



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA E HIDROGEOQUÍMICA DE LAS
CUENCAS: SALAR DE AGUAS CALIENTES 2, PUNTAS NEGRAS, LAGUNA
TUYAJTO, PAMPA COLORADA, PAMPA LAS TECAS Y SALAR EL LACO, II
REGION DE CHILE

TÉSIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGA

MARIANA MARCELLA CERVETTO SEPÚLVEDA

PROFESOR GUÍA:
SOFÍA REBOLLEDO LEMUS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
CARLOS PARRAGUEZ DECKER
KATJA DECKART

SANTIAGO DE CHILE
OCTUBRE 2012

RESUMEN

El presente estudio se centró en caracterizar el funcionamiento hidráulico de las cuencas endorreicas Salar de Aguas Calientes 2, Puntas Negras, Laguna Tuyajto, Pampa Colorada, Pampa Las Tecas y Salar El Laco, ubicadas en la II Región de Antofagasta. Estas son cuencas intra-volcánicas, que se forman al este de la Cordillera Occidental, donde se desarrolla el volcanismo de arco actual, y que se caracteriza por un clima semi-árido. Los depósitos volcánicos dan lugar a la morfología particular de esta zona, que consiste en un conjunto de pequeñas cuencas hidrológicas morfológicamente aisladas, que acumulan depósitos aluviales y/o salinos del Pleistoceno-Holoceno debido a la intensa aridez del área.

La recarga se produce por la infiltración de las precipitaciones, las que infiltran o escurren dependiendo de las características geológicas y geomorfológicas del terreno. Las descargas se producen en mayor proporción por evaporación desde lagunas, salares, napas someras y evapo-transpiración a partir de la vegetación que allí existe.

Las zonas acuíferas existentes están limitadas a la porosidad primaria de las rocas volcánicas, la porosidad secundaria asociada a procesos de fracturamiento en este tipo de formaciones, y horizontes erosionados y meteorizados encontrados en profundidad. El agua subterránea puede interceptar la superficie en las áreas de los salares y lagunas. El acuífero principal está compuesto por ignimbrita fracturada.

Se deduce la existencia de continuidad hidráulica y flujo de aguas subterráneas profundas desde Puntas Negras a Salar de Aguas Calientes 2, desde Pampa Colorada a Pampa Las Tecas y Laguna Tuyajto; y desde Pampa Las Tecas a Laguna Tuyajto.

Las interconexiones del flujo de aguas subterráneas son restringidas por zonas de baja permeabilidad, ubicadas en los márgenes de las cuencas, y horizontes permeables de potencia menor, ubicados en profundidad.

El modelo conceptual que aquí se presenta puede ser replicado para todas las cuencas de la Puna de Atacama de la II Región de Chile, aunque podrían haber variaciones mayores en la química de las aguas, lo que deberá ser revisado y analizado para cada caso particular, antes de replicar el modelo.

DEDICATORIA

Dedicado a los que nunca se aburrieron de tenerme una fé incondicional...

La familia
Los amigos
Los colegas
Los profes y María Rosa

Pero especialmente:

A Marcela y Guillermo. Este título es para ustedes, gracias por darme todo. Soy inmensamente afortunada. Los amo.

A L y J por esforzarse en obligarme a sacar todo esto adelante. Gracias por el empujón.

AGRADECIMIENTOS

A María Rosa. Por su buena voluntad y buen ánimo, dispuesta a apoyar en todo lo que estuvo a su alcance. Por su alegría y por escucharme siempre que necesitaba alguien que me prestara oído.

A Pablo Rengifo. Quien me abrió las puertas para dar los primeros pasos laborales y descubrir la Hidrogeología. Gracias por la amistad y la oportunidad.

A los colegas y amigos de SERNAGEOMIN, ya que sin su apoyo, no hubiese sido posible retomar y terminar lo pendiente. Gracias al dire, sub-dire, jefazo, y a todos los colegas, que son los mejores que se puede tener.

A mi socio, por confiar en mí y ponerme metas.

A Sofía, por recibirme siempre con una sonrisa cada vez que la fui a visitar y apoyarme siempre.

A Blanca, por su buena disposición y porque que se la jugó siempre.

Gracias a todos los que de alguna forma u otra, aportaron en mi crecimiento como persona y como geóloga.

INDICE DE CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Consideraciones Generales.....	1
1.2 Objetivos.....	3
1.3.1 Objetivos generales.....	3
1.3.2 Objetivos específicos.....	3
1.3 Método de Trabajo.....	4
1.3.1 Recopilación y revisión bibliográfica.....	4
1.3.2 Caracterización geomorfológica.....	5
1.3.3 Geología de superficie.....	5
1.3.4 Geología de sub-Superficie.....	5
1.3.5 Caracterización hidrológica.....	6
1.3.6 Caracterización hidrogeológica.....	6
1.3.7 Nuevos datos hidroquímicos e isotópicos.....	6
1.3.8 Marco hidroquímico e isotópico.....	7
1.4 Zona de Trabajo: Ubicación y Accesos.....	7
1.5 Estudios Anteriores.....	9
1.6 Limitaciones.....	11
2 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	12
2.1 Cordillera de los Andes.....	12
2.2 Unidades Fisiográficas Regionales.....	14
2.2.1 Cordillera occidental.....	15
2.2.2 Puna de Atacama.....	16
2.2.3 Cuencas endorreicas.....	18
2.3 Ubicación de Cuencas Piloto.....	19
2.4 Vegetación y Flora.....	21
2.5 Fauna.....	23
2.6 Población.....	25
3 CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA.....	26
3.1 Generalidades.....	26
3.2 Unidades Fisiográficas de Cuencas Piloto.....	26
3.2.1 Relieves volcánicos.....	29
3.2.2 Relieves de acumulación.....	33
3.3 Geomorfología de cuencas piloto.....	35
3.3.1 Geomorfología cuenca Salar de Aguas Calientes 2.....	37
3.3.2 Geomorfología cuenca Puntas Negras.....	38
3.3.3 Geomorfología cuenca Laguna Tuyajto.....	40

