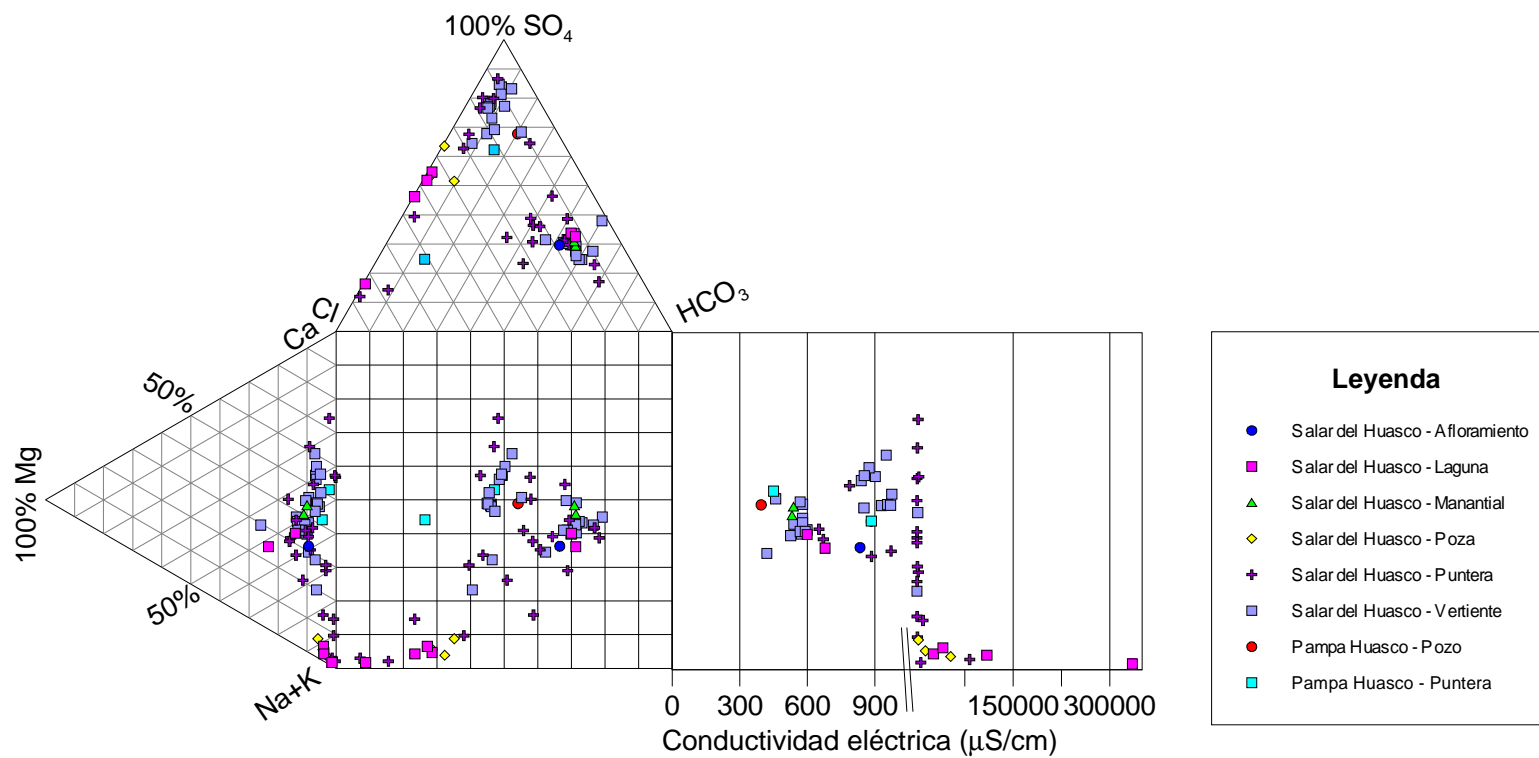
En el sector Pampa Huasco se evidencia la influencia del grupo químico de las aguas del sector Pampa Sillillica (Figura 4-34), en una muestra de una puntera (HUA.T070) ubicada al norte del salar. La composición de esta muestra es de tipo sulfatada cálcico-magnésica y además presenta una conductividad eléctrica de 885  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . En este mismo lugar está también la muestra de otra puntera (HUA.T071), de composición clorurada cálcico-magnésica, debido posiblemente a la influencia del proceso de evaporación en el área cercana al salar.

En el sector del salar propiamente tal, tanto las aguas superficiales como las subterráneas y afloramientos de aguas subterráneas presentan distintas agrupaciones de composiciones, mostrando grupos de tipo: bicarbonatadas intermedias, bicarbonatadas cálcicas, cálcico-sódicas, sulfatadas cálcicas y sódicas, así como cloruradas sódicas. Esto demostraría que las características de las muestras dependerán de su ubicación en el entorno del salar y del origen de sus aguas, así como también del proceso de evaporación que se da en esta zona.

En la Figura 4-35 se muestra la delimitación por sectores del Salar del Huasco para realizar una mejor discusión de los resultados. A continuación se presenta los resultados según tipo de agua.

#### ***Aguas subterráneas***

En la Figura 4-36 se presenta el diagrama de Piper de las muestras de aguas subterráneas (punteras y pozos), en relación a su ubicación en el área del Salar del Huasco. Estas aguas presentan diferentes composiciones, las que se pueden agrupar en los siguientes sectores:



**Figura 4-34: Composición química de muestras en el sector 5: Pampa Huasco y Salar del Huasco**

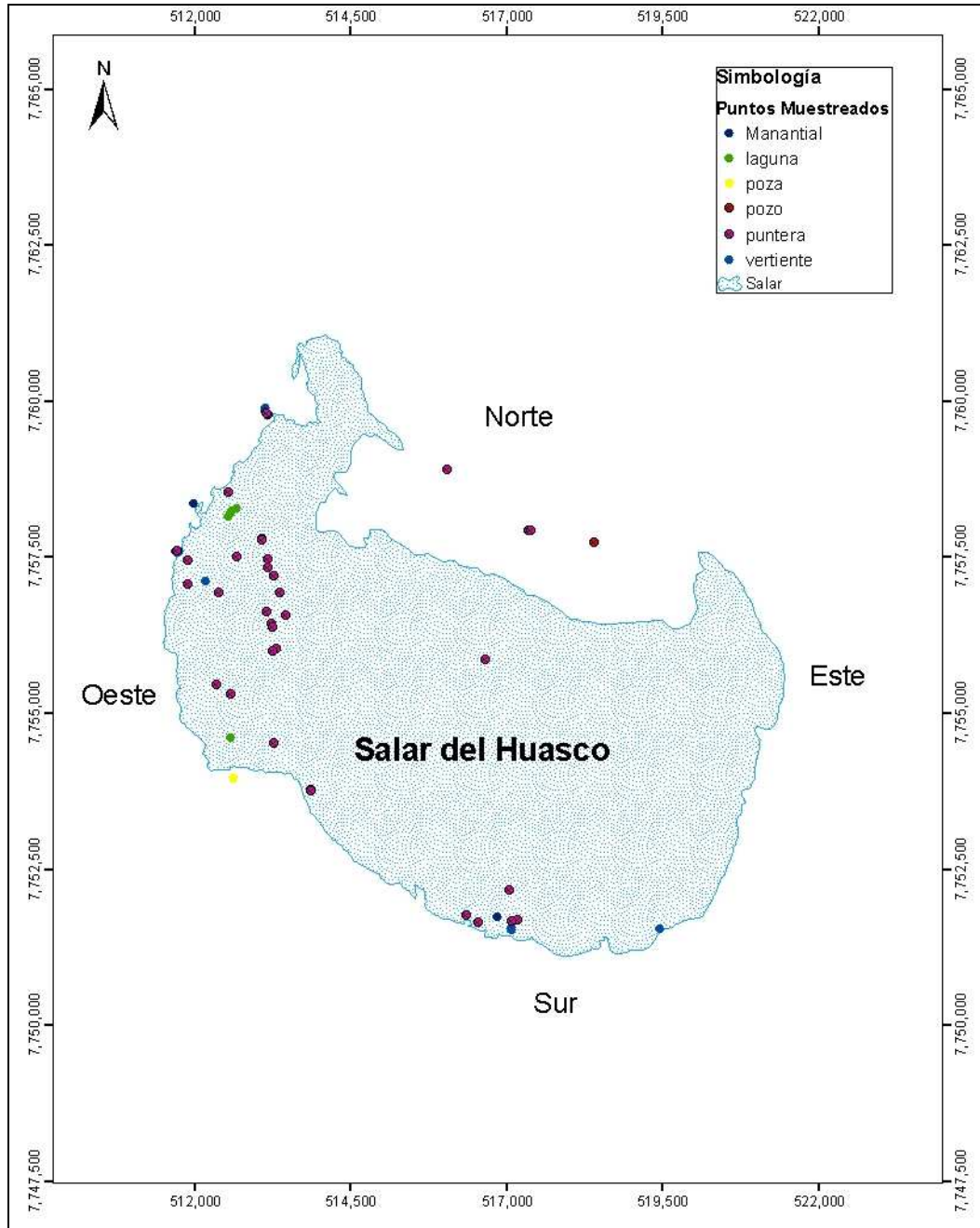
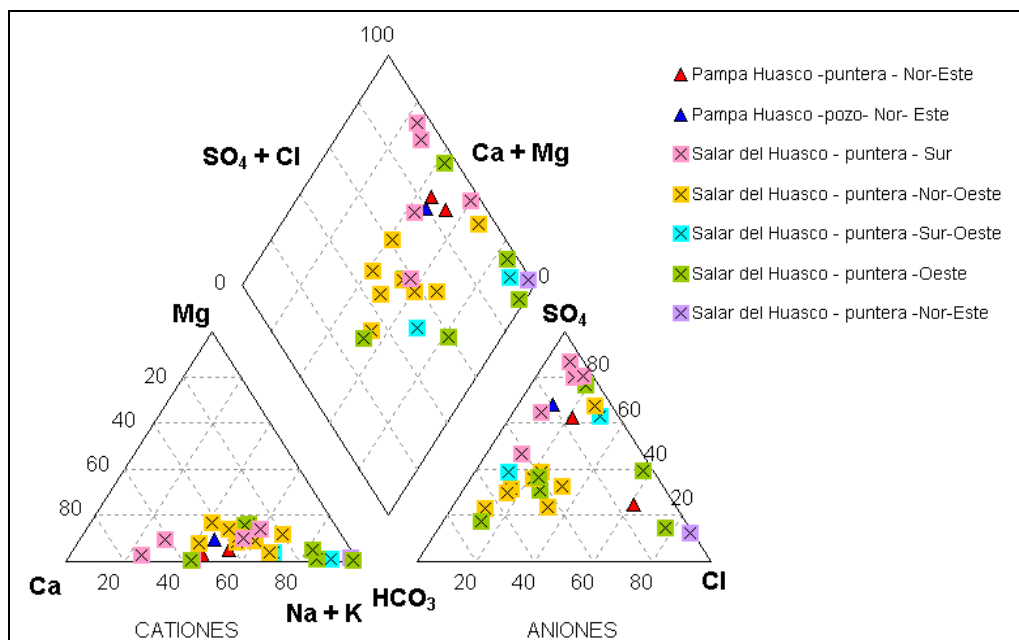


Figura 4-35: Sectores en el Salar del Huasco



**Figura 4-36: Composición química de muestras de aguas subterráneas en el Sector de Pampa Huasco y Salar del Huasco**

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

**Sector oeste:** comprende a las muestras de agua de las punteras P17, P20, P33, P34, P36 y P37 tomadas a profundidades entre 2 y 6 metros. Se tienen aguas de tipo bicarbonatadas intermedias, sulfatadas cálcico-sódicas y cloruradas sódicas. El origen de estas aguas es similar a las que se presentan en el sector Nor-Oeste.

**Sector sur:** considera las muestras de agua de las punteras P8, P38, P39 y P40, tomadas a profundidades de 4 a 6 metros. Las aguas se caracterizan por ser

sulfatadas cálcicas y sódicas, similares a las que se presentan en el sector este de la cuenca, como en Pampa Sillillica Norte, Pampa Sillillica y Sillillica Alto.

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

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

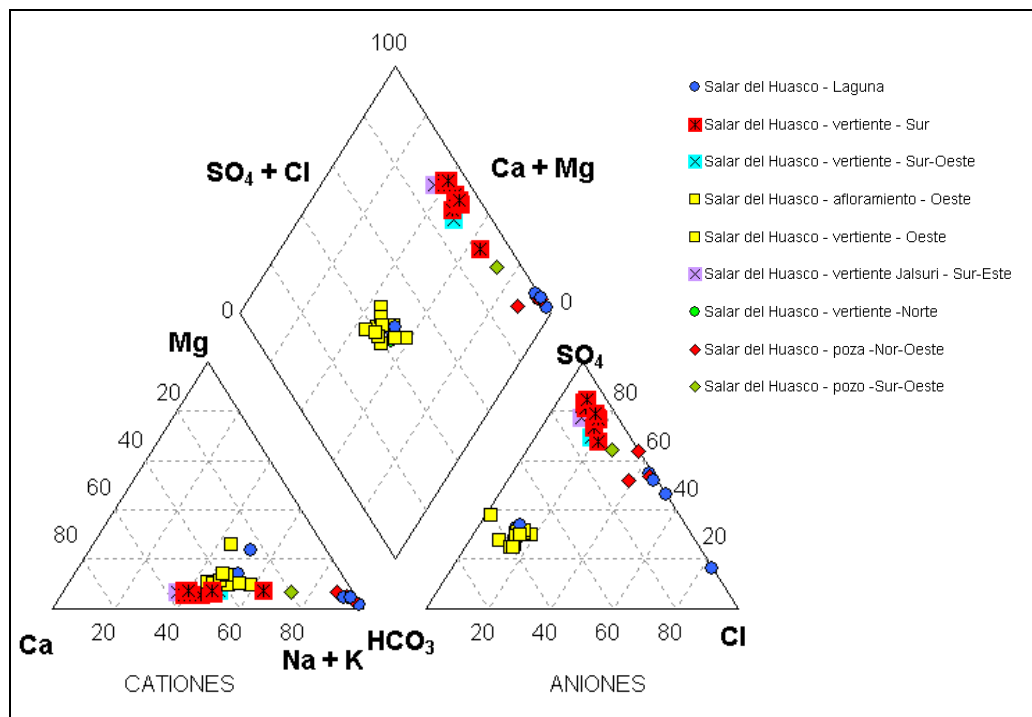
Es importante señalar que las muestras de todas las punteras presentan conductividades eléctricas altas, entre 450  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 82 700  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , debido a su ubicación en el entorno del salar, sometidas a una intensa evaporación.

#### ***Aguas superficiales y Afloramientos de Aguas Subterráneas***

Las aguas superficiales y afloramientos de aguas subterráneas en el entorno del salar se presentan en la Figura 4-37. Los diferentes tipos de aguas presentan agrupaciones marcadas, como se describe a continuación:

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





**Figura 4-37: Composición química de muestras de aguas superficiales y afloramientos de aguas subterráneas en el sector de Pampa Huasco y Salar del Huasco**

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

El otro grupo comprende a las muestras de vertientes o manantiales ubicados al oeste y norte del salar, donde las vertientes principales al oeste corresponden a las vertientes Huasco Norte y Ermitaño. Estas aguas presentan composiciones químicas de tipo bicarbonatadas cálcicas y cálcico-magnésicas y bicarbonatadas sódicas, similares a las aguas que se tienen en el sector norte de la cuenca, las que estarían influenciadas por la Ignimbrita Huasco. La vertiente ubicada al norte presenta un tipo

de agua sulfatada sódica, por lo que existe la posibilidad de que la zona esté recibiendo aportes desde el este de la cuenca, asociado a unidades volcánicas.

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

### **Sector 6: Sector Pampa Rinconada**

Las dos muestras de aguas superficiales (Figura 4-38), tomadas en la quebrada Rinconada, ubicada al sureste de la cuenca, presentan composiciones sulfatadas cálcicas, influenciadas por las unidades volcánicas del este de la cuenca, tal como se presenta principalmente en los sectores de Pampa Sillillica Norte, Pampa Sillillica y Sillillica Alto. Las conductividades eléctricas de las aguas son bajas, con valores entre 345  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 679  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , y cuyas composiciones son concordantes con aguas jóvenes cercanas a las zonas de recarga de la cuenca.