3.3.4 Geomorfología cuenca Pampa Colorada.....	42
3.3.5 Geomorfología cuenca Pampa Las Texas.....	42
3.3.6 Geomorfología cuenca Salar El Laco.....	45
4 GEOLOGÍA SUPERFICIAL.....	47
4.1 Generalidades.....	47
4.2 Descripción de Unidades Estratigráficas.....	50
4.2.1 Rocas Paleozoicas.....	50
4.2.2 Rocas Mesozoicas.....	51
4.2.3 Rocas Volcánicas del Cenozoico Superior.....	52
4.2.3.1 Ignimbritas.....	53
4.2.3.2 Volcanes.....	57
4.2.4 Depósitos no-consolidados y salinos.....	59
4.2.5 Rocas intrusivas.....	62
4.3 Geología superficial de cuencas piloto.....	63
4.3.1 Geología cuenca Salar de Aguas Calientes 2.....	63
4.3.2 Geología cuenca Puntas Negras.....	64
4.3.3 Geología cuenca Laguna Tuyajto.....	64
4.3.4 Geología cuenca Pampa Colorada.....	64
4.3.5 Geología cuenca Pampa Las Texas.....	65
4.3.6 Geología cuenca Salar El Laco.....	65
4.4 Geología Estructural.....	65
5 GEOLOGÍA DE SUB-SUPERFICIE.....	67
5.1 Catastro de Pozos Profundos.....	67
5.2 Estratigrafía de cuencas piloto.....	71
5.2.1 Estratigrafía de cuenca Salar de Aguas Calientes 2.....	72
5.2.2 Estratigrafía de cuenca Puntas Negras.....	73
5.2.3 Estratigrafía de cuenca Laguna Tuyajto.....	73
5.2.4 Estratigrafía de cuenca Pampa Colorada.....	75
5.2.5 Estratigrafía de cuenca Pampa Las Texas.....	76
5.2.6 Estratigrafía de cuenca Salar El Laco.....	76
5.3 Prospección Geofísica.....	77
5.3.1 Generalidades.....	77
5.3.2 Geofísica EIA	78
5.3.3 Geofísica EMSA	81
5.4 Definición de Unidades Geológicas de sub-Superficie.....	82
6 CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA.....	86
6.1 Clima.....	86
6.2 Precipitaciones.....	87

6.3 Esgurrimientos y Red de Drenaje.....	90
6.4 Evaporación.....	91
7 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA.....	94
7.1 Generalidades.....	94
7.2 Definición de Unidades Hidrogeológicas.....	95
8 MARCO HIDROQUÍMICO.....	99
8.1 Generalidades.....	99
8.2 Metodología.....	102
8.2.1 Diagramas de Piper.....	103
8.2.2 Diagramas de Stiff.....	103
8.3 Datos Disponibles y Tratamiento de la Información.....	105
8.4 Campaña de Recolección de Muestras de Agua.....	109
8.4.1 Generalidades.....	109
8.4.2 Metodología de muestreo.....	110
8.4.3 Análisis hidroquímico.....	110
8.4.4 Análisis isotópico.....	111
8.4.5 Resultados de muestreo.....	111
8.5 Análisis Hidroquímico.....	118
8.5.1 Análisis de Parámetros Físico-Químicos.....	118
8.5.1.1 Conductividad.....	118
8.5.1.2 Temperatura.....	119
8.5.1.3 pH.....	121
8.5.2 Análisis de elementos mayoritarios del total de datos.....	122
8.5.3 Análisis elementos mayoritarios cuenca S. Aguas Calientes 2.....	128
8.5.4 Análisis elementos mayoritarios cuenca Puntas Negras.....	129
8.5.5 Análisis elementos mayoritarios cuenca Laguna Tuyajto.....	131
8.5.6 Análisis elementos mayoritarios cuenca Pampa Colorada.....	134
8.5.7 Análisis elementos mayoritarios cuenca Pampa Las Tecas.....	136
8.5.8 Análisis elementos mayoritarios cuenca Salar El Laco.....	138
8.5.9 Análisis elementos minoritarios.....	141
8.5.10 Concentraciones de elementos minoritarios en sistema de cuencas piloto.....	144

9 MARCO ISOTÓPICO.....	149
9.1 Generalidades.....	149
9.2 Patrón de Referencia V-SMOW.....	150
9.3 Relación δD - $\delta^{18}O$ y Recta Meteórica Local.....	151
9.4 Análisis Isotópico.....	152
10 CONCLUSIÓN: FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DE CUENCAS PILOTO DE LA PUNA DE ATACAMA.....	156
REFERENCIAS.....	160
ANEXO A.....	170
ANEXO B.....	183
ANEXO C.....	189
ANEXO D.....	192
ANEXO E.....	200
ANEXO F.....	206
ANEXO G.....	207

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Identificación de cuencas en la Puna de la II Región

Tabla 3.1 Características morfométricas de la cuenca Salar de Aguas Calientes 2

Tabla 3.2 Características morfométricas de la cuenca Puntas Negras

Tabla 3.3 Características morfométricas de la cuenca Laguna Tuyajto

Tabla 3.4 Características morfométricas de la cuenca Pampa Colorada

Tabla 3.5 Características morfométricas de la cuenca Pampa Las Tecas

Tabla 3.6 Características morfométricas de la cuenca Salar El Lago

Tabla 5.1 Catastro de pozos > 100 m para el sector de las cuencas piloto de la II Región de Chile

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

Tabla 6.2 Estaciones meteorológicas con registros de evaporación seleccionadas para el sistema piloto de la II Región

Tabla 8.1 Elementos mayoritarios

Tabla 8.2 Tipo de muestras para las cuencas piloto

Tabla 8.3 Cantidad de muestras recolectadas por cuenca

Tabla 8.4 Parámetros analizados por Laboratorio de Análisis de Aguas y Riles de DICTUC S.A

Tabla 8.5 Posición geográfica (PSAD 56) y altitud de puntos de muestreo

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Vías de acceso a las cuencas piloto de la II región de Chile. En cuadrado negro, área de emplazamiento de las cuencas piloto. (fuente: Turistel).

Figura 1.2 Geografía, ubicación y caminos principales del área de estudio y delimitación de cuencas piloto. En amarillo, Salar de Aguas Calientes 2; en naranja, Puntas Negras; en azul, Salar Laguna Tuyajto; en rojo, Pampa Colorada; en verde, Pampa Las Tecas, y en lila, Salar El Laco.

Figura 2.1 Segmento de los Andes Centrales y del Oroclino Boliviano, dentro de la extensión de la cadena Andina Sudamericana.

Figura 2.2 Imagen satelital que muestra la morfología del segmento del Oroclino Boliviano y la zona de estudio.

Figura 2.3 Perfil morfoestructural de la II Región de Chile, modificado de Moreno y Gibbons (2007).

Figura 2.4 Perfil esquemático de unidades fisiográficas entre los 23°-24°S, donde se identifica en un cuadro rojo la zona de estudio (modificado de Charrier, 1993).

Figura 2.5 Mapa topográfico de los Andes Centrales que muestra diferencias de relieve entre el Altiplano (Altiplano Basin), la Puna y la Depresión pre-andina (Atacama Basin) (Allmendinger, 1997).

Figura 2.6 Delimitación de cuencas de la Puna de Atacama; en amarillo, cuenca Salar de Aguas Calientes 2 (216); en naranja, cuenca Puntas Negras (218); en azul, cuenca Laguna Tuyajto (226); en rojo, cuenca Pampa Colorada (228); en verde, cuenca Pampa Las Tecas (229); y en lila, cuenca Salar El Laco (227), (modificada de PUC-DGA).

Figura 3.1 Toponimia sector cuencas piloto de la II Región de Chile, (red hidrográfica según, Coberturas digitales SIG, Dirección General de Aguas, 2007).

Figura 3.2 Mapa geomorfológico del sistema de cuencas piloto de la II Región de Chile.

Figura 3.3 Mapa esquemático del Complejo Volcánico de Los Andes Centrales enseñando la localización de los volcanes y sistemas de calderas, modificado de Schnurr, 2007.

Figura 3.4 Proceso de erosión denominado deflación. Las flechas negras indican la dirección del viento, tomado de Bailey et al, 2007.

Figura 3.5 Imagen satelital Google Earth del límite del sistema de cuencas piloto del norte: cuencas Salar de Aguas Calientes 2 y Puntas Negras.

Figura 3.6 Imagen satelital Google Earth del Salar de Aguas Calientes 2.

Figura 3.7 Imagen satelital Google Earth de la cuenca Puntas Negras. En esta cuenca, las unidades de relieve son las que definen a los límites de la cuenca.

Figura 3.8 Imagen satelital Google Earth del límite del sistema de cuencas piloto del sur: cuencas Laguna Tuyajto, Pampa Colorada, Pampa Las Texas, Salar El Laco.

Figura 3.9 Imagen satelital Google Earth de la cuenca Laguna Tuyajto.

Figura 3.10 Imagen satelital Google Earth de la cuenca Pampa Colorada.

Figura 3.11 Imagen satelital Google Earth de la cuenca Pampa Las Texas.

Figura 3.12 Imagen satelital Google Earth de la cuenca Pampa Las Texas.

Figura 4.1 Litología de la Puna de Atacama, modificado de las Hojas Toconao (Gardeweg y Ramírez, 1982) y Río Zapaleri (Ramírez y Gardeweg, 1985), escala 1:250.000.

Figura 4.2 Leyenda del mapa geológico (Figura 4.1) modificado de las Hojas Toconao (Gardeweg y Ramírez, 1982) y Río Zapaleri (Ramírez y Gardeweg, 1985), escala 1:250.000.

Figura 4.3 Bosquejo que indica distribución de volcanismo de arco y de trans-arco. En rojo, falla Calama – Olocapato – El Toro, triángulos muestran estrato-volcanes y centros ignimbríticos de la Puna; en cuadro amarillo, área de estudio, modificado de Matteini et al, 2002b.

Figura 5.1 Ubicación de pozos profundos > 100 en sector de cuencas piloto de la Puna de Atacama.

Figura 5.2 Ubicación de pozos con litoestratigrafía y mapa geológico de superficie de la Puna de Atacama, modificado de las Hojas Toconao (Ramírez y Gardeweg, 1982) y Río Zapaleri (Gardeweg y Ramírez, 1985), escala 1:250.000.

Figura 5.3 Ubicación de perfiles geofísicos TEM realizados a solicitud de Water Management Company (WMC) para el EIA Pampa Colorada (2007), por la empresa Geodatos Ltda.

Figura 5.4 Ubicación de Perfiles Lito-Estratigráficos construidos para el EIA Pampa Colorada.

Figura 5.5 Perfil esquemático cuencas Salar de Aguas Calientes 2 – Puntas Negras.

Figura 5.6 Perfil esquemático cuenca Laguna Tuyajto.

Figura 5.7 Perfil esquemático cuenca Pampa Colorada.

Figura 5.8 Perfil esquemático cuenca Pampa Las Tecas.