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

### **Conclusión:**

En los sectores 1, 2 y 3 ubicados en la parte norte de la cuenca predominan las aguas bicarbonatadas cálcicas y bicarbonatadas magnésicas, con baja concentración de iones, propio de las zonas de recarga. No obstante en Pampa Porquesa destaca una muestra sulfatada magnésica, asociada probablemente a los domos dacíticos que allí afloran. A medida que las aguas fluyen aguas abajo por el Río Collacagua, su conductividad eléctrica va aumentando progresivamente hasta el sector 3, debido a que va siendo afectada por evaporación e interactúa con los depósitos por los que fluye. Luego reciben la influencia de las aguas sulfatadas cálcicas que caracterizan al

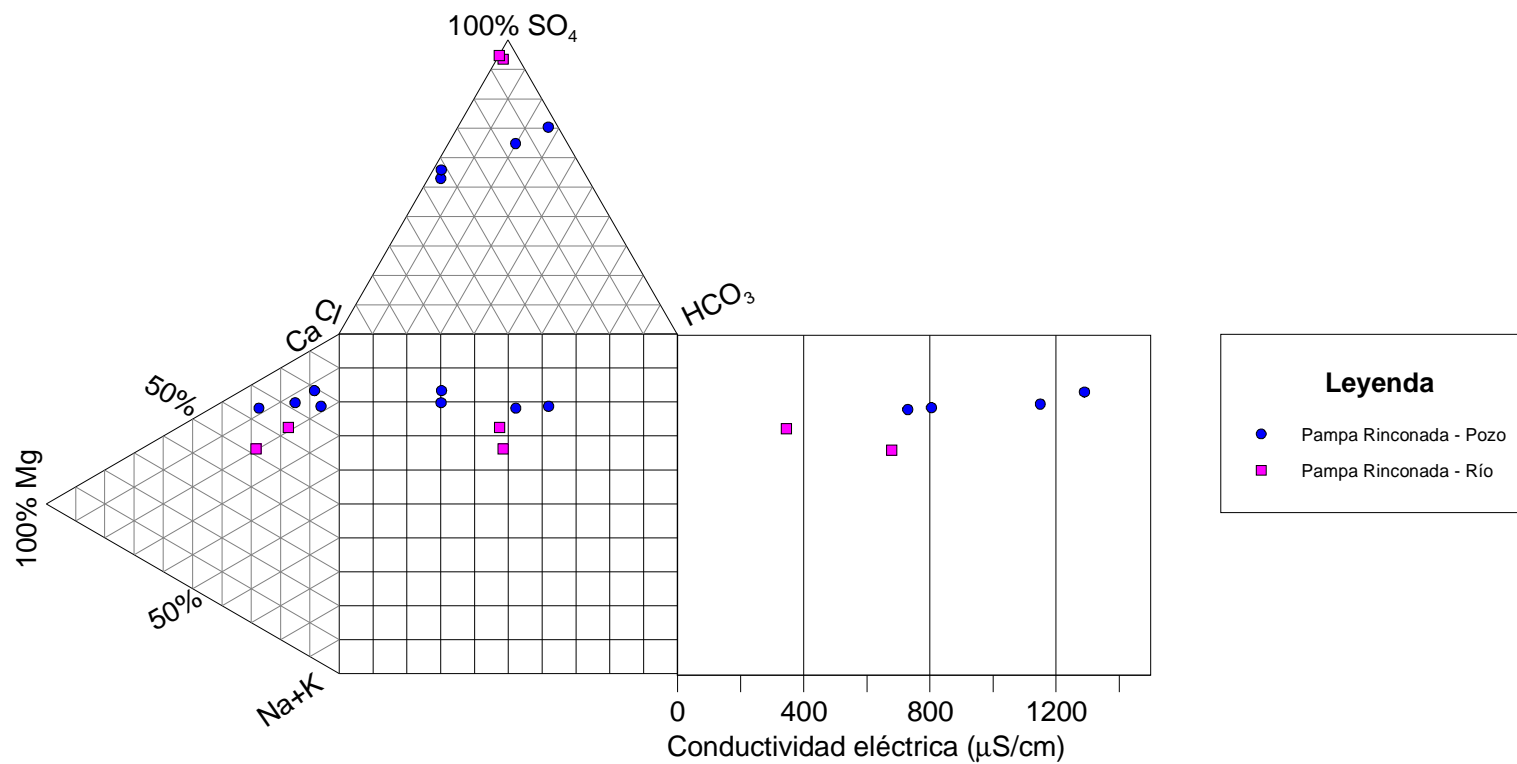


Figura 4-38: Composición química de muestras en el sector 6: Pampa Rinconada

sector 4 debido a su contacto con la Formación Sillillica en que abundan las rocas volcánicas andesíticas. Esta influencia se aprecia con claridad en la composición de las aguas subterráneas. Se genera así una mezcla de aguas, cuya composición final aparece como sulfatada cálcica, pero con una fuerte componente bicarbonatada sódica. Este mismo tipo de agua va aumentando su conductividad a medida que es expuesta a la evaporación y el contacto con la litología. Incluso en las cercanías del salar ya se reconocen indicios de una muestra de agua clorurada sódica muy concentrada. Desde el sector 6 llegan también hasta el salar aportes de aguas sulfatadas cálcicas moderadamente concentradas.

En el sector 5, correspondiente al salar, las aguas pueden preservar rasgos de su composición inicial, pero en niveles de concentración mayores ya que la evaporación aquí es intensa, o bien evolucionan a aguas cloruradas sódicas a medida que los elementos menos solubles van formando sales y precipitando. Destaca en el sector norte del salar la influencia de las aguas bicarbonatadas cálcicas producto de la mezcla de los aportes del Río Collacagua con aguas cloruradas sódicas, o debido a la disolución de niveles evaporíticos antiguos. El sector sureste del salar presenta aguas de composición sulfatada cálcica de elevada salinidad, debido a la influencia de los flujos provenientes de Pampa Rinconada. En la zona central y suroccidental del salar, más alejada de los principales flujos que llegan a él, las aguas tienden a aumentar su conductividad eléctrica y adquieren una composición sulfatada sódica, dada la mezcla de aguas mencionadas anteriormente. Éstas se van concentrando paulatinamente por evaporación hasta que en su concentración relativa de elementos dominan los iones sodio y cloruro, por ser los más solubles.

**b). Diagramas de Stiff**

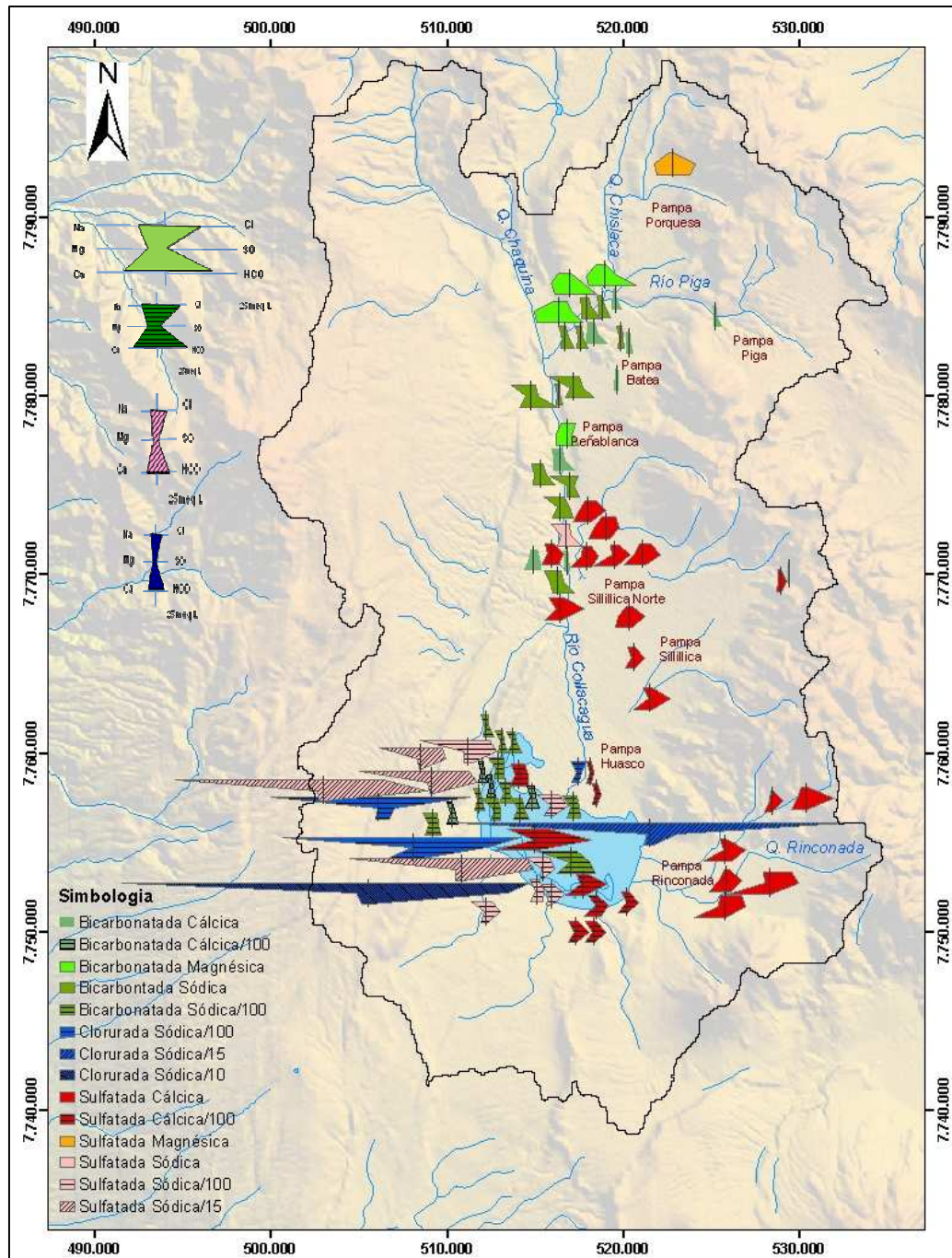
En la Figura 4-39 se presentan los diagramas de Stiff de las muestras de aguas en la cuenca del Salar del Huasco, las que se han clasificado como: a) aguas subterráneas (pozos y punteras), b) afloramientos de aguas subterráneas (vertientes o

manantiales), c) cauces superficiales (ríos) y d) aguas superficiales estancadas (lagunas y pozas).

### ***Aguas subterráneas***

En la Figura 4-40 se presenta el diagrama de stiff para las aguas subterráneas de la cuenca, las cuales corresponden a las muestras de pozos de exploración y bombeo situados sobre las Pampas Batea, Peña Blanca, Sillillica Norte, Sillillica, Rinconada y sobre el lecho del río Collacagua. También se incluyen las punteras que han sido instaladas en el entorno del Salar del Huasco (Collahuasi– GP Consultores).

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



**Figura 4-39: Diagramas de Stiff que representan variaciones en la composición y concentración de los elementos mayoritarios en la cuenca del Salar del Huasco**

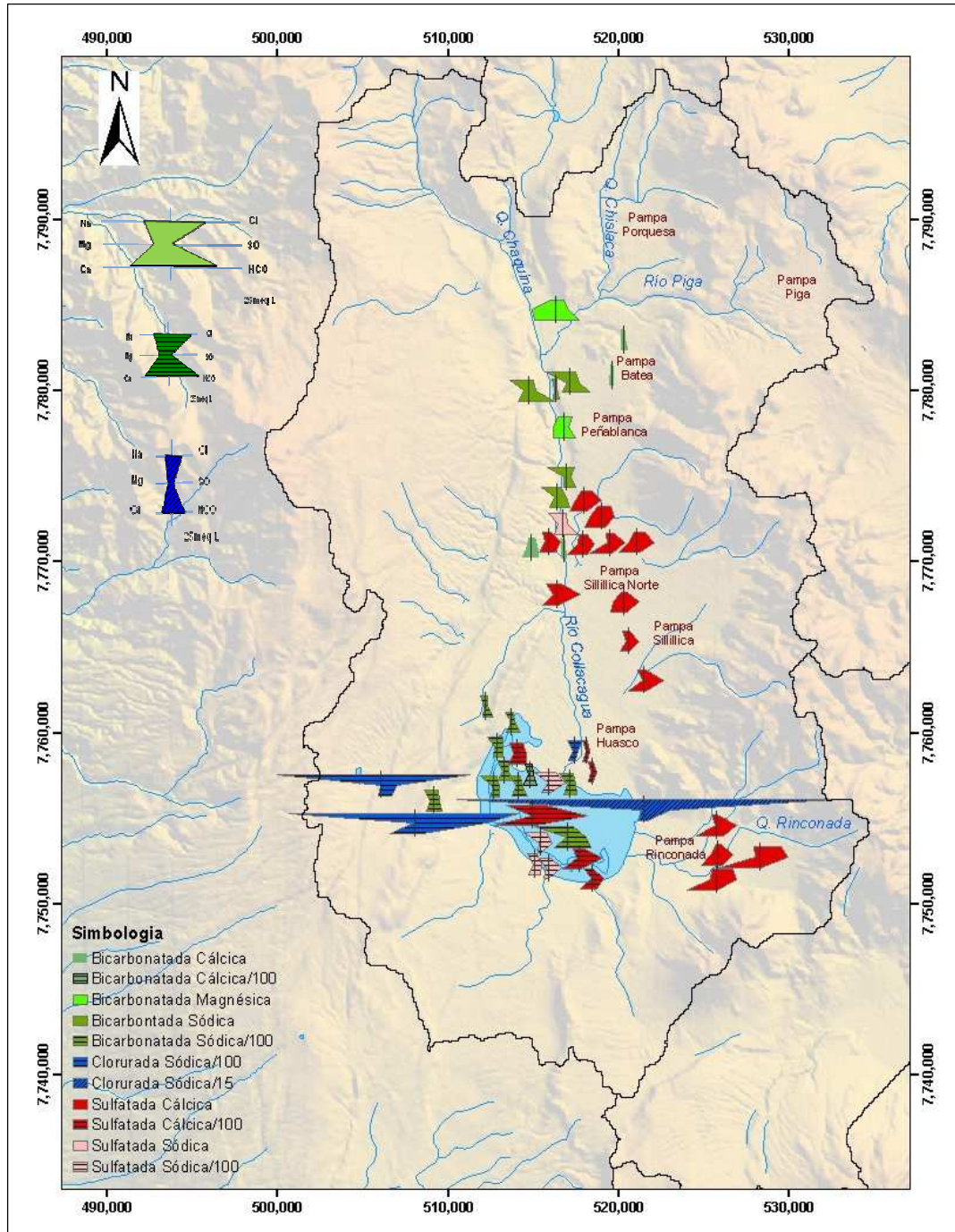


Figura 4-40: Diagrama de Stiff para las muestras de aguas subterráneas

En relación a las muestras de punteras es posible diferenciar dos áreas, la primera situada al oeste del salar, la segunda hacia el sur y norte. Las muestras de agua del sector oeste se caracterizan en su mayoría por ser de tipo bicarbonatadas cálcicas y bicarbonatadas sódicas, similares a las aguas subterráneas y superficiales en la mitad norte de la cuenca, que se encontrarían influenciadas por la unidad hidrogeológica de la Ignimbrita Huasco. Las aguas de los sectores norte y sur presentan en la mayoría de casos composiciones de tipo sulfatadas cálcicas y sulfatadas sódicas, aunque existen algunas muestras de tipo bicarbonatadas sódicas y cloruradas sódicas, cuya influencia sería de las unidades volcánicas del este de la cuenca y de la evaporación en su evolución química.

#### ***Afloramientos de aguas subterráneas***

En la Figura 4-41 se presenta el diagrama de stiff para las muestras tomadas en afloramientos de aguas subterráneas.

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

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



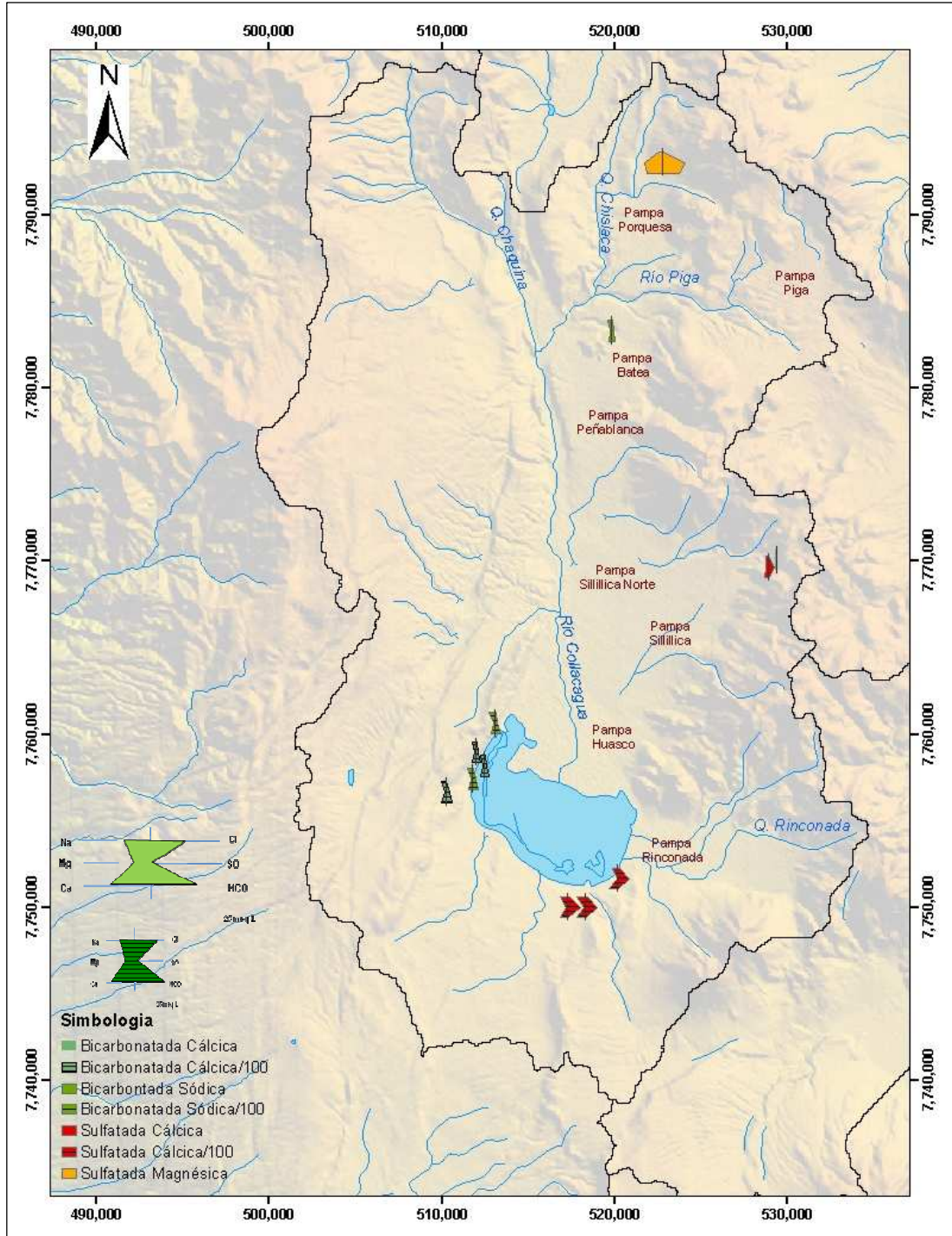


Figura 4-41: Diagrama de Stiff para las muestras de afloramientos de aguas subterráneas

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

### *Cauces superficiales*

En la Figura 4-42 se presenta el diagrama de stiff para las muestras tomadas en los cauces superficiales. En total se cuenta con 14 análisis químicos de cursos superficiales, provenientes de los ríos Piga, Batea, Collacagua y la quebrada Rinconada, a la altura de los sectores de Collacagua y las Pampas Piga, Batea, Peña Blanca, Sillillica Norte y Rinconada. Todas estas muestras de agua son de tipo bicarbonatadas en su composición aniónica, variando entre cálcicas (ríos Piga y Collacagua en Peñablanca), magnésicas (a la altura de la quebrada Chislaca) y sódicas (ríos Batea y Collacagua en Peñablanca) en su composición catiónica. A excepción de las aguas de la quebrada Rinconada que son de tipo sulfatadas cálcicas.