Figura 6.1 Precipitación media anual en las estaciones seleccionadas. El valor presentado para las estaciones PUC-DGA corresponde al año hidrológico (2007-2008).

Figura 6.2 Series de precipitación mensual para el período Noviembre 2007 – Octubre 2008, ordenada de acuerdo al año hidrológico (Oct-Sep), en las estaciones PUC-DGA de la II Región.

Figura 6.3 Mapa de Isoyetas de la Puna de Atacama, II Región de Chile. Fuente: [Elaboración PUC-DGA].

Figura 6.4 Red Hidrográfica de cuencas piloto de la II Región de Chile.

Figura 6.5 Estaciones meteorológicas con registros de evaporación seleccionada para el sistema piloto de la II Región.

Figura 6.6 Evaporación media mensual en las estaciones seleccionadas del sistema Piloto de la II Región.

Figura 7.1 Perfil hidrogeológico del sector norte del sistema de cuencas piloto.

Figura 7.2 Perfil hidrogeológico del sector sur del sistema de cuencas piloto.

Figura 8.1 Diagrama de Piper.

Figura 8.2 Diagrama de Stiff, a la izquierda el polígono grafica a los aniones, y a la derecha, los cationes.

Figura 8.3 Diagramas de Piper que comparan muestras con registro anión/catión completo (a la izq.) versus registro anión/catión completo más error de balance.

Figura 8.4 Sistema norte: a la izq, puntos de muestreo hidroquímico en sistema norte; a la der, todos los puntos catastrados.

Figura 8.5 Sistema sur: arriba, puntos de muestreo hidroquímico en sistema norte; abajo, todos los puntos catastrados.

Figura 8.6 Sistema norte: a la izq, puntos de muestreo isotópica en sistema norte; a la der, todos los puntos catastrados.

Figura 8.7 Sistema sur: arriba, puntos de muestreo isotópico en sistema norte; abajo, todos los puntos catastrados.

Figura 8.8 Niveles estáticos medidos en pozos de cuencas piloto.

Figura 8.9 Relación entre el contenido total de sales disueltas y la conductividad eléctrica.

Figura 8.10 Diagramas de Caja de pH, Conductividad y Temperatura.

Figura 8.11 Diagramas de Piper para el total de muestras de las cuencas piloto (arriba), total de muestras superficiales (abajo izq.), y total de muestras subterráneas (abajo der.).

Figura 8.12 Muestras hidroquímicas que se han utilizado para el análisis químico de elementos mayoritarios mediante diagramas de Stiff.

Figura 8.13 Diagramas de Stiff de las cuencas piloto de la II Región de Chile graficados sobre mapa litológico de las cuencas.

Figura 8.14 Simbología de Geología Superficial y Diagramas de Stiff de las cuencas piloto de la II Región de Chile. Los valores en paréntesis de las composiciones de agua, indican si los valores graficados han sido amplificados (X) o simpleficados (:).

Figura 8.15 Diagramas de Piper para el total de muestras de las cuenca Salar de Aguas Calientes 2 (arriba), muestras superficiales (abajo izquierda), muestras por sector (abajo medio) y muestras subterráneas (abajo derecha).

Figura 8.16 Diagramas de Stiff (izquierda), ubicación y tipo de muestras (derecha), correspondientes a la cuenca Salar de Aguas Calientes 2.

Figura 8.17 Diagramas de Piper para el total de muestras subterráneas de la cuenca Puntas Negras manteniendo igual color y diferente distintivo para indicar las diferentes profundidades de un mismo pozo (izquierda), y las muestras diferenciadas según su ubicación geográfica (derecha).

Figura 8.18 Diagramas de Stiff (izquierda), ubicación y tipo de muestras (derecha), correspondientes a la cuenca Puntas Negras.

Figura 8.19 Diagramas de Piper para el total de muestras de las cuenca Laguna Tuyajto (arriba), muestras superficiales (abajo izquierda), muestras por sector (abajo medio) y muestras subterráneas (abajo derecha).

Figura 8.20 Diagramas de Stiff (izquierda), ubicación y tipo de muestras (derecha), correspondientes a la cuenca Laguna Tuyajto.

Figura 8.21 Diagrama de Piper para el total de muestras subterráneas de la cuenca Pampa Colorada manteniendo igual color y diferente distintivo para indicar las diferentes profundidades de un mismo pozo.

Figura 8.22 Diagramas de Stiff (izquierda), ubicación y tipo de muestras (derecha), correspondientes a la cuenca Pampa Colorada.

Figura 8.23 Diagrama de Piper para el total de muestras subterráneas de la cuenca Pampa Las Tecas manteniendo igual color y diferente distintivo para indicar las diferentes profundidades de un mismo pozo.

Figura 8.24 Diagramas de Stiff (izquierda), ubicación y tipo de muestras (derecha), correspondientes a la cuenca Pampa Las Tecas.

Figura 8.25 Diagramas de Piper para el total de muestras de las cuenca Salar El Laco (arriba), muestras superficiales (abajo izquierda), muestras por sector (abajo medio) y muestras subterráneas (abajo derecha).

Figura 8.26 Diagramas de Stiff (izquierda), ubicación y tipo de muestras (derecha), correspondientes a la cuenca Salar El Laco.

Figura 8.27 Diagrama arsénico v/s conductividad eléctrica del agua.

Figura 8.28 Diagrama boro v/s conductividad eléctrica del agua.

Figura 8.29 Diagrama litio v/s conductividad eléctrica del agua.

Figura 8.30 Concentraciones de arsénico superficial (izquierda) y subterráneo (derecha) en el sistema de cuencas piloto de la II Región de Chile.

Figura 8.31 Concentraciones de boro superficial (izq.) y subterráneo (der.) en el sistema de cuencas piloto de la II Región de Chile.

Figura 8.32 Concentraciones de litio superficial (izquierda) y subterráneo (derecha) en el sistema de cuencas piloto de la II Región de Chile.

Figura 9.1 Línea Meteórica Mundial (Craig, 1961).

Figura 9.2 Relación $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$ en muestras hídricas de las cuencas piloto de la II Región de Chile.

Figura 9.3 Relación para un rango acotado de $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$ en muestras hídricas de las cuencas piloto de la II Región de Chile.

Figura 10.1 Dirección flujos superficiales y subterráneos. Las flechas rojas indican posibles flujos subterráneos.

Fotografía 2.1 Foto de Festuca Orthophylla, conocida localmente cómo paja brava, comúnmente identificado en sector de cuencas piloto.

Fotografía 2.2 Fotografía de bofedal tomada durante campaña de terreno 2008.

Fotografía 2.3 Fotografía de vicuñas curiosas tomada en la Puna de la II Región.

Fotografía 2.4 Fotografía de Tagua nadando en pequeña laguna en bofedal.

Fotografía 2.5 Fotografía de joven Atacameño conduciendo un grupo de llamas.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 CONSIDERACIONES GENERALES

La II Región de Antofagasta de Chile se extiende aproximadamente entre los 20°56' y 26°05' de latitud sur, y desde 67°00' de longitud oeste hasta el Océano Pacífico. Debido al crecimiento acelerado de la Región producto del desarrollo de múltiples proyectos mineros, agronómicos y turísticos, ésta se ha visto rápidamente enfrentada a un nuevo escenario, cuyo efecto principal ha sido, entre otros, el inminente incremento en las demandas del recurso hídrico. Este efecto se ha visto reflejado en las actuales solicitudes de derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas, solicitudes de áreas de exploración y de regularizaciones. Los proyectos en desarrollo se concentran principalmente en las zonas pre-andinas y altoandinas de la II Región, siendo esta última la zona donde se centra el presente estudio.

Para generar una idea del escenario actual, se destacan proyectos mineros de gran escala como Chuquicamata, La Escondida, La Exótica, Zaldívar, Radomiro Tomic, El Abra, Tuina, Salar de Atacama, Gaby, Ministro Hales (ex Mansa Mina), entre otras. Además, se debe tener en cuenta los incentivos existentes por parte de la Corporación Nacional del Desarrollo Indígena (CONADI), que año a año destina recursos para incentivar y potenciar el desarrollo productivo agrícola local por parte de la comunidad indígena local compuesta por los Atacameños. Por otra parte, el incremento en la demanda turística ha generado un notable aumento en las actividades hoteleras y gastronómicas, lo que tiene como efecto un aumento sustancial de la población flotante complementada con el aumento gradual de la población fija. Vale la pena mencionar el proyecto astronómico de instalación de 66 radiotelescopios denominado Proyecto ALMA (Atacama Large Millimeter Array), la que se encuentra en fase de instalación de antenas en el sector del Llano de Chajnantor, a unos 5.000 m s.n.m., al este del Salar de Atacama.

La dificultad de gestionar los recursos hídricos de la II Región se debe a la escasez de agua que presenta esta zona de clima semi-árido en el sector cordillerano. Las precipitaciones son escasas, estacionales y locales. Una fuente importante de recarga corresponde a las precipitaciones estivales, fenómeno conocido como invierno altiplánico o boliviano, que afecta principalmente al sector cordillerano, entre los meses de diciembre y marzo. Sin embargo, las altas tasas de evaporación estimadas para la zona, tienen como consecuencia una importante disminución en los volúmenes de agua que efectivamente escurren, o logran infiltrar y recargar los acuíferos.

El presente estudio se enmarca en el proyecto "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 " que realizó la Pontificia Universidad Católica de Chile (PUC) para la Dirección General de Aguas (DGA). El objetivo general del estudio fue implementar un programa de investigación acerca de los procesos geológicos, hidrológicos, hidrogeológicos, hidrogeoquímicos e isotópicos, que caracterizan las cuencas endorreicas presentes en la porción de la meseta altoandina chilena de las XV, I, II y III regiones del país. Esto permitió dar cuenta del estado actual del conocimiento del funcionamiento de estos sistemas de cuencas. La carencia de estudios orientados a conocer el funcionamiento hidrogeológico específico de las cuencas altiplánicas, en conjunto con la necesidad de mejorar y actualizar las metodologías de análisis hidrológicos, obligaron a avanzar en la definición de criterios y lineamientos de sustentabilidad que maneja la DGA en las decisiones de su competencia. Se complementó la información existente con nuevos estudios de terreno y gabinete lo que permitió generar un marco conceptual actualizado. El estudio permitió a la autoridad definir un criterio para la toma de decisiones en los diferentes aspectos relacionados con la administración de los recursos hídricos en esta zona. En una primera etapa, el proyecto se abordó desde una perspectiva regional, y en etapas posteriores se dirigió el estudio a una caracterización a escala local, para lo cual se eligieron cuencas piloto para cada región, de manera de caracterizar el funcionamiento de cuencas altiplánicas representativas de cada región.

El presente estudio se centró en las cuencas piloto escogidas para caracterizar el funcionamiento hidráulico altoandino de la II Región de Chile, específicamente las cuencas endorreicas: Salar de Aguas Calientes 2, Puntas Negras, Laguna Tuyajto, Pampa Colorada, Pampa Las Tepas y Salar El Laco ubicadas aproximadamente entre los paralelos 23°15'-24°05' S y los meridianos 67°15'- 67°45' W. Se escogieron estas cuencas piloto para representar a la II Región dado que son las que concentran la mayor cantidad de antecedentes, y son las que han generado mayor demanda.