El nacimiento del río Collacagua en “El Tojo” (confluencia de la quebrada Chaquina y el río Piga) se ve marcadamente influenciado por tipos de aguas bicarbonatadas con composiciones catiónicas variables.

- El río Piga presenta composiciones cálcicas, que tienden a incrementarse conforme sigue su recorrido en dirección al oeste. El río Batea, por su parte, aporta aguas de tipo sódicas de medianas concentraciones, hasta su confluencia con el río Collacagua. El desarrollo de estos dos ríos se estaría dando sobre la Ignimbrita Pastillos, caracterizada por depósitos de toba dacítica.

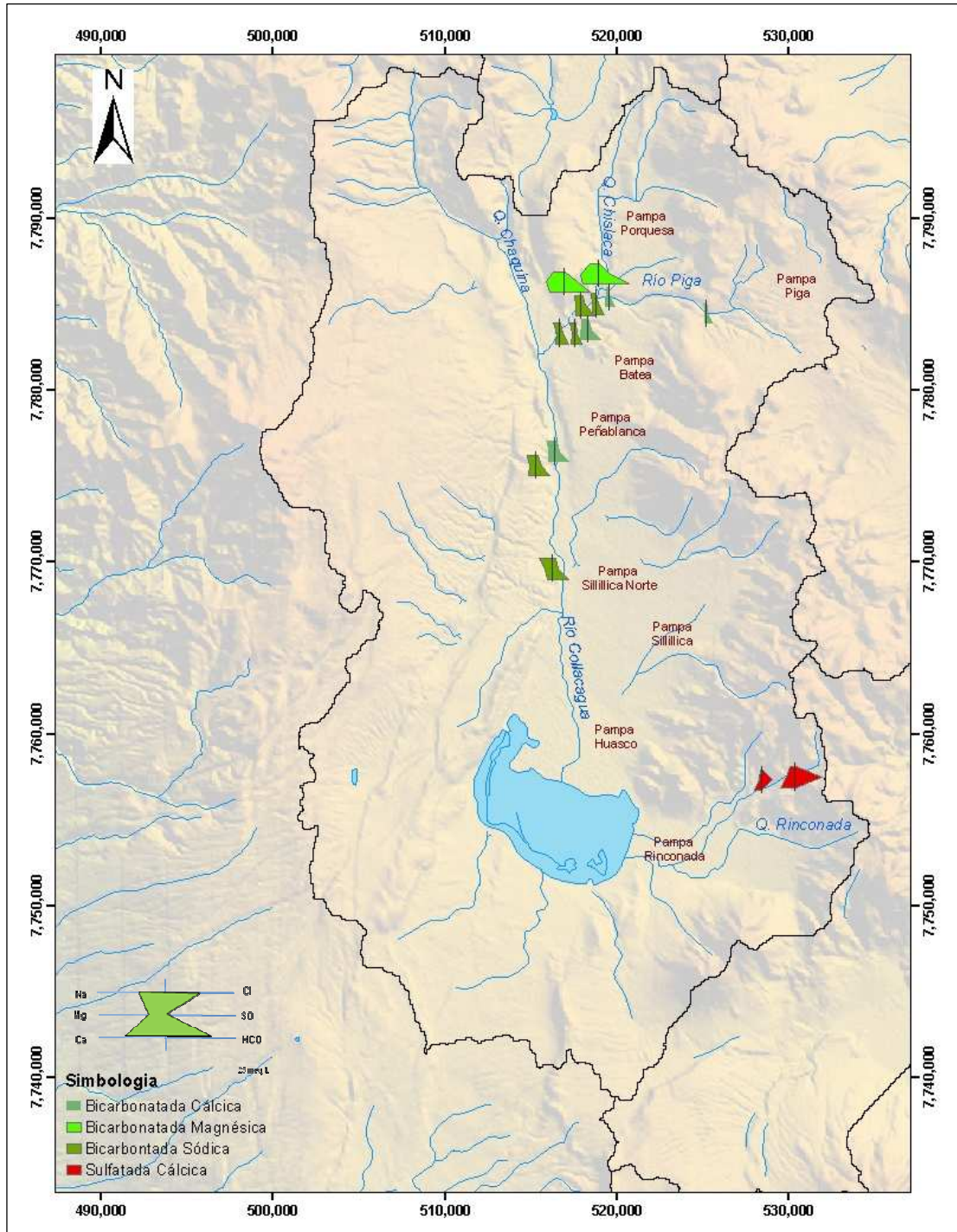


Figura 4-42: Diagrama de Stiff para las muestras de cauces superficiales

- En la confluencia de la quebrada Chislaca con el río Piga se evidencian aguas de tipo magnésicas de altas concentraciones, que estarían fuertemente influenciadas por rocas andesíticas del conjunto de estratovolcanes.

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

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

#### ***Aguas superficiales estancadas***

En la Figura 4-43 se presenta el diagrama de stiff para las muestras tomadas en las aguas superficiales estancadas.

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

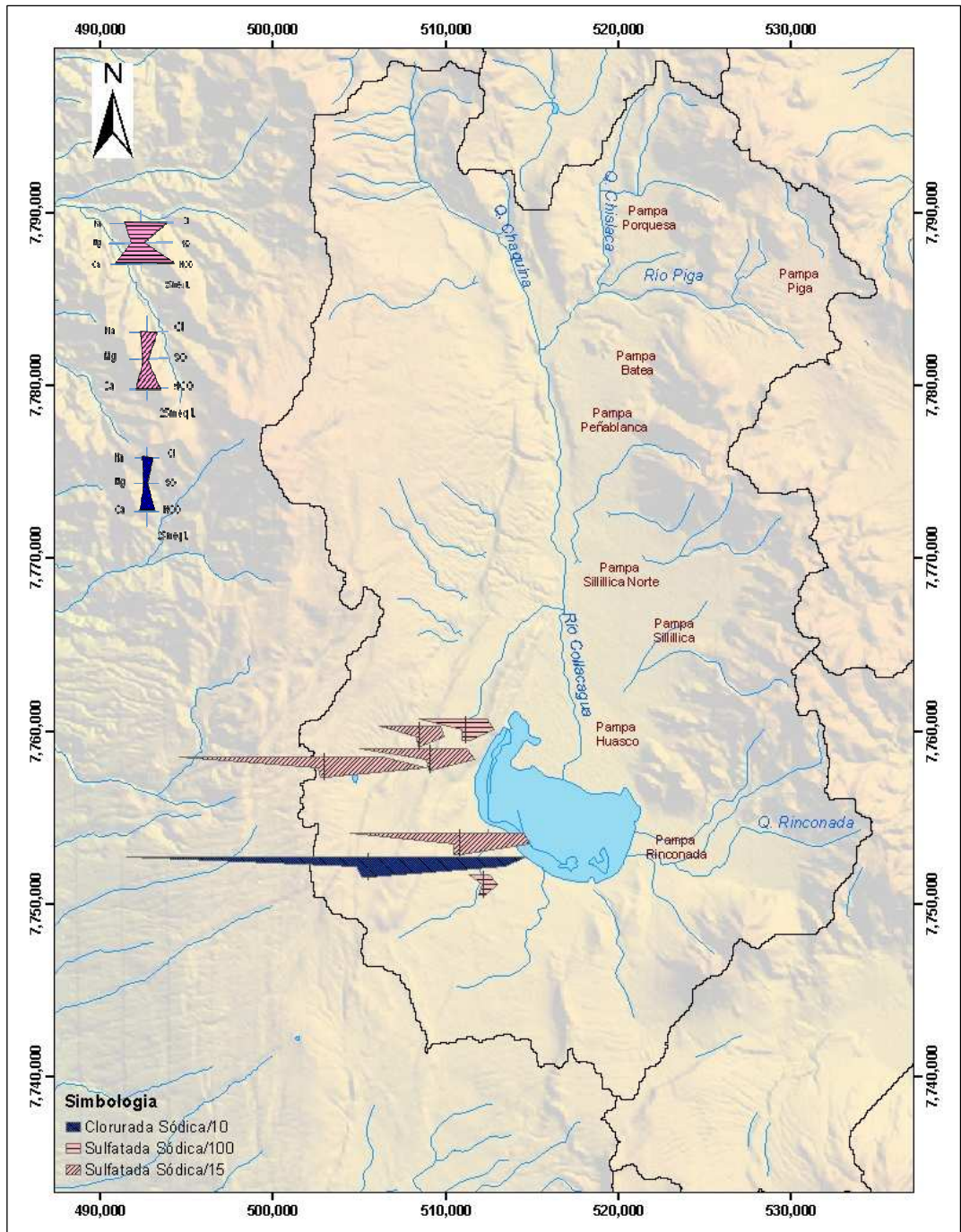


Figura 4-43: Diagrama de Stiff para las muestras de aguas superficiales estancadas

**Conclusión:**

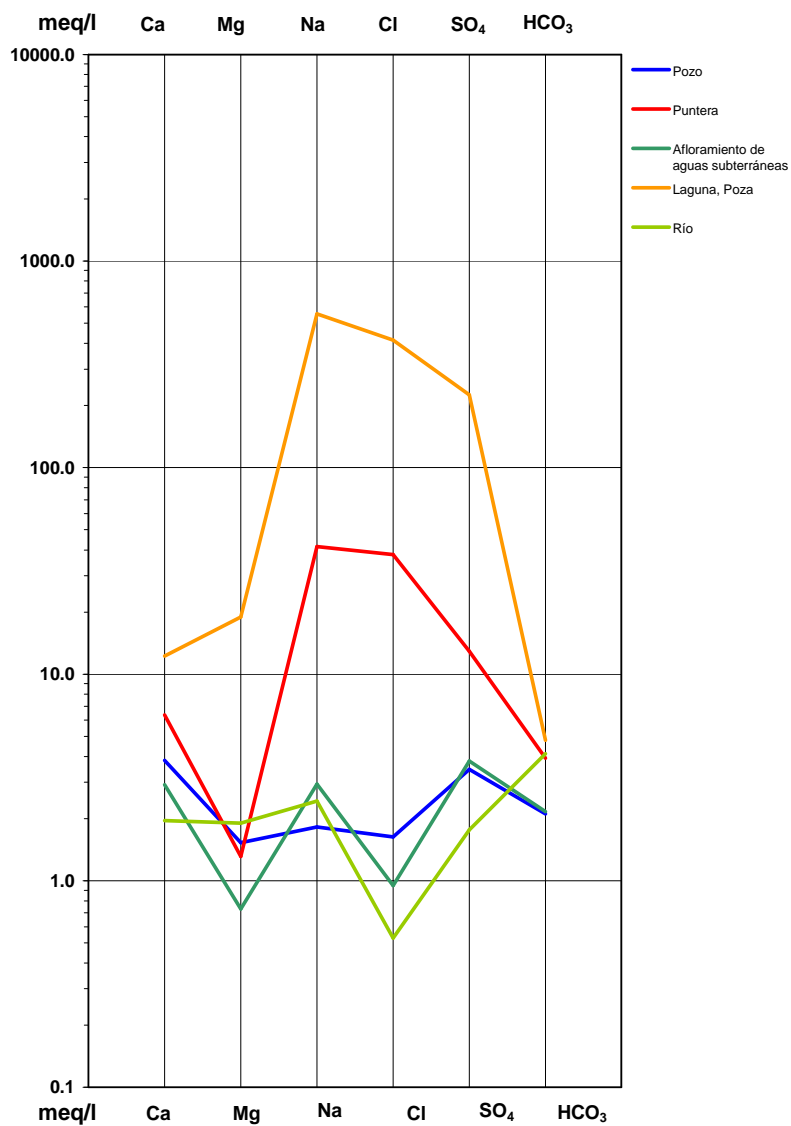
Las aguas subterráneas ubicadas cerca a la quebrada Chislaca y en Pampa Batea se caracterizan por ser de tipo bicarbonatadas cálcicas o magnésicas, similares a los ríos en esta zona, y evolucionan químicamente a aguas de tipo bicarbonatadas sódicas a la altura de Pampa Peña Blanca. Sin embargo, a la altura de Pampa Sillillica Norte la composición de las aguas es de tipo sulfatadas cálcicas, las cuales se mantienen hacia la parte sur de la cuenca en Pampa Sillillica y Pampa Rinconada.

Las muestras de aguas subterráneas ubicadas en las punteras instaladas en el entorno del salar presentan un incremento de las concentraciones de los iones debido al efecto de la evaporación que se da en esta zona. Se presentan aguas de tipo bicarbonatadas cálcicas o sódicas en la parte oeste del salar, similares a las aguas subterráneas, afloramientos de aguas subterráneas y superficiales en la mitad norte de la cuenca, y de tipo sulfatadas cálcicas o sódicas, similares a las aguas subterráneas, afloramientos de aguas subterráneas y superficiales del sector este y sur de la cuenca.

**c). Diagramas de Schoeller**

En la Figura 4-44 se presenta el diagrama de Schoeller de los valores promedio de iones mayoritarios de las muestras agrupadas de acuerdo al tipo de agua. Se observa que las muestras correspondientes a lagunas, pozas y punteras ubicadas en el área del salar del Huasco presentan las concentraciones más elevadas de calcio, magnesio, sodio, cloruros, sulfatos y bicarbonatos. Las muestras en pozos, afloramientos de aguas subterráneas y ríos registraron concentraciones de iones similares.

Así también, se evaluó la variabilidad temporal de las aguas de los puntos de muestreos que presentaron por lo menos dos mediciones en distintas fechas. Se catastraron catorce puntos, ubicados en las Pampas Batea, Peña Blanca, Sillillica Norte, Sillillica y en el Salar del Huasco. De estos puntos, tres corresponden a cauces superficiales (ríos), cuatro a afloramientos de aguas subterráneas (vertientes o manantiales) y siete a aguas subterráneas (pozos).



**Figura 4-44: Diagrama de Schoeller de muestras promedio de agua en la cuenca del Salar del Huasco**

### *Aguas subterráneas*

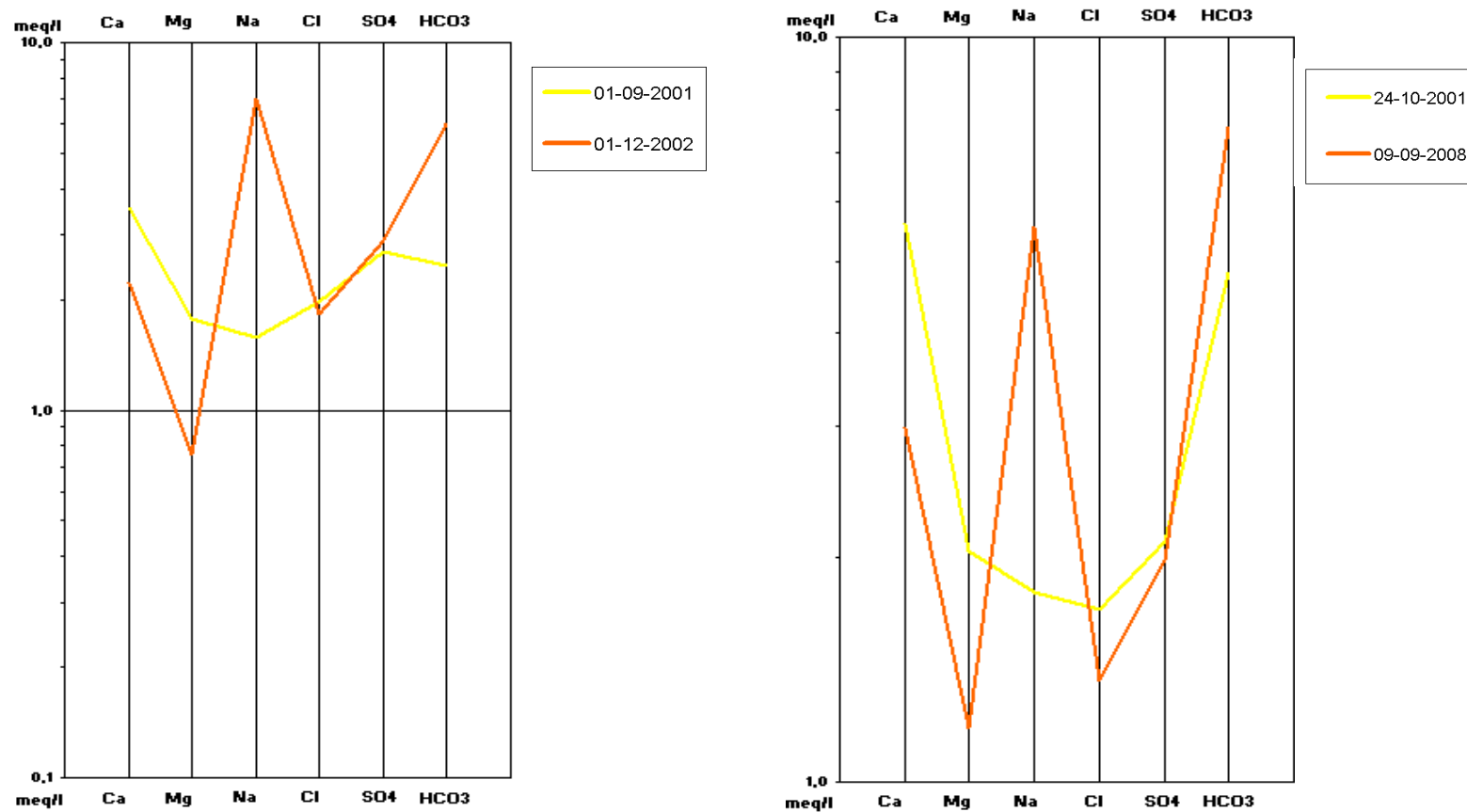
Se tienen seis puntos de muestreo de pozos ubicados en la Pampa Peña Blanca (HUA.T008 y HUA.T040), Pampa Sillillica Norte (HUA.T021 y HUA.T043) y Pampa Sillillica (HUA.T045 y HUA.T046), así como una muestra de la puntera P8 (HUA.T069) ubicada en el sur del Salar del Huasco.