En una primera etapa, el estudio se enfocó en caracterizar la geomorfología, geología, hidrología e hidrogeología del sistema de cuencas piloto, lo que se realizó en base al análisis de los antecedentes recopilados. De esta manera, se pudo conceptualizar la hidrogeología de las cuencas piloto lo que permitió caracterizar el medio donde se transporta y almacena el agua, aproximar la geometría de los acuíferos, identificar los principales mecanismos de recarga y descarga, entre otras. En una segunda etapa, se estableció un marco hidroquímico e isotópico actualizado y un análisis sobre su relación con la geología. Se planificó una campaña de muestreo, se establecieron protocolos

de muestreo de aguas, y se realizó un muestreo de aguas superficiales y subterráneas, las que fueron analizadas para aportar nuevos datos hidroquímicos e isotópicos. En este contexto, el estudio de la composición química del agua contribuyó al conocimiento y determinación de su origen, concentraciones, direcciones de flujo, determinación de conexiones subterráneas entre cuencas independientes, entre otros. El análisis de los isótopos Deuterio (^2H) y Oxígeno-18 (^{18}O) permitió determinar el origen de las aguas, los procesos previos a la infiltración, así como también las conexiones hidráulicas entre acuíferos. El estudio concluye con respecto al estado actual del conocimiento sobre el funcionamiento hídrico de los sistemas altoandinos de la II Región de Chile. Finalmente, se realizan recomendaciones para estudios posteriores.

El uso de los recursos hídricos provenientes de las zonas altoandinas debe considerar por una parte su importancia para el desarrollo económico y social del país, y de las regiones. Por otra parte, debe considerar la protección y cuidado de los sistemas ambientales sensibles que allí existen. En este sentido, es fundamental entender la extracción de aguas subterráneas y la gestión misma de los acuíferos como un proceso dinámico, tanto espacial como temporal. El uso sustentable del agua, la explotación, y en particular la exploración de los recursos hídricos, debe vincularse desde su origen a variables de interés ambiental y cultural de la zona.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivos generales

El objetivo general del presente estudio es caracterizar el funcionamiento hidráulico de las cuencas piloto de la Puna de la II Región de Antofagasta: Salar de Aguas Calientes 2, Puntas Negras, Laguna Tuyajto, Pampa Colorada, Pampa Las Tecas, Salar El Laco.

1.2.2 Objetivos específicos

Caracterizar el sistema de cuencas piloto en sus aspectos geomorfológicos, geológicos, e hidrológicos.

Integrar la información recolectada de manera de caracterizar la hidrogeología de las cuencas piloto, y definir las unidades acuíferas que componen al sistema.

Generar una base de datos hidroquímica e isotópica.

Realizar una campaña de muestreo de aguas superficiales y subterráneas, y analizarlas para elementos mayoritarios e isótopos, de manera de complementar la base de datos.

Definir un marco hidroquímico e isotópico actualizado para las aguas superficiales y subterráneas alojadas en los acuíferos del sistema de cuencas piloto, contemplando su evolución espacial y temporal en el sistema hídrico.

Analizar el conjunto de antecedentes expuestos lo que permite establecer el estado actual del conocimiento sobre el funcionamiento hidrogeológico generalizado de los sistemas altoandinos de esta región.

1.3 MÉTODO DE TRABAJO

1.3.1 Recopilación y revisión bibliográfica

Se realizó una recopilación bibliográfica de documentos con antecedentes de la zona de estudio delimitada por las cuencas piloto, y para las cuencas de la Puna en general. Los antecedentes se revisaron exhaustivamente, y se hizo una selección de la información relevante para este estudio en particular.

Se recurrió a trabajos de investigación publicados principalmente en libros especializados, revistas científicas, congresos, memorias y tesis, y documentos publicados por entidades gubernamentales, tales como el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) y la Dirección General de Aguas (DGA) del Ministerio de Obras Públicas.

1.3.2 Caracterización geomorfológica

La caracterización geomorfológica permite identificar las unidades de relieve tanto a escala regional como a escala local, de manera de conocer los rasgos morfológicos propios y característicos de la conformación de las cuencas hidrológicas en la Puna de Atacama.

La identificación de unidades geomorfológicas locales se realizó mediante el estudio e interpretación de imágenes satelitales Landsat ETM+ (NASA, 1999) y las provistas por Google Earth.

1.3.3 Geología de superficie

La geología de superficie describe a las diferentes unidades de roca y depósitos sedimentarios que se identifican en el sector de la Puna de Atacama donde se centra el estudio. Se generó un mapa geológico basado en la digitalización y unión de la Hoja Toconao (Gardeweg y Ramírez, 1982) y la Hoja Río Zapaleri (Gardeweg y Ramírez, 1985), de la Carta Geológica de Chile, escala 1:250.000.

El mapa geológico se dibujó utilizando el programa ArcMap 9.1 que permite, entre otras funciones, trazar las unidades geológicas en superficie mediante el método de unión de polígonos. El reconocimiento geológico de superficie se complementó con el estudio de imágenes satelitales Landsat ETM+ (NASA, 1999) y las provistas por Google Earth, lo que permitió identificar estructuras relevantes.

1.3.4 Geología de sub-superficie

Se efectuó un catastro de los pozos profundos construidos en las cuencas piloto, y luego se analizó la información lito-estratigráfica obtenida a partir de campañas de perforación pasadas. Se efectuó además una recopilación de los antecedentes geofísicos en la zona de estudio generalmente interpretados a partir de perfiles de resistividad eléctrica, que complementados a los perfiles geológicos construidos, permitió definir la composición y geometría de las unidades geológicas de sub-superficie.

El análisis de la geología de sub-superficie se realizó mediante la integración de datos en perfiles geológicos que fueron dibujados utilizando el software Adobe Illustrator CS2.