En el sector de Pampa Peña Blanca se tiene el pozo de producción P12 (HUA.T040) y otro de exploración E19 (HUA.T008), donde se cuenta con dos mediciones en cada uno, realizadas en los años 2001, 2002 y 2008. Se observa para P12 diferencias entre las concentraciones de calcio, magnesio, sodio, cloro y bicarbonato en las dos mediciones realizadas en época seca en diferentes años (2001 y 2008), sin embargo, las más altas concentraciones corresponden al bicarbonato, calcio y sodio, que corresponde a la clasificación de esta agua (Figura 4-45). Al considerar los niveles piezométricos en este pozo no se observaron grandes variaciones en los años de muestreo, atribuyéndose las diferencias encontradas a la profundidad de muestreo, que depende del acuífero atravesado.

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

En el sector de Pampa Sillillica Norte (Figura 4-46) se cuenta con dos mediciones para cada uno de los pozos de exploración E14 (HUA.T021) y E11 (HUA.T043), llevadas a cabo en los años 2001, 2002 y 2008. Se observa para el pozo E14 variaciones de las concentraciones de elementos mayoritarios al inicio y después de la época de lluvias, variando principalmente el calcio, magnesio, sodio y cloruro, manteniéndose las concentraciones de sulfato y bicarbonato. El pozo E11 presenta ligeras variaciones de los elementos bicarbonato, cloruro, sodio y calcio, manteniéndose también en este caso las concentraciones de sulfato durante la época de lluvias. Es importante indicar que las aguas subterráneas en este sector cambian su composición química debido a la influencia de las rocas andesíticas de la Formación Sillillica, al este de la cuenca, caracterizándose por ser aguas de tipo sulfatadas cálcicas, por lo que mantienen su composición aniónica sulfatada durante la época de lluvia y en la época seca.





**Figura 4-45: Diagrama de Schoeller correspondientes a muestras de pozos del sector Pampa Peña Blanca: HUA.T008 (Izquierda) y HUA.T040 (Derecha)**

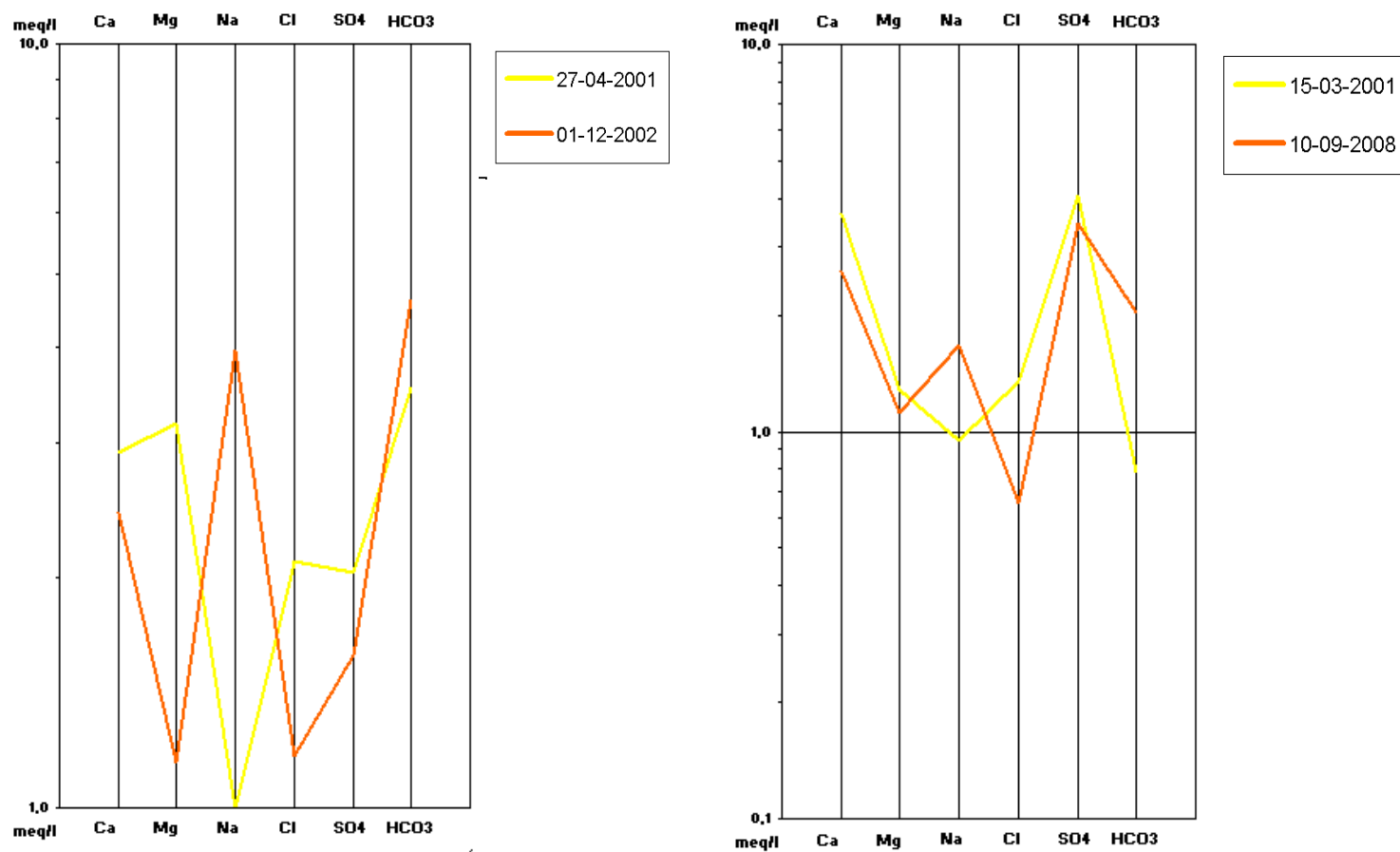


Figura 4-46: Diagrama de Schoeller correspondientes a muestras de pozos del sector Pampa Silillica Norte: HUA.T021 (Izquierda) y HUA.T043 (Derecha)

En el sector de Pampa Sillillica (Figura 4-47) se tiene un pozo de producción P1 (HUA.T045) y uno de exploración E4 (HUA.T046), que cuentan con 3 y 2 mediciones, respectivamente, realizadas en los años 2000 y 2008. Estas fueron tomadas en la época seca, existiendo ligeras variaciones en las concentraciones de cloruro y sodio para el pozo P1 y adicionalmente el magnesio para el pozo E4, manteniéndose los demás elementos constantes y especialmente el sulfato, que presenta la mayor concentración y es característico del tipo de aguas que se presenta en esta zona.

La muestra de agua de la puntera P8 (HUA.T069), ubicada al sur del salar (Figura 4-48), cuenta con dos mediciones en los años 2001 y 2002, efectuadas al inicio y fin de la época de lluvias. Se observa mayores diferencias en la concentración de sulfato y calcio al iniciarse la época de lluvias, lo cual concuerda con la composición química de las aguas de las punteras que se dan en este sector del salar (sulfatadas cálcicas).

#### ***Afloramientos de aguas subterráneas***

Comprende a un manantial (HUAF.136) en Pampa Peña Blanca, además de las vertientes Huasco Lípez (HUA.F031), Huasco Norte (HUA.F016.3) y Ermitaño (HUAF.016.5), ubicadas al sur y oeste del salar. Las variaciones temporales de las muestras de agua se muestran en las Figura 4-49 y Figura 4-50.

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

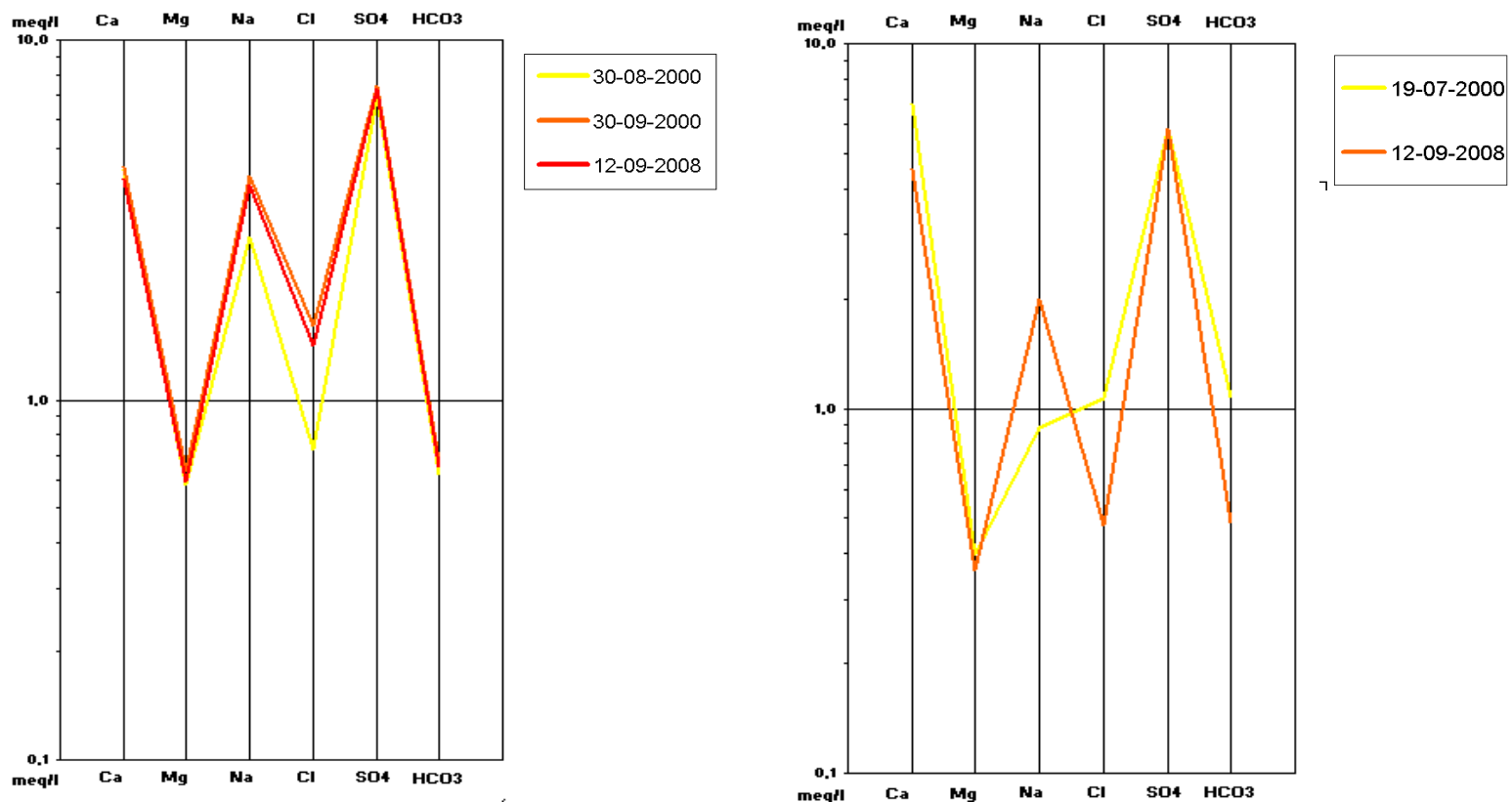


Figura 4-47: Diagrama de Schoeller correspondientes a muestras de pozos en el sector Pampa Sillillica: HUA.T045 (Izquierda) y HUA.T046 (Derecha)

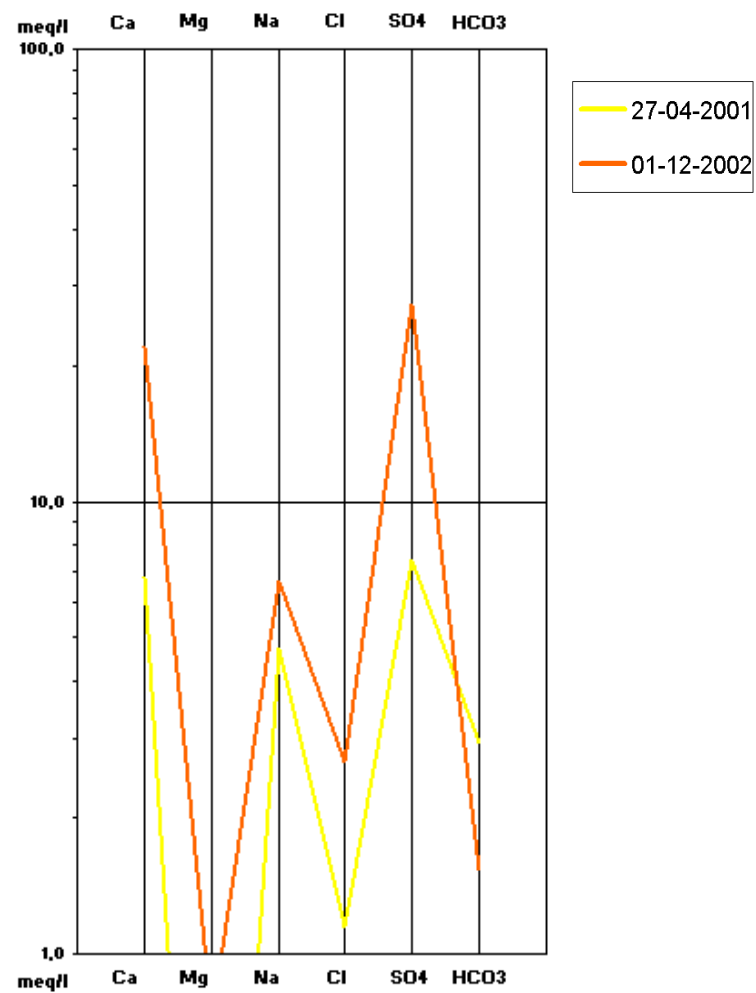
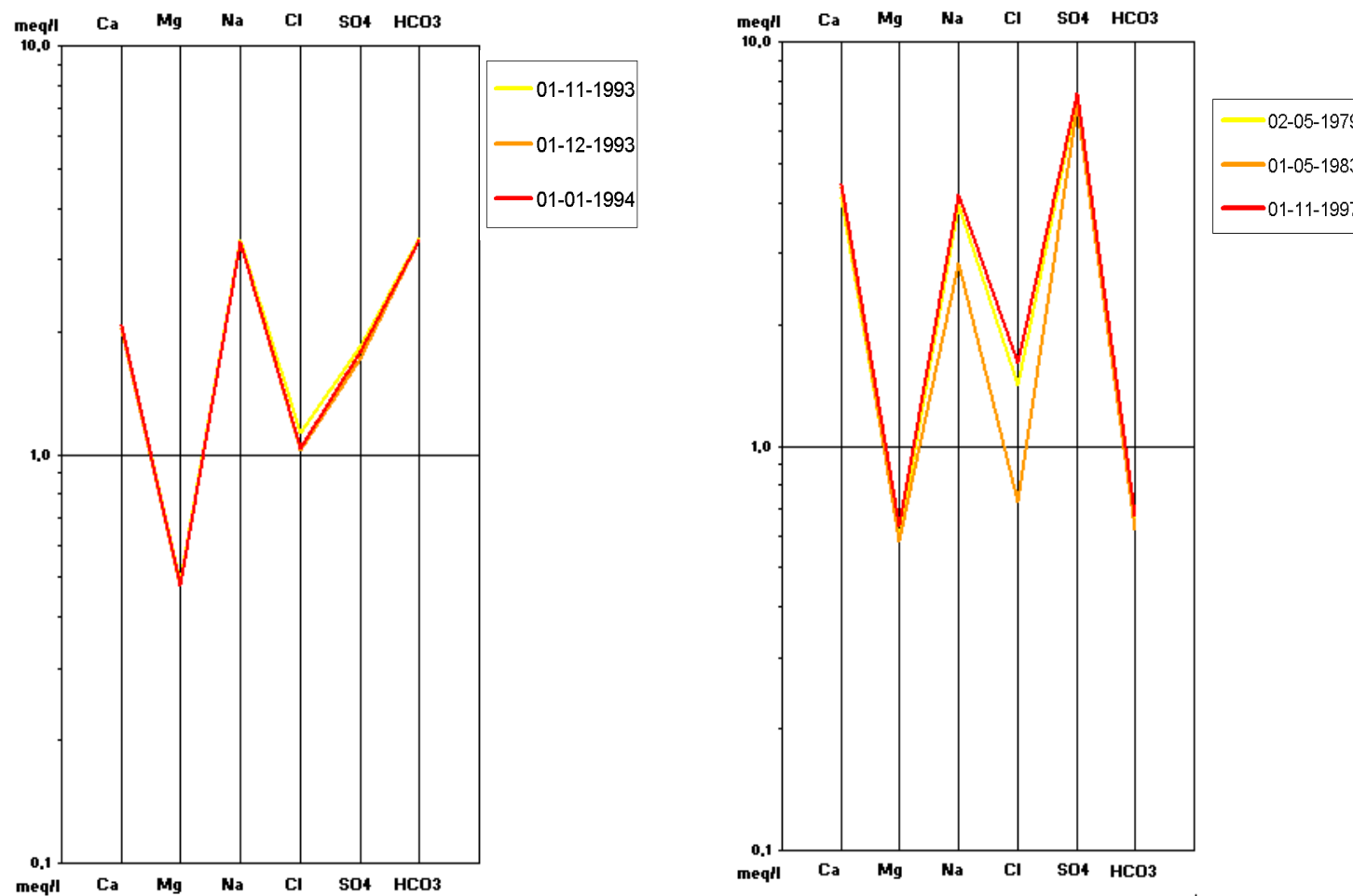