1.3.5 Caracterización hidrológica

Se caracterizó el clima de la zona, se realizó una estadística general de datos de precipitaciones, y se identificaron los escurrimientos. Los datos de precipitaciones se obtienen a partir de estaciones meteorológicas cercanas de la DGA.

Se dibuja la red de drenaje en base al análisis de imágenes satelitales provistas por Google Earth, las que se trabajan en conjunto con el programa ArcMap 9.1.

1.3.6 Caracterización hidrogeológica

Se caracterizó la hidrogeología de las cuencas piloto al definir las unidades acuíferas presentes en la zona delimitada por las cuencas piloto, su geometría, sus propiedades hidráulicas tales como la permeabilidad y la piezometría, además de identificar los principales mecanismos de recarga y descarga, en base al análisis conjunto de todos los antecedentes recolectados.

Los resultados se presentan en perfiles hidrogeológicos esquemáticos que fueron dibujados utilizando el software Adobe Illustrator CS2.

1.3.7 Nuevos datos hidroquímicos e isotópicos

Se diseñó una campaña de muestreo para elegir los puntos para extraer las muestras de agua prefiriendo sectores menos explorados, o datos puntuales que permitiesen corroborar hipótesis planteadas a partir de los antecedentes revisados. Para asegurar la validez de los nuevos datos, se generaron estrictos protocolos para la metodología de muestreo basados en estándares internacionales, y que tienen como objetivo principal, minimizar los errores del muestreo de aguas superficiales y subterráneas.

Se realizó una única campaña de terreno de visita al sector donde se emplazan las cuencas piloto, con una duración de 7 días, entre los días 25 y 31 de octubre del año 2008. La campaña se centró principalmente en recolectar muestras de agua superficial, prefiriendo las que pudieran retirarse a partir de vertientes y afloramientos, y muestras de agua subterránea, extraídas a partir de pozos profundos existentes, y mediante el método de extracción con beiler. Se realizó un reconocimiento geológico del terreno, verificando y validando las litologías, contactos, y estructuras principales.

El análisis químico de las muestras de agua recolectadas durante la campaña de terreno lo realizó el laboratorio de Análisis de Aguas y Riles del DICTUC. El análisis de isótopos estables lo realizó el laboratorio de la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN).

1.3.8 Marco hidroquímico e isotópico

Se efectuó un catastro de los antecedentes hidroquímicos e isotópicos de lagunas, ojos de salar, ríos, vertientes, manantiales, precipitaciones, y aguas subterráneas existentes en el sector donde se emplazan las cuencas piloto, generando así una completa base de datos para el sector del estudio.

Se realizó un análisis e interpretación del total de datos hidroquímicos e isotópicos. Los datos hidroquímicos mayoritarios se graficaron y analizaron mediante la generación de diagramas de Piper y Stiff, utilizando el software EasyKing que se distribuye gratuitamente a través de Universidad Politécnica de Cataluña. Los elementos minoritarios se plotearon en mapas de puntos escalados, y los datos isotópicos se plotearon y analizaron en gráficos que analizan la relación $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$.

1.4 ZONA DE TRABAJO: UBICACIÓN Y ACCESOS

La II Región de Antofagasta se extiende entre los 20° 56' y 26° 05' de latitud Sur y desde 67° 00' de longitud Oeste hasta el Océano Pacífico. La superficie, calculada por el Instituto Geográfico Militar, es de 126.049,1 kilómetros cuadrados. El presente estudio se centra en un área de aproximadamente 2.400 km², ubicado en el sector altoandino central de la II Región de Antofagasta, denominado Puna o Puna de Atacama, hacia el este

de la cuenca del Salar de Atacama, sobre los 3.800 m s.n.m. y cercano al poblado atacameño de Socaire (Figura 1.1).

Desde Antofagasta, la Ruta 5 bifurca en Carmen Alto a la Ruta 25, también pavimentada. Esta ruta atraviesa Sierra Gorda y culmina en Calama desde donde se debe empalmar la Ruta 23, pavimentada en su primer tramo, y que comunica con los pueblos San Pedro de Atacama, Toconao y Socaire, ubicadas en el margen oriental del Salar de Atacama. Finalmente, se debe continuar en dirección al este por caminos de bishufita y tierra, que parten en Socaire en dirección al paso fronterizo con Argentina denominado Paso Sico. En la Puna de Atacama, existen diversas huellas y caminos de tierra y sal que permiten aproximarse a los puntos de muestreo.



Figura 1.1 Vías de acceso a las cuencas piloto de la II región de Chile. En cuadrado negro, área de emplazamiento de las cuencas piloto. (fuente: Turistel).

Las cuencas endorreicas Salar de Aguas Calientes 2 y Puntas Negras, se ubican más al norte, las cuencas Salar Laguna Tuyajto, Pampa Colorada y Pampa Las Tecas al suroeste, y Salar El Laco al sureste (Figura 1.2). Las coordenadas geográficas del polígono que delimita estas cuencas son aproximadamente $23^{\circ}20' - 24^{\circ}05' S$ y $67^{\circ}20' - 67^{\circ}40' W$.