Figura 4-48: Diagrama de Schoeller de correspondiente a muestra de puntera en el Salar del Huasco: HUA.T069



**Figura 4-49: Diagrama de Schoeller correspondientes a muestras de vertientes: HUA.F136 (Izquierda) y HUA.F031 (Derecha)**

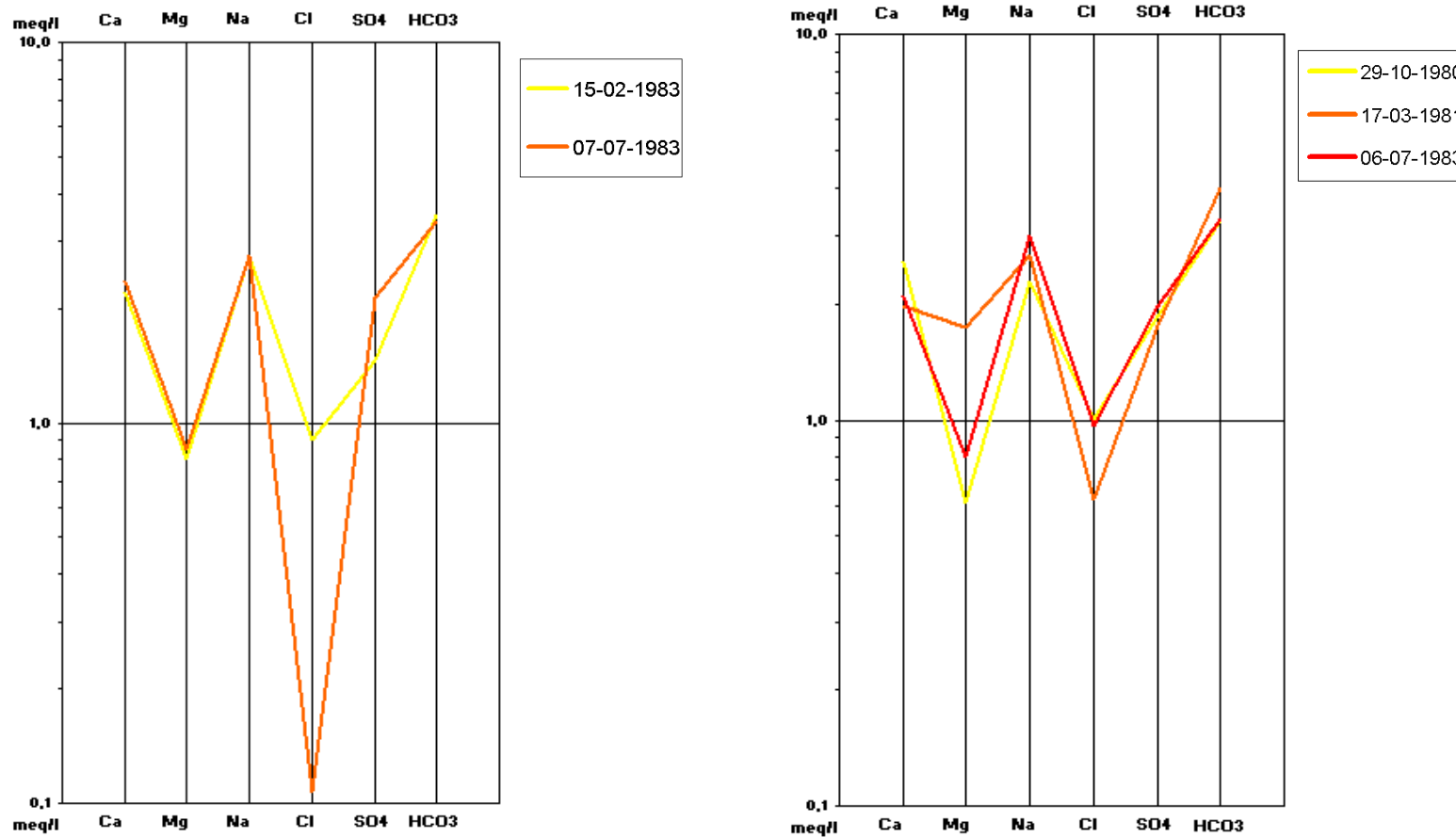


Figura 4-50: Diagrama de Schoeller correspondientes a muestras de vertientes: HUA.F016.3 (Izquierda) y HUA.F016.5 (Derecha)

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

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

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

### ***Cauces superficiales***

Para la discusión se dispone de un punto de muestreo en el río Piga en el sector de Pampa Batea (HUAF.108) y dos puntos del río Collacagua en el sector de Pampa Peña Blanca (HUA.F017 y HUA.F107). Las variaciones de las muestras en el tiempo se presentan en la Figura 4-51.



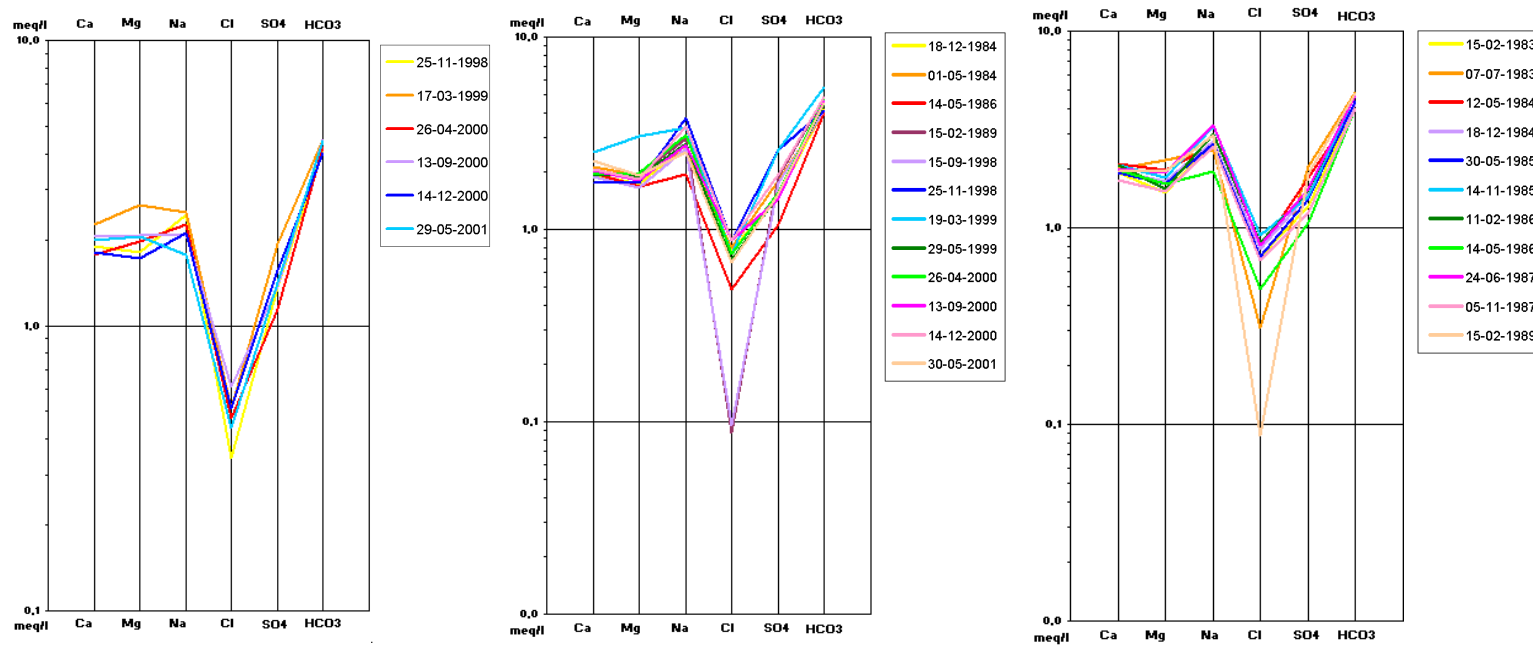


Figura 4-51: Diagrama de Schoeller correspondientes a muestras de ríos: HUA.F.108 (Izquierda), HUA.F107 (Centro) y HUA.F017 (Derecha)

Para el río Piga se tiene 6 mediciones realizadas en los años 1998, 1999, 2000 y 2001, obteniéndose composiciones químicas similares de los elementos mayoritarios tanto en la época de lluvias de diciembre a marzo, como en época seca de abril a noviembre (DGA-PUC, 2010), a excepción de la muestra tomada durante el periodo de lluvias (marzo de 1999) que presenta ligeramente una mayor concentración de calcio, magnesio, bicarbonato y sodio, lo cual concuerda con la clasificación del tipo de agua que presenta este río, es decir, bicarbonatada en su composición aniónica variando entre cálcicas y sódicas en su composición catiónica.

En relación al río Collacagua a la altura de Pampa Peña Blanca se tienen 12 mediciones, realizadas en el punto HUAF.107 en los años 1984, 1986, 1989, 1998, 1999, 2000 y 2001, así como 11 mediciones en el punto HUAF.017 efectuadas en los años 1983, 1984, 1985, 1986, 1987 y 1989. Se observa para los dos puntos que a través del tiempo las concentraciones de cloruros generalmente tienden a disminuir, no importando si corresponde a un periodo de lluvias o no, sin embargo, las concentraciones de bicarbonato, calcio y sodio se mantienen o incrementan ligeramente, lo cual es coherente con el tipo de agua que presentan, es decir, bicarbonatadas cálcicas y sódicas, con mayor proporción de sodio.

### **Conclusión:**

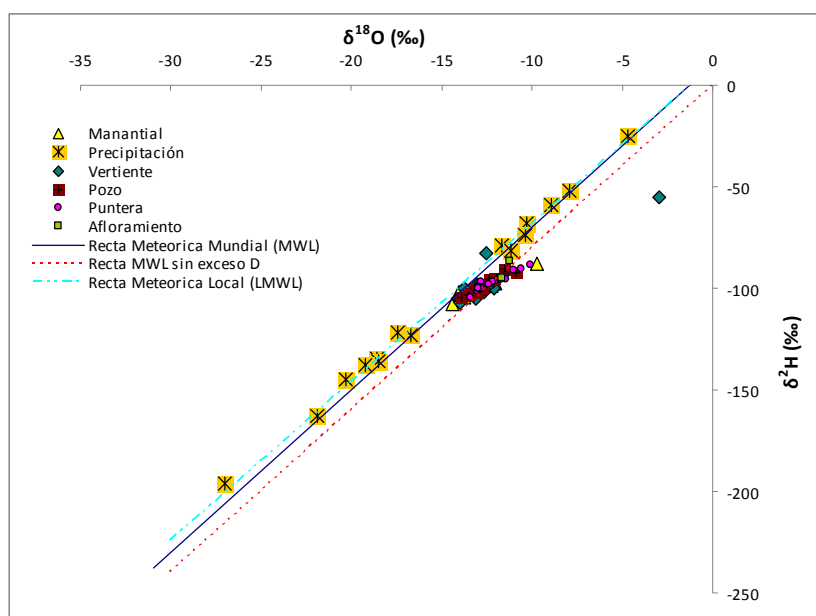
Las muestras correspondientes a cauces superficiales y afloramientos de aguas subterráneas no evidenciaron cambios significativos en su composición química a través del tiempo.

Las aguas subterráneas presentaron incrementos de concentraciones iones mayoritarios al inicio y después de la época de lluvias.

### 4.2.3 Datos Isotópicos y Relación con la Química

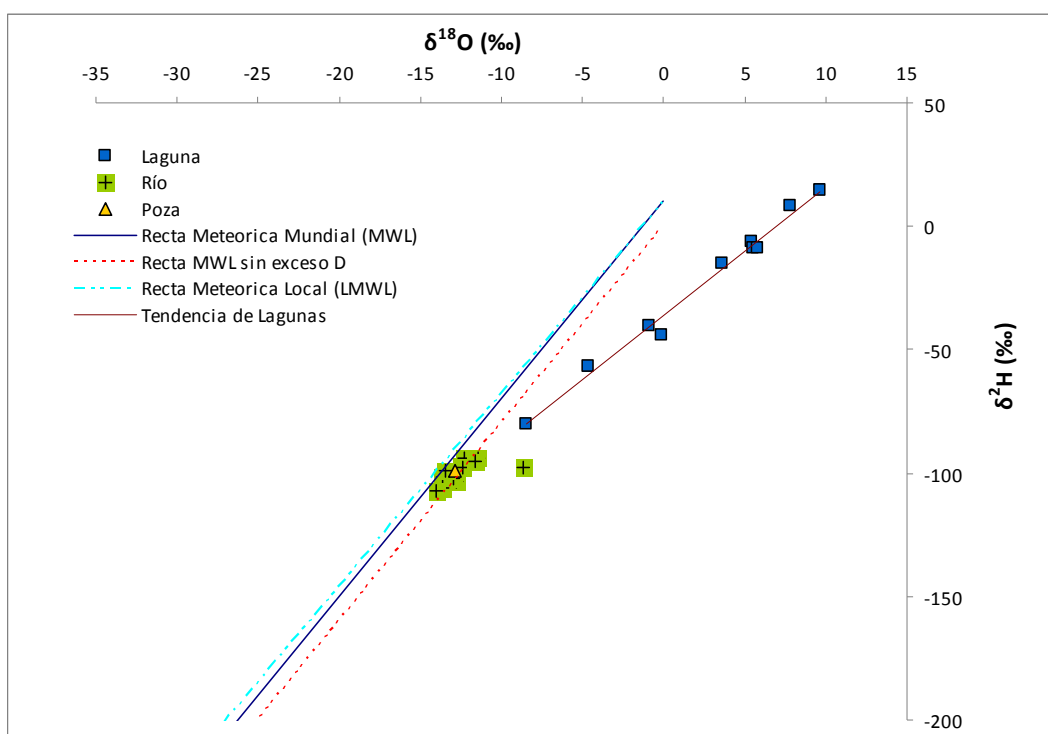
Para el desarrollo de esta sección se ha contado con 128 datos isotópicos de deuterio ( $^2\text{H}$ ) y oxígeno-18 ( $^{18}\text{O}$ ) distribuidos en 88 puntos de la cuenca, cuya ubicación se observa en la Figura 4-23.

En la Figura 4-52 se presenta los valores disponibles de  $\delta^2\text{H}$  y  $\delta^{18}\text{O}$  de las aguas de precipitación, afloramientos de aguas subterráneas (vertiente, manantiales y afloramiento) y aguas subterráneas (pozo y puntera) de la cuenca del Salar del Huasco y su relación con las rectas Recta Meteorica Mundial (MWL), Recta Meteorica Local (LMWL) y Recta Meteorica sin Exceso de Deuterio (MWL sin exceso de deuterio) definidas en la sección 3.2.3. Se puede apreciar que las aguas de la precipitación generalmente se ubican sobre la MWL y LMWL, sin embargo, esta tendencia no se mantiene para las aguas de pozos, punteras, manantiales, vertientes y afloramientos, las que tienden a alejarse de las rectas mencionadas debido probablemente a la evaporación en la zona no saturada de las áreas de recarga. Este proceso enriquece el contenido isotópico de estas aguas, lo que se preserva en las napas.



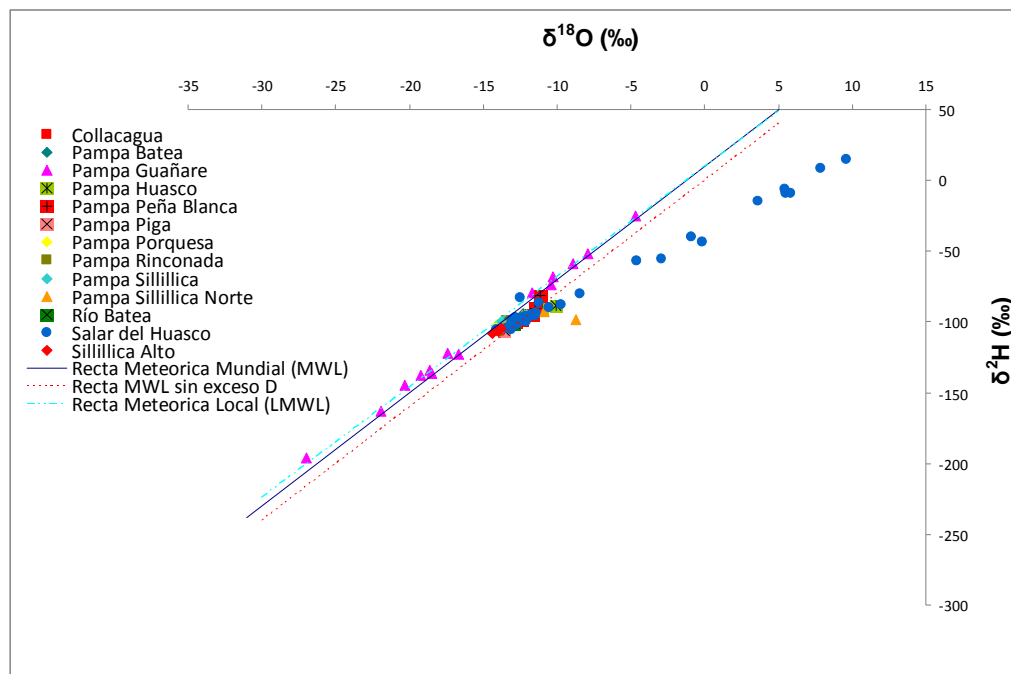
**Figura 4-52: Relación  $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$  de las aguas subterráneas, afloramientos, manantiales, vertientes y precipitación en la cuenca del Salar del Huasco**

En la Figura 4-53 se muestra los valores de  $\delta^2\text{H}$  y  $\delta^{18}\text{O}$  de las aguas superficiales. Se observa que las muestras de ríos, lagunas y pozas tienden a alejarse de las MWL, LMWL y MWL sin exceso de deuterio mucho más que las aguas subterráneas, especialmente aquellas muestras de lagunas ubicadas en el Salar del Huasco. Estas últimas se encuentran enriquecidas en su contenido isotópico producto de la evaporación, y se caracterizan por ser aguas de tipo sulfatadas y cloruradas sódicas. Las muestras menos enriquecidas isotópicamente son las correspondientes a ríos y pozas.