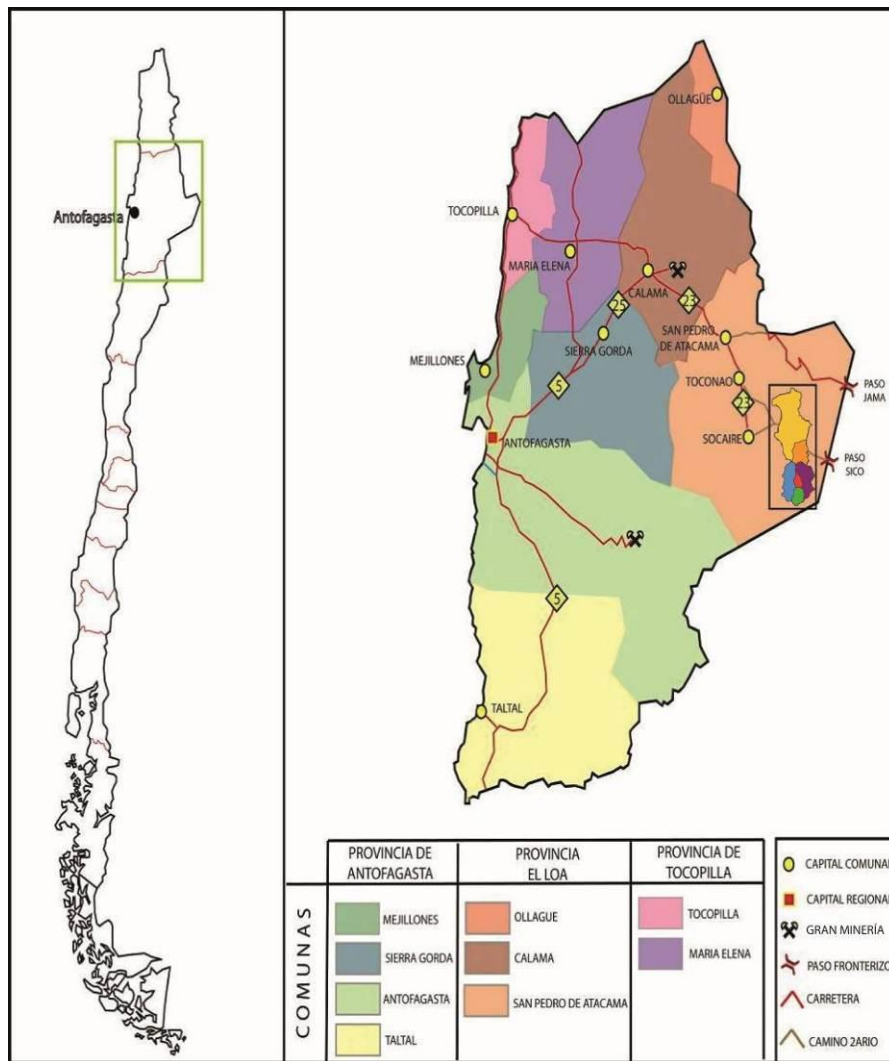


Figura 1.2 Geografía, ubicación y caminos principales del área de estudio y delimitación de cuencas piloto. En amarillo, Salar de Aguas Calientes 2; en naranja, Puntas Negras; en azul, Salar Laguna Tuyajto; en rojo, Pampa Colorada; en verde, Pampa Las Tecas, y en lila, Salar El Laco.

1.5 ESTUDIOS ANTERIORES

Dado que los recursos hídricos en la Puna de Atacama no han sido aún explotados, la disponibilidad de estudios hidrogeológicos para las cuencas es limitada. En terreno se identificaron un sin número de pozos profundos de exploración y pozos someros de observación, pozos de bombeo, punteras, estaciones meteorológicas, entre otras, las que pertenecen en su mayoría a empresas de minería privada, las que evidencian potenciales estudios que respaldan el interés de explotar el agua almacenada en este sector. Lamentablemente, cuesta acceder a estos datos, dado que a la fecha pocos de ellos se han hecho públicos a través de estudios de impacto ambiental o

publicaciones de entidades gubernamentales tales como la DGA o SERNAGEOMIN.

García et al. (1960) documentaron un primer reconocimiento geológico entre el Salar de Incahuasi y el cerro Zapaleri, y definieron tres secciones estratigráficas: una marina y continental de edad paleozoica, otra continental y probablemente terciaria, y lavas basálticas y andesíticas de edad Cuaternaria - Reciente.

Marinovic et al. (1976) realizaron un reconocimiento de la Alta Cordillera de la II Región, y dividieron los volcanes en tres series, de acuerdo con el grado de erosión de los conos. Complementaria a estas aproximaciones petrográficas, diversos autores realizan descripciones más detalladas de litología, definición de unidades, dataciones, reconocimiento de estructuras y estudios geoquímicos regionales, que se resumen y mejoran en la Hoja Toconao N° 54, del año 1982 y la Hoja Río Zapaleri N° 66, del año 1985, del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), en escala 1:250.000, de los autores Gardeweg y Ramírez. La escala de estudio de los trabajos geológicos en el sector es inapropiada para un estudio hidrogeológico acabado, sin embargo es suficiente como para identificar y caracterizar adecuadamente la litología y estratigrafía de las unidades de roca, principalmente volcánicas, que afloran en la Puna de Atacama.

En octubre del año 1993, se realizó el II Simposio Internacional de Estudios Altiplánicos, en la ciudad de Arica. Los objetivos de este Simposio fueron evaluar el conocimiento adquirido hasta esa fecha sobre la región altiplánica, definir las áreas de investigación y desarrollo más importantes, y fomentar la realización de proyectos de investigación cooperativos, interdisciplinarios e internacionales. Las grandes áreas temáticas del conocimiento cubiertas por este Simposio fueron: Ciencias de la Tierra y Minería, Clima y Recursos Hídricos, Ecosistemas Acuáticos, Recursos Edáficos, Flora, Fauna, Antropología y, Biomedicina y Fisiología de Altura.

Risacher et al. (1999) realizaron el estudio Geoquímica de Aguas en Cuencas Cerradas: I, II y III regiones de Chile, en donde hacen un estudio detallado para las cuencas altiplánicas que reciben agua, es decir, 53 lagos salados y salares. Este incluye análisis de la calidad de las aguas, balance hídrico de las lagunas e hidroquímica de las lagunas saladas. A partir de este estudio, se extraen datos para las cuencas Salar de Aguas Calientes 2, Laguna Tuyajto y Salar del Laco. En los estudios detallados para cada cuenca