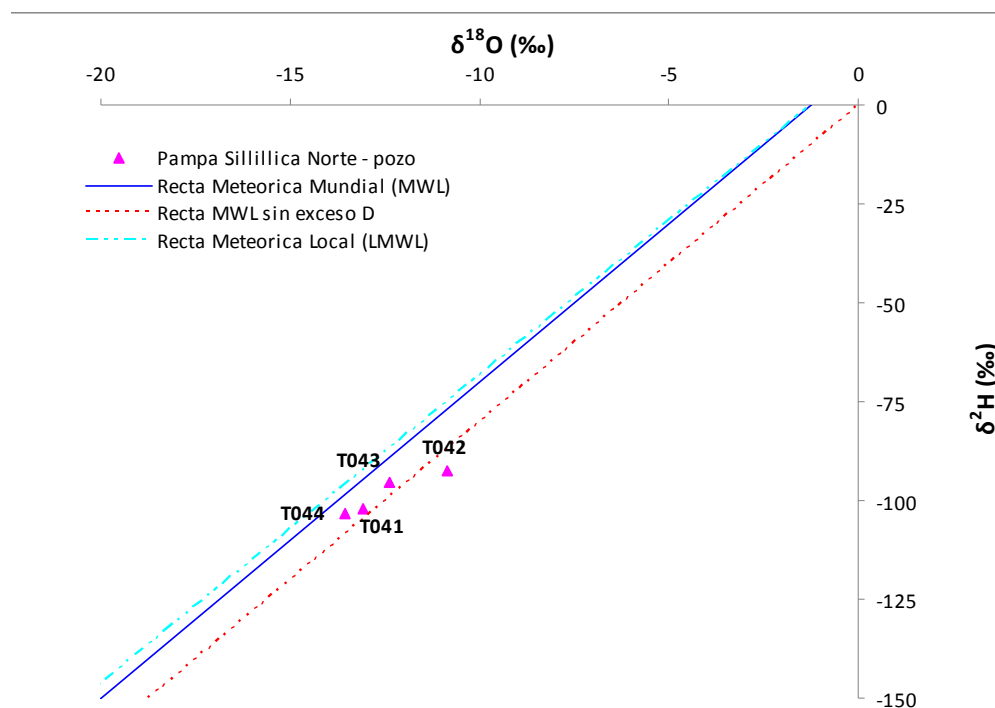
**Figura 4-53: Relación  $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$  de las aguas superficiales en la cuenca del Salar del Huasco**

En la Figura 4-54 se muestra los valores de  $\delta^2\text{H}$  y  $\delta^{18}\text{O}$  distribuidas en toda la cuenca de estudio. Se observa que el enriquecimiento isotópico de las muestras de aguas superficiales y subterráneas por efecto de la evaporación, como se ha mencionado anteriormente, se evidencia principalmente en Pampa Sillillica Norte, Pampa Huasco y Salar del Huasco.



**Figura 4-54: Relación  $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$  de las aguas en los sectores de la cuenca del Salar del Huasco**

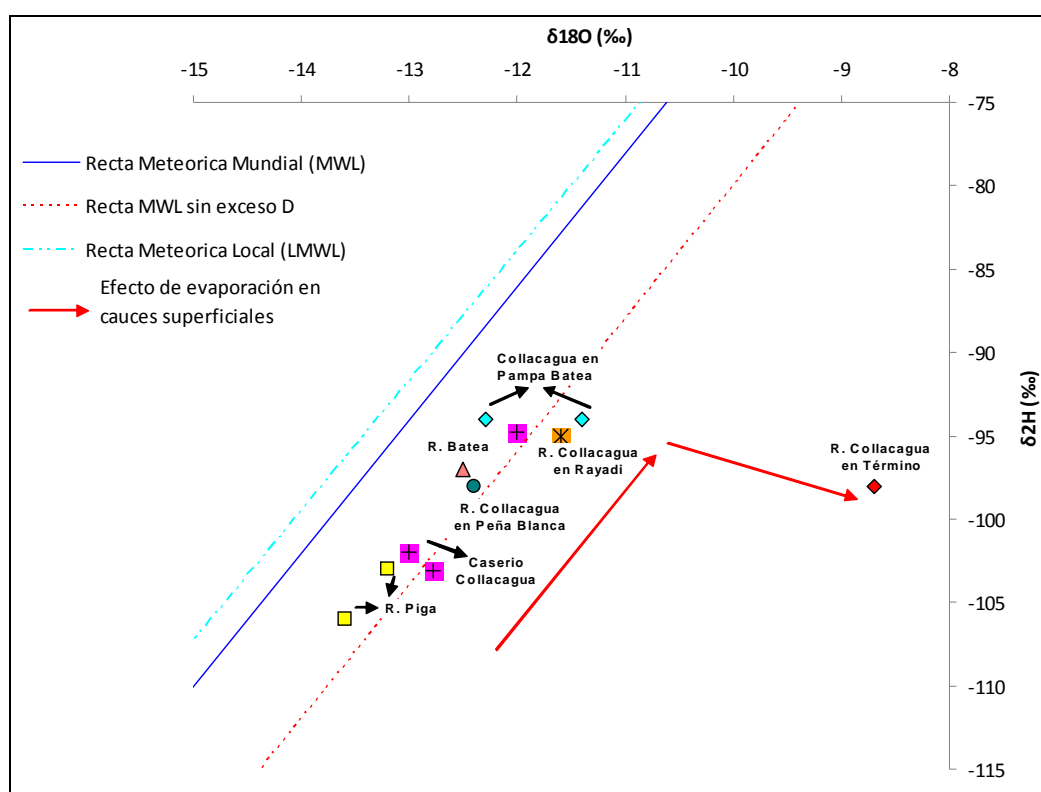
En la Figura 4-55 se observa que en el sector de Pampa Sillillica Norte se tiene una muestra del pozo de exploración E12 (HUA.T042), enriquecida en su composición isotópica y que se ubica en el gráfico fuera de la MWL y la MWL sin exceso de deuterio. El pH de la muestra es de 8,2 y su conductividad eléctrica de 264  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , siendo un agua bicarbonatada cálcica. Su enriquecimiento isotópico estaría dado por efecto de la evaporación que afecta la precipitación y que se estaría preservando en las aguas subterráneas.



**Figura 4-55: Relación  $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$  de las aguas de pozos en el sector Pampa Silillica Norte**

También en este sector se hace evidente el enriquecimiento de la muestra de río de código HUA.F109 (Figura 4-56), correspondiente al río Collacagua en término, de pH igual a 8,2; conductividad eléctrica de 695  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y de tipo de agua bicarbonatada sódica. Para explicar este enriquecimiento isotópico, se ha considerado la evolución isotópica que presentan los cauces superficiales de la mitad norte de la cuenca de estudio. Se observan bajos contenidos isotópicos en las muestras de los ríos Piga y Collacagua a la altura del caserío Collacagua, sin embargo, aguas abajo de este sector los aportes del río Batea no son capaces de justificar por si solos el enriquecimiento isotópico que muestra el río Collacagua a la altura de Pampa Batea, Peña Blanca y menos aún a la latitud de Silillica Norte. La ausencia de otros aportes superficiales permanentes conocidos, indicaría que la evaporación en el cauce podría ser la causa más probable del enriquecimiento isotópico del río Collacagua.

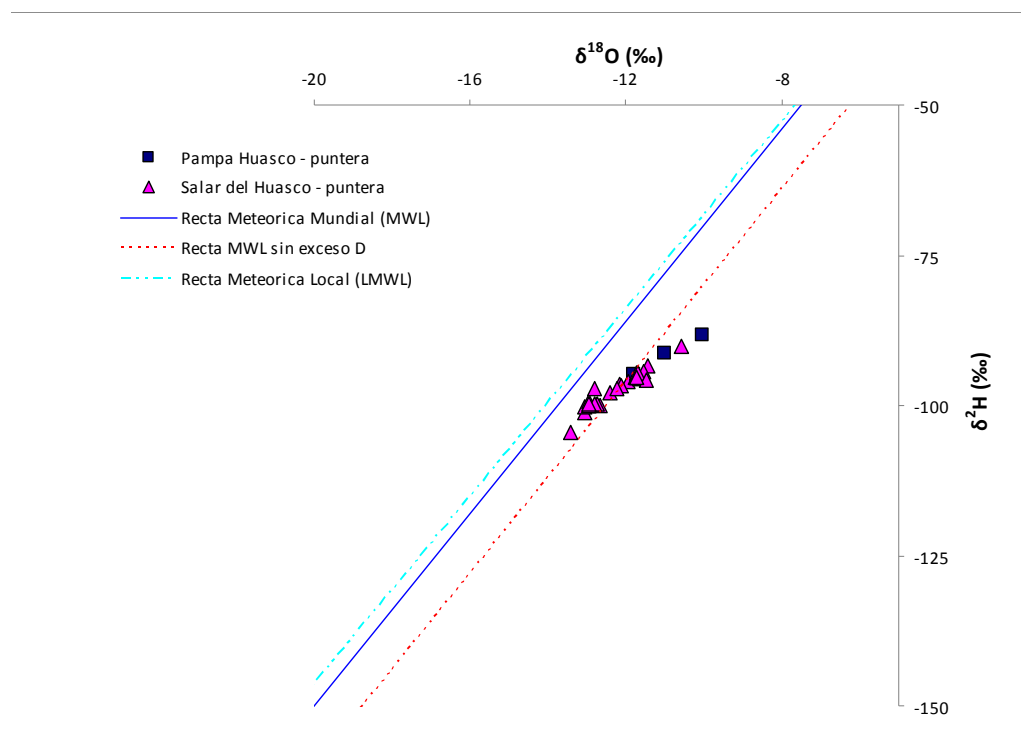
La influencia de aportes afectados por hidrotermalismo, que enriquecen también el contenido isotópico, podría ser otra posible causa para los valores encontrados. Sin embargo, aportes de este origen no han sido identificados en estudios previos de la cuenca.



**Figura 4-56: Relación  $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$  de las aguas de cauces superficiales en la cuenca del Salar del Huasco**

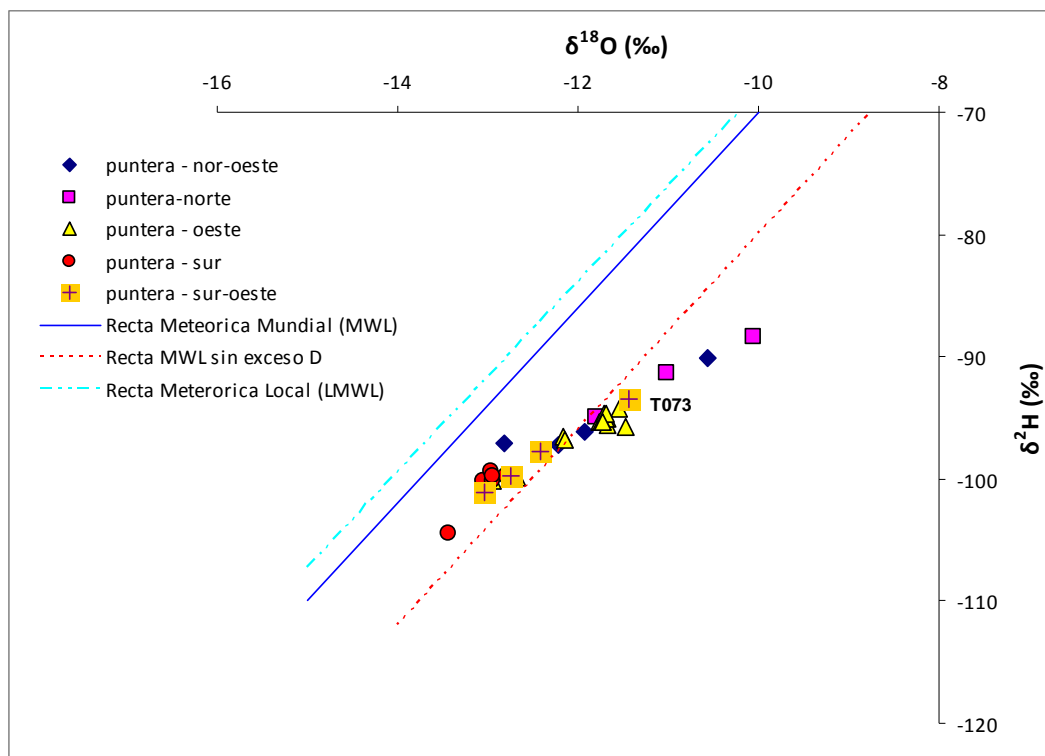
En la Figura 4-57 correspondiente al sector de Pampa Huasco y Salar del Huasco se observa que las muestras de pozos y punteras se encuentran agrupadas y tienden a alejarse ligeramente de la MWL y la LMWL, debido al efecto de la evaporación. Para el caso de las muestras de punteras ubicadas en el norte, noroeste y oeste del salar (Figura 4-58), se evidencia un mayor alejamiento de las rectas de referencia mencionadas, también debido a un efecto significativo de la evaporación (mayor tiempo de contacto con la atmósfera). Las muestras de las punteras ubicadas en el sur y suroeste del salar no presentan evidencias de evaporación, ya que se ubican entre las rectas de MWL, LMWL y MWL sin exceso de deuterio, a excepción de la

muestra de código HUA.T073 correspondiente a la puntera P-17. Esto podría atribuirse a que no existe contacto directo entre el agua subterránea y la atmósfera que permita desarrollar un perfil de fraccionamiento isotópico por evaporación, o que el referido perfil se desarrolla a una menor profundidad que los puntos donde fueron muestreados.



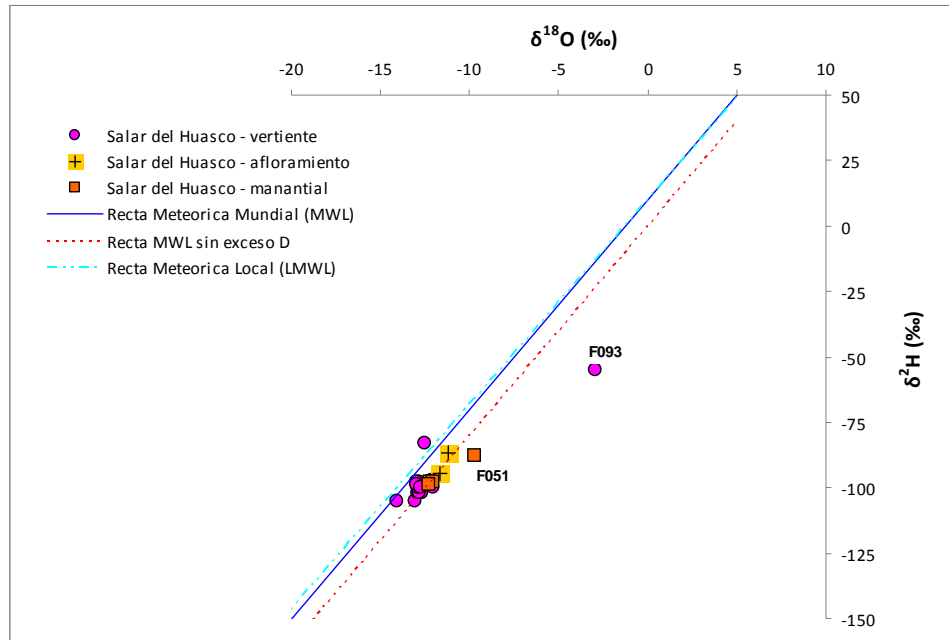
**Figura 4-57: Relación  $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$  de aguas de punteras en Pampa Huasco y Salar del Huasco**



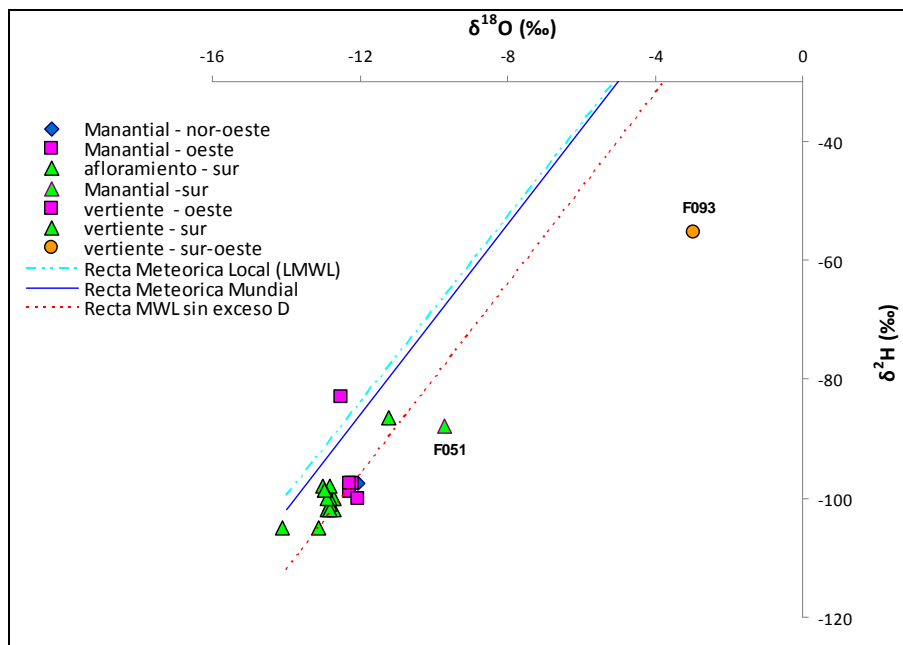


**Figura 4-58: Relación  $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$  de aguas de punteras en función de ubicación en el salar**

En la Figura 4-59 se muestra la relación a los afloramientos de las aguas subterráneas en el Salar del Huasco. Se evidencia un alto enriquecimiento isotópico de la muestra de agua de vertiente HUA.F093, ubicada al suroeste del salar, que tiene un pH de 7,5 y una conductividad eléctrica de 2.240  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . También se aprecia en la Figura 4-59 un ligero enriquecimiento isotópico de la muestra de un manantial (HUA.F051) ubicado al sur del salar, que presenta un pH de 7,7 y una conductividad eléctrica de 6.180  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Por lo general las vertientes ubicadas al sur, oeste y noroeste del salar no presentan evidencias de evaporación, (Figura 4-60).

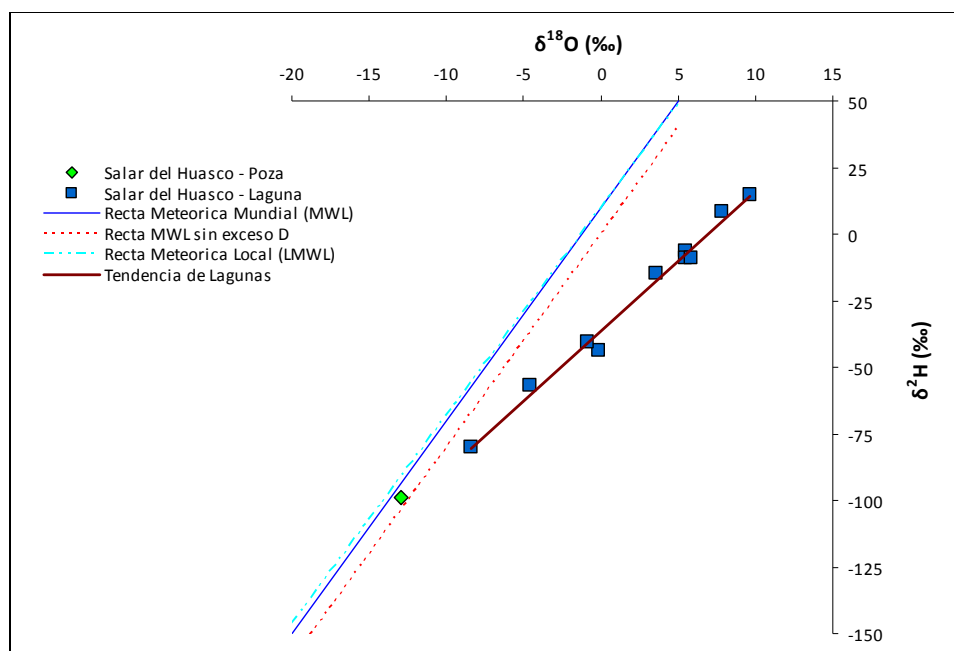


**Figura 4-59: Relación  $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$  de los afloramientos de aguas subterráneas en el sector del Salar del Huasco**



**Figura 4-60: Relación  $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$  de los afloramientos de aguas subterráneas en relación a su ubicación en el Salar del Huasco**

En la Figura 4-61 se observa que las aguas superficiales tomadas en la laguna principal (HUA.F083, HUA.F085, HUA.F086, HUA.F087, HUA.F088), las lagunas ubicadas al norte (HUA.F081), este (HUA.F089), noroeste (HUA.F091) y noreste (HUA.F090) del Salar del Huasco, así como la laguna terminal Huasco Norte (HUA.F095) presentan un gran enriquecimiento isotópico. Estas aguas se caracterizan por presentar valores de pH en el rango de 7,7 a 8,7 y conductividades eléctricas entre 678 y 335.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Este enriquecimiento se evidencia principalmente en las muestras tomadas en las lagunas ubicadas en el sistema al interior del salar, relacionado con la evaporación que se da allí.



**Figura 4-61: Relación  $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$  de las aguas superficiales el sector del Salar del Huasco**

En la Figura 4-62 se destaca que las aguas de pozas ubicadas al suroeste del salar no se encuentran afectadas por la evaporación.

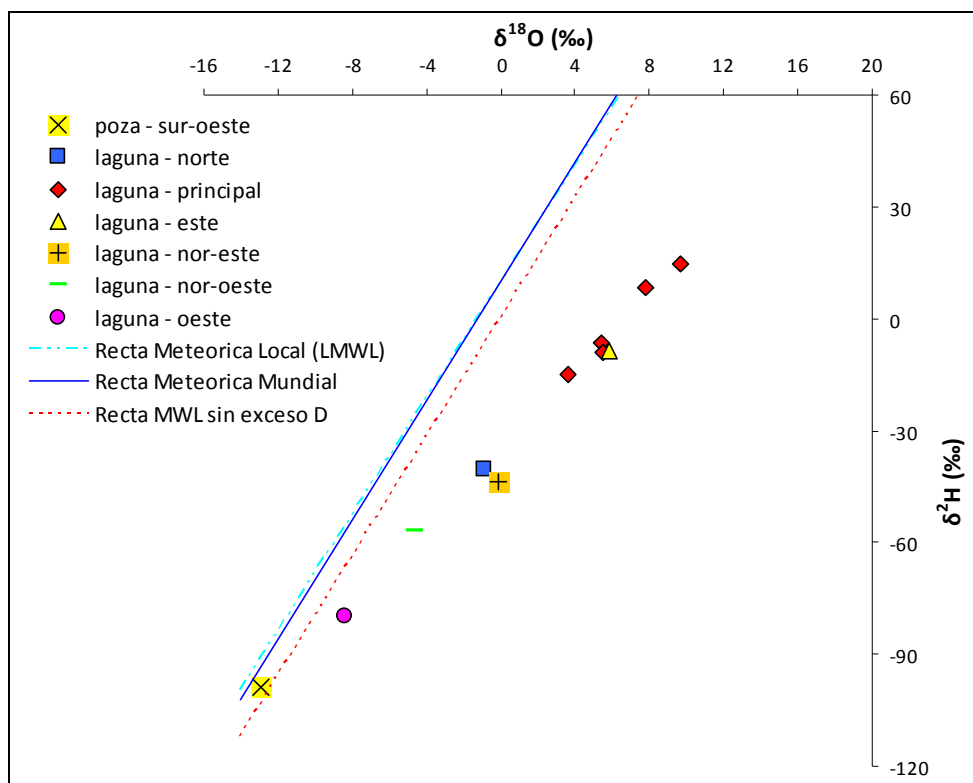
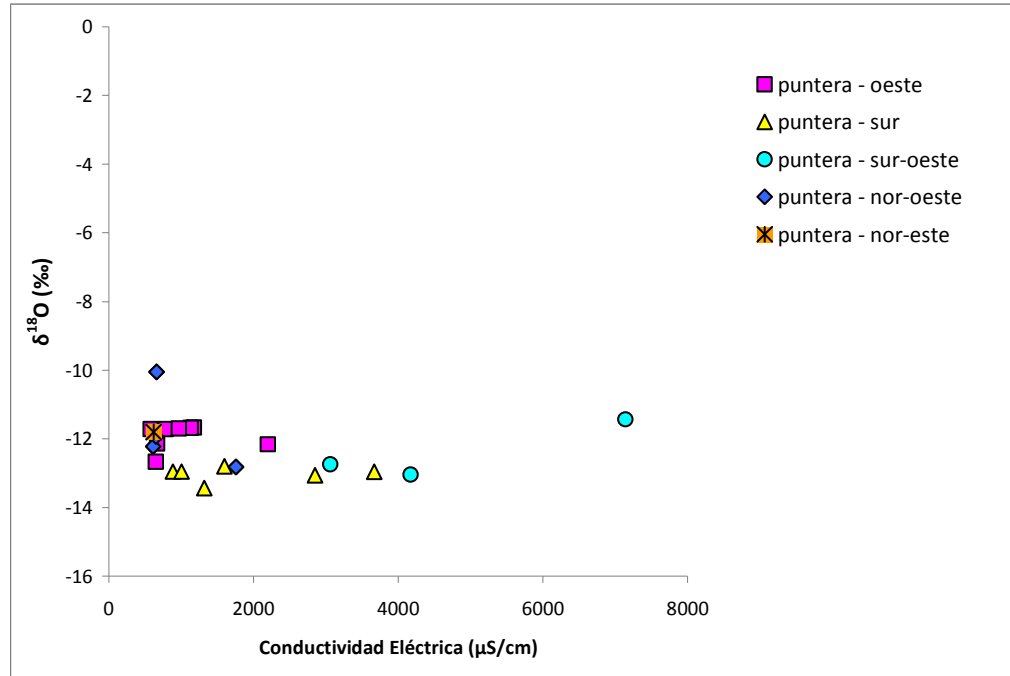
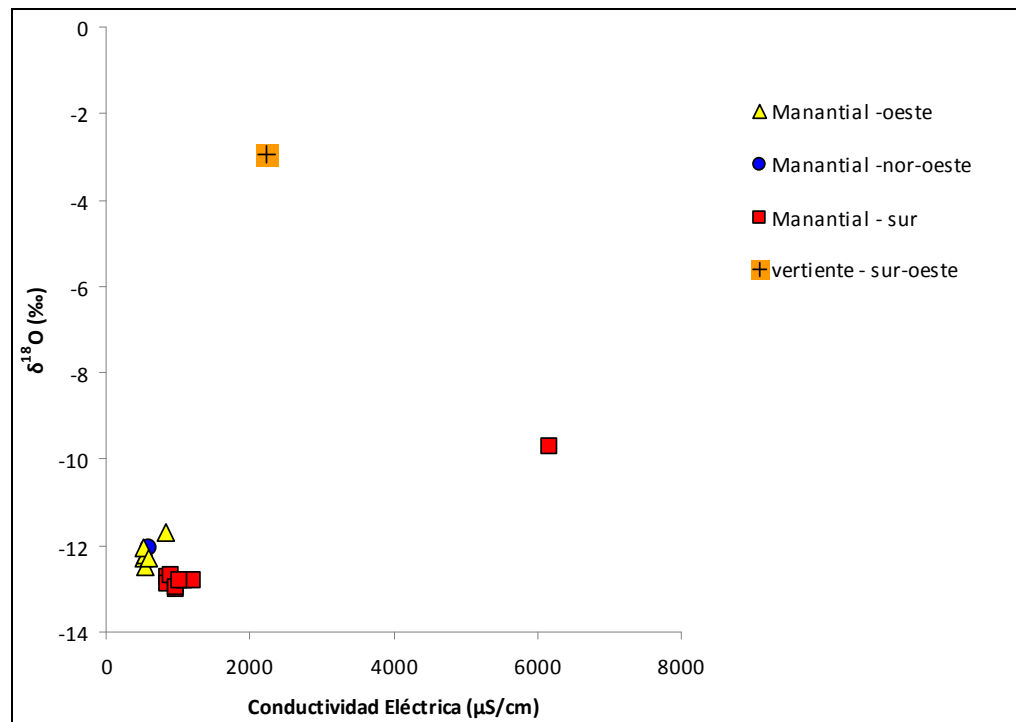


Figura 4-62: Relación  $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$  de las aguas superficiales en relación a su ubicación del Salar del Huasco

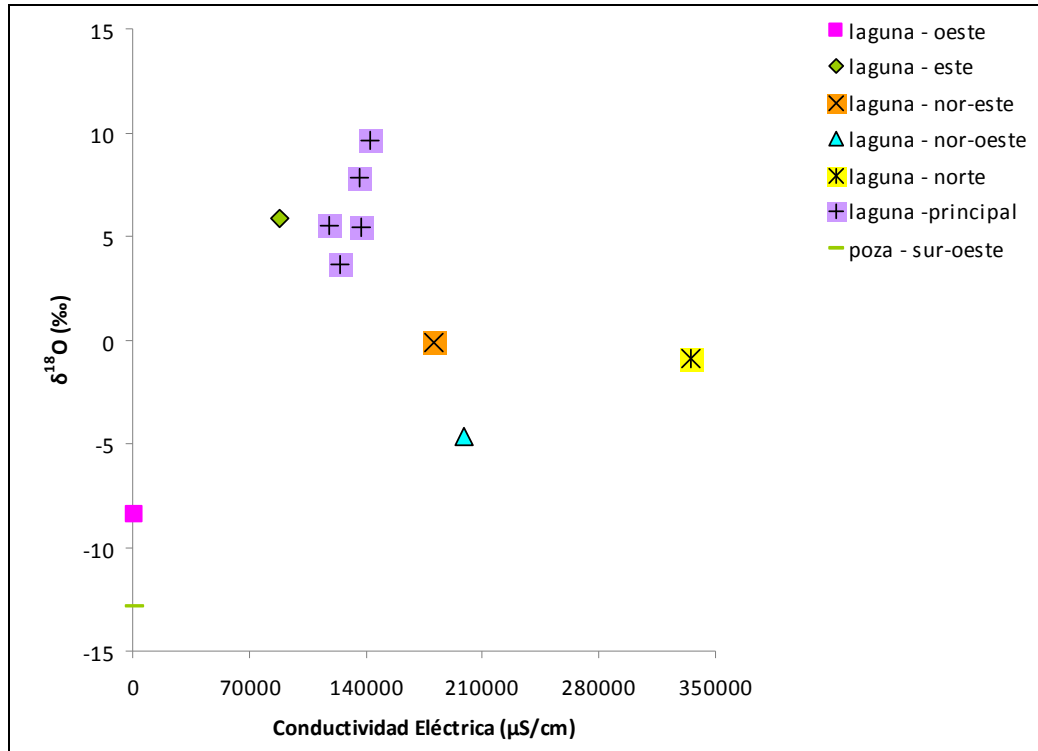
Con el fin de determinar el efecto de la evaporación en las aguas superficiales y subterráneas en el Salar del Huasco, se graficó el isótopo oxígeno-18 ( $\delta^{18}\text{O}$ ) en función de la conductividad eléctrica, representando el  $\delta^{18}\text{O}$  la evaporación de las aguas y la conductividad eléctrica el contenido de sales disueltas en éstas. En la Figura 4-63 se muestra la relación de  $\delta^{18}\text{O}$  y conductividad eléctrica en las muestras de aguas subterráneas y en la Figura 4-64 se evidencia a las muestras de afloramientos de aguas subterráneas. Se observa para ambos casos que no existe una correlación entre los parámetros. Los valores elevados de conductividad eléctrica no muestran relación con los incrementos significativos de  $\delta^{18}\text{O}$ . Este aspecto también es observado en las aguas superficiales, tal como se muestra en la Figura 4-65, a excepción de las muestras de la laguna principal. Es posible indicar que los procesos que estarían relacionados a la concentración de iones se deberían a los procesos de precipitación y disolución de minerales, los cuales deben ser evaluados utilizando herramientas como por ejemplo el PHREEQC.



**Figura 4-63: Correlación entre δ<sup>18</sup>O y C. Eléctrica en aguas subterráneas del sector Salar del Huasco**



**Figura 4-64: Correlación entre δ<sup>18</sup>O y C. Eléctrica de los afloramientos de aguas subterráneas del sector Salar del Huasco.**



**Figura 4-65: Correlación entre  $\delta^{18}\text{O}$  y C. Eléctrica de las aguas superficiales en el sector del Salar del Huasco**

## 5 CONCLUSIONES

Las unidades geológicas que afloran en la cuenca del Salar del Huasco comprenden a las unidades de la Formación Cerro Empexa (Kce), Formación Altos de Pica (Tsh), Formación Sillillica (TMv, TPv y Qv), Formación Collacagua (Qcs, Qcm, Qci), Formación Pastillos (Qip) y Depósitos no Consolidados (Qal, Qs, Qe, Qsp, Qipe). Estas formaciones presentan edades comprendidas entre el Mioceno y el Reciente. No obstante, existe afloramientos aislados de rocas de edad cretácica.

En la cuenca de estudio se observa un dominio de fallas con dirección N-S. Desde el punto de vista hidrogeológico una de las fallas importantes es la ubicada en el borde oeste del salar, la que funcionaría como zonas de alta conductividad hidráulica o como barreras de flujo subterráneo.

Existen 44 sondajes, de los cuales 27 corresponden a pozos de exploración y 15 a pozos de producción. Estos pozos se distribuyen sobre las pampas formadas por relleno volcanosedimentario, en las zonas topográficamente deprimidas de la cuenca y a la parte norte del río Collacagua. El sector del salar carece de perforaciones profundas.

Se han reconocido tres sistemas hidrogeológicos. El acuífero Superior que se compone por el conjunto de depósitos sedimentarios que recubren de manera uniforme a las unidades más antiguas. El acuífero Medio formado por los depósitos terciarios, y el acuífero inferior que se compone por la Ignimbrita Huasco y las lavas del Mioceno superior – Plioceno.

Los registros de las mediciones de los niveles de subterránea correspondientes a los años 2001, 2002 y 2008, indican que en la mayoría de los pozos no se presentan variaciones significativas del nivel, por lo que se asume que el sistema acuífero en la cuenca se encuentra en equilibrio. No obstante están relacionadas con la topografía de la cuenca y la red de drenaje principal, revelando una probable conexión hidráulica entre el acuífero y el río Collacagua.

Los flujos subterráneos escurren predominantemente en sentido norte-sur con algunos aportes en sentido noreste-suroeste en el sector de Pampa Sillillica y este-oeste en Pampa Rinconada, siempre con zona de descarga en el salar.

En las cercanías de la desembocadura del río Piga el acuífero medio-inferior posee un mayor potencial hidráulico que el acuífero superior. Alrededor de 7 km al sur, en el sector de Pampa Sillillica Norte, el acuífero superior presenta niveles piezométricos mayores, por lo que recargaría al acuífero medio e inferior.

En base a los niveles de las aguas subterráneas se evidencia la presencia de flujos aportantes desde la cuenca de laguna Lagunillas, ubicada en el norte de la cuenca.

En el Salar del Huasco se construyeron alrededor de 80 punteras de profundidades entre 1 y 6 m. Las mediciones de los niveles freáticos en las inmediaciones del salar indican la existencia de un flujo subterráneo hacia las lagunas existentes, por lo que el origen de la mismas sería de tipo mixto, con aportes de las vertientes ubicadas en el extremo oeste (Ermitaño y Huasco Norte) y sur (V. Sur, Huasco López y Jalsuri) del Salar y en, menor medida, desde las aguas subterráneas.

Los mejores ajustes de los resultados de las interpretaciones de las pruebas de bombeo fueron con los métodos de acuíferos confinados en los sectores Pampa Peña Blanca, Pampa Batea, Pampa Sillillica, río Batea y caserío Collacagua, y de acuíferos semi-confinados en los sectores de Pampa Rinconada y Pampa Sillillica Norte.

Hidrogeológicamente, se ha planteado que la cuenca no es del todo cerrada, estando vinculada a sus vecinas Pampa del Tamarugal, al oeste, y Lagunillas, al norte. La primera de las conexiones ha sido mayormente estudiada, pero no existen resultados concluyentes en contra de la hipótesis planteada por Tröger et al. (2004). A pesar de esto, se descarta lo propuesto por dicho autor en el sentido de que las fallas de orientación NNE-SSW al oeste del salar constituyen una barrera impermeable para el paso del agua subterránea en dirección al salar, por cuanto prospecciones geofísicas en la zona indican que existe una conexión. La química de las aguas de la Pampa del



Tamarugal (Risacher et al., 1999), invita a proponer un mecanismo de descarga hacia el Salar de Pintados, el que estaría relacionado con las estructuras del sector Altos de Pica.

La estimación de la recarga en la cuenca del Salar del Huasco fue realizada a través de balances de masa y de coeficientes de infiltración y esorrentía que ponderaron las características hidráulicas de las unidades litológicas presentes en la cuenca analizada. La recarga en la cuenca varía entre 920,1 y 1.400,6 L/s con un valor medio de 1.158,7 L/s. No se han probado entradas externas al sistema, y el valor estimado está en acuerdo con el estudio realizado por Acosta (2004), cuyos reportes varían entre 1.140 y 2.051 L/s.

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. En esta cuenca se estimó una evapotranspiración total que varía entre 699,0 y 815,0 L/s, con un valor medio de 757,0 L/s. A pesar de que no se tiene certeza de las descargas reales a través de obras de captación, existen derechos de aprovechamiento que se consideran aprobados por la DGA de 118,1 L/s.

El balance hídrico en la cuenca se realizó considerando la información más fidedigna de la que se dispuso, discutiéndose las posibles fuentes que lleven a un error de cierre más acotado. Al contabilizar las entradas totales por 1.158,7 L/s y las salidas en 875,1 L/s, se tiene un exceso del 24% respecto del valor de las entradas. Este error se debería a la metodología empleada para la estimación de los parámetros de la ecuación del balance hídrico (recarga y descarga), salidas subterráneas no consideradas hacia otras cuencas y extracciones mayores a las actualmente conocidas.

La composición de las aguas de la cuenca del Salar del Huasco ilustra con claridad la dirección de flujo norte a sur de las aguas y la influencia que sobre ellas ejerce la geología. La distribución regular de los puntos de muestreo en los cursos fluviales, permite reconocer la evolución composicional de las aguas.

En el sector norte, predominan las aguas bicarbonatadas cálcicas y bicarbonatadas magnésicas, con baja concentración de iones, propio de las zonas de recarga. En Pampa Porquesa destaca una muestra sulfatada magnésica, asociada probablemente a los domos dacíticos que allí afloran. A medida que las aguas fluyen aguas abajo por el Río Collacagua, su concentración va aumentando progresivamente hasta Pampa Peñablanca, debido a que va siendo afectada por evaporación e interactúa con los depósitos por los que fluye. Luego reciben la influencia de las aguas sulfatadas cálcicas que caracterizan al sector de Pampa Sillillica, debido a su contacto con la Formación Sillillica en que abundan las rocas volcánicas andesíticas. Esta influencia se aprecia con claridad en la composición de las aguas subterráneas. Se genera así una mezcla de aguas, cuya composición final aparece como sulfatada cálcica, pero con una fuerte componente bicarbonatada sódica. Este mismo tipo de agua va aumentando su concentración a medida que es expuesta a la evaporación y el contacto con la litología. Incluso en las cercanías del salar ya se reconocen indicios de una muestra de agua clorurada sódica muy concentrada. Desde Pampa Rinconada llegan también hasta el salar aportes de aguas sulfatadas cálcicas moderadamente concentradas.

En la formación del río Collacagua, al noreste de la cuenca, intervienen dos tipos de aguas, unas bicarbonatadas sódica- cálcicas (características de los ríos Piga y Batea) y otras bicarbonatadas magnésica- cálcicas (correspondientes a la quebrada Chislaca).

En el sector del salar, las aguas pueden preservar rasgos de su composición inicial, pero en niveles de concentración mayores ya que la evaporación aquí es intensa. O bien evolucionan a aguas cloruradas sódicas a medida que los elementos menos solubles van formando sales y precipitando. Destaca en el sector norte del salar la influencia de las aguas bicarbonatadas cálcicas producto de la mezcla de los aportes del Río Collacagua con aguas cloruradas sódicas, o debido a la disolución de niveles evaporíticos antiguos. El sector sureste del salar presenta aguas de composición sulfatada cálcica de elevada salinidad, debido a la influencia de los flujos

provenientes de Pampa Rinconada. En la zona central y suroccidental del salar, más alejada de los principales flujos que llegan a él, las aguas tienden a aumentar su salinidad y adquieren una composición sulfatada sódica, dada la mezcla de aguas mencionadas anteriormente. Éstas se van concentrando paulatinamente por evaporación hasta que en su concentración relativa de elementos dominan los iones sodio y cloruro, por ser los más solubles.

Lo anterior es congruente con las razones isotópicas medidas en las aguas del salar, ya que éstas se alinean en una recta de menor pendiente que la MWL y poseen valores más enriquecidos en isótopos pesados.

## 6 RECOMENDACIONES

- Realizar estudios detallados sobre las fallas relevantes como serían las ubicadas al oeste del Salar del Huasco, a fin de obtener más antecedentes que descarten o corroboren la hipótesis sobre su funcionamiento como barrera hidráulica.
- Estudiar utilizando herramientas químicas e isotópicas las posibles descargas desde la cuenca del Salar del Huasco a la Pampa del Tamarugal y desde la cuenca Lagunillas a la cuenca del Salar del Huasco, lo cual incluye campañas de terreno.
- Realizar mediciones del nivel freático en el tiempo en las punteras instaladas en el Salar del Huasco, a fin de evaluar la interacción con los acuíferos.
- Continuar con las mediciones de los niveles de las aguas subterráneas en los pozos perforados, con el fin de contar con un registro más amplio de datos y realizar nuevas interpretaciones.
- Desarrollar nuevas estimaciones de recarga de la cuenca mediante balance de elementos conservativos y modelación hidrológica, de manera que puedan compararse con los rangos actuales propuestos.
- Continuar el monitoreo en el tiempo de lagunas mediante imágenes satelitales. El tamaño de lagunas así como los índices de refracción sobre la vegetación en la zona del humedal apoyan la cuantificación de las descargas por evaporación del sistema, única salida que se ha probado con los antecedentes disponibles.
- Realizar un inventario de fuentes de agua en toda la cuenca, tanto en aquellos que han sido catastrados como en otros no estudiados, a fin de evaluar las descargas del acuífero a través de manantiales de acuerdo a la posición dentro de la cuenca y lo que ocurre en estas fuentes (evaporación, infiltración). Así también, identificar sistemas de importancia para su protección.

- Utilizar nuevas metodologías para estimar la descarga por evaporación, a fin de reducir la incertidumbre de cuantificación de la misma, la cual constituye la única descarga que se produce en la cuenca.
- Realizar mediciones de la evaporación desde el suelo en diferentes estaciones del año, a fin de evaluar la influencia de las mismas en los resultados obtenidos.
- Identificar y muestrear de manera separada los 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.
- Realizar las mediciones de parámetros como pH, Conductividad Eléctrica y Temperatura en campo, con equipos debidamente calibrados.
- Incluir en el programa de monitoreo de calidad de agua procedimientos de control y aseguramiento de la calidad que consideren muestras blanco y duplicados.
- Utilizar modelos geoquímicos como por ejemplo PHREEQC para evaluar los procesos de precipitación y disolución de iones y su influencia en las concentraciones de los mismos, especialmente en el entorno y dentro Salar del Huasco.
- Realizar mediciones del contenido isotópico de las aguas de lluvia y nieve, a fin de definir rectas meteóricas locales en vías de conocer la altura de recarga de las cuencas y posibles descargas en cotas menores.

## BIBLIOGRAFIA

Acosta, O., 2004. Impacto de las extracciones de agua subterránea en el Salar del Huasco. Tesis de Máster, Universidad Politécnica de Cataluña, España.

Acosta, O. y Custodio E., 2008. Impactos ambientales de las extracciones de agua subterránea en el Salar del Huasco (norte de Chile). Boletín Geológico Minero, 119 (1): 33-50.

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.

Bredehoeft, J., 2007. It is the discharge. Ground Water 45(5): 523.

BritishColumbia, 1993. Groundwater Mapping and Assessment in British Columbia.

Carrica, J. y Lexow, C., 2004. "Evaluación de la recarga natural al acuífero de la cuenca superior del arroyo Napostá Grande, provincia de Buenos Aires." Revista de la Asociación Geológica Argentina 59(2): 281-290.

Collahuasi - GP Consultores Ltda., 2003. Modelo Hidrogeológico de Gestión del Sistema Hídrico del Salar del Huasco. Informe Final de Modelación para la Dirección General de Aguas. Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi SCM. Santiago, Chile.

Collahuasi - GP Consultores Ltda., 2004. Elementos Ambientales Sensibles en el Salar del Huasco y su Demanda Ambiental Hídrica. Santiago, Chile.

Collahuasi - GP Consultores Ltda., 2005. Modelo Hidrogeológico de Gestión del Sistema Hídrico del Salar del Huasco. Actualización N° 1 para la Dirección General de Aguas. Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi SCM. Santiago, Chile.

Collahuasi - GP Consultores Ltda., 2006. Antecedentes Levantamiento Geofísico TEM Salar del Huasco.

Collahuasi - GP Consultores Ltda., 2007. Información sobre evaporación provista por Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi. Informes inéditos.

Collahuasi - GP Consultores Ltda., 2008. Información sobre evaporación provista por Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi. Informes inéditos.

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

- Custodio, E., 1976. Hidrogeoquímica Subterránea. Barcelona, España, Ediciones Omega.
- Craig, H., 1961. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133, 1.702.
- De Vries, J. J. y Simmers, I., 2002. Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. *Hydrogeology Journal* 10: 5-17.
- DICTUC, 2005. Estudio Hidrogeológico Conceptual y Numérico del Funcionamiento de la Cuenca del Salar de Coposa. Informe Técnico.
- Dirección General de Aguas (DGA) – Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN), 1998. Evaluación de Recursos Hídricos en el Sector de Pica, Hoya de la Pampa del Tamarugal, I Región. S. I. T N° 48. Convenio de Cooperación.
- Dirección General de Aguas, 2007. Coberturas digitales SIG.
- Dirección General de Aguas, 1987. Balance Hídrico de Chile.
- Dirección General de Aguas (DGA), Departamento de Estudios y Planificación (DEP), 2006. Actualización delimitación de acuíferos que alimentan vegas y bofedales de la Región de Antofagasta. Cartografía Temática, S. I. T N° 111.
- Dirección General de Aguas y Pontificia Universidad Católica de Chile, 2009. Acción de Apoyo DGA-PUC. Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la zona norte de Chile, I, II y III Regiones. Santiago.
- Fernández, J., Galindo G., Parada, M., Gimeno, D., García, M. y Saavedra, J., 2005. Estado Actual del Conocimiento sobre el Arsénico en el Agua de Argentina y Chile: Origen, Movilidad y Tratamiento. II Seminario Hispano-Latinoamericano sobre temas actuales de hidrología subterránea y IV Congreso Hidrogeológico Argentino.
- Galli, C., 1957. Las formaciones geológicas en el borde occidental de la puna de Atacama, sector de Pica, Tarapacá. *Minerales*, Vol. 56, p. 14-26.
- Gajardo J., 1994. La vegetación natural de Chile. Clasificación y distribución geográfica. Ed. Universitaria. Santiago, Chile.
- Glynn, P. y Plummer, N., 2005. Geochemistry and the understanding of ground-water systems. *Hydrogeology Journal* 13: 263-287.
- Hargis y Montgomery, 1981. Hydrogeological Investigation of the Salar del Huasco Basin. Interim Report, August 4, 1981.
- Heredia, J. y Murillo, J. M., 2002. Balance Hídrico y Estimación de la Recarga mediante Modelación Numérica en Pequeñas Cuencas del Sector Sudoriental de la Isla de Gran Canaria. España, Instituto Geológico y Minero de España.

Herrera, C., Pueyo, J. J., et al., 2006. Relación de Aguas Superficiales y Subterráneas en el área del lago Chungará y lagunas de Cotacotani, norte de Chile: un estudio isotópico. *Revista Geológica de Chile* 33(2): 299-325.

Houston, J., 2002. Groundwater recharge through an alluvial fan in the Atacama Desert, northern Chile: mechanisms, magnitudes and causes. *Hydrol. Process.* 16, 3019- 3035.

Instituto Geográfico Militar, 1987. Cartografía de Chile, escala 1:250.000.

INVEREX Ltda., 2000 al 2002. Diversos Informes sobre Antecedentes de Construcción y Análisis de Pruebas de Bombeo en los pozos de Collahuasi. Preparado para Compañía Minera de Collahuasi.

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

Johnson, J., 2009. Evaporación desde napas freáticas someras en cuencas endorreicas del altiplano chileno. Tesis de Magíster, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, Pontificia Universidad Católica de Chile.

Linsley, R. K., Kohler, M. A., & Paulhus, J. L. H., 1977. *Hidrología para Ingenieros* (2nd ed.). Bogotá, Colombia: McGraw-Hill Latinoamericana.

López, P. L., Auqué, L. F., et al., 1999. Características Geoquímicas y Pautas de Evolución de las Salmueras Superficiales del Salar de Llamara, Chile. *Revista Geológica de Chile* 26(1): 89-108.

Margaritz, M., Aravena, R., Peña, H., Suzuki, O. y Grilli, A., 1989. Water chemistry and isotope study of streams and springs in northern Chile, *Journal of Hydrology* 108, pp. 323–341.

Margaritz, M., Aravena, R., Peña, H., Suzuki, O. y Grilli, A., 1990. Source of groundwaters in the deserts of northern Chile: evidence for deep circulation of groundwaters from the Andes. *Ground Water* 28:523–517.

Montgomery E.L., Rosko M.J., Castro S.O., Keller B.R. and Bevacqua P.S., 2003. Interbasin Underflow Between Closed Altiplano Basins in Chile. *Ground Water* 41 (4): 523-531.

NASA, 1999. Imágenes Satelitales Landsat ETM+.

Risacher, F., Alonso, H. y Salazar, C., 1999. Convenio de Cooperación entre la Dirección General de Aguas (DGA), la Universidad Católica del Norte (UCN) y el Institute de Recherche Pour le Développement (IRD). *Geoquímica de Aguas en Cuencas Cerradas: I, II y III Regiones – Chile (S.I.T. N° 51)*.



- Risacher, F., Alonso, H. y Salazar, C., 2003. The origin of brines and salts in Chilean salars: a hydrochemical review. *Earth Science Reviews* 63 (249-293).
- Rushton, K., 2003. *Groundwater Hydrology*. England, British Library.
- Salazar, C., Rojas, L., Lillo, A., Aguirre, E., 2001. Análisis de Requerimientos Hídricos de Vegas y Bofedales en el Norte de Chile.
- Scanlon, B., Healy, R., et al., 2002. "Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge." *Hydrogeology Journal* 10: 18-39.
- Sayes, J., 1978. Cuadrángulos Collacagua y Laguna del Huasco, Provincia de Iquique, I Región: scale 1:100,000. Instituto de Investigaciones Geológicas de Chile, 43 pp.
- Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), 2003. Mapa Geológico del Norte Grande de Chile, Escala 1:1.000.000.
- Shuttleworth, W., 1993. Evaporation, Chapter 4 en Maidment, D., 1993, *Handbook of Hydrology*. McGraw-Hill, Inc.
- Theis, CV., 1935. The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using ground water storage. *Trans Am Geophys Union Part 2*, 16:519–524.
- Tröger, U. y Gerstner, D., 2004. Estudio de Investigación de la Situación Hidrogeológica en la Formación Altos de Pica. Informe Técnico de Asesoría Experta, S.D.T. N° 174, Convenio DGA – CONADI.
- Tyler, S., 2006. Cálculo de los recursos de agua subterránea en regiones áridas: tendencias en tecnología y política de uso. Presentación. Programa Postgrado de Ciencias Hidrológicas. Estados Unidos, Universidad de Nevada.
- US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 2000. *Hydrologic Modeling System HEC-HMS, Technical Reference Manual*.
- Vergara, H., Thomas, A., 1984. Carta Geológica de Chile, Hoja Collacagua, N° 59, Región de Tarapacá. Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Wang B., Jin, W., Nimmo, J., Lei Yang L., Wang, W., 2008. Estimating groundwater recharge in Hebei Plain, China under varying land use practices using tritium and bromide tracers. *Journal of Hydrology*, 356(1-2), 209– 222.
- Xu, Y., Mo, Y., Cai, Y. Li, X., 2005. Analysis on groundwater table drawdown by land use and the quest for sustainable water. *Agricultural Water Management*, 75(1), 38–53.

**A N E X O S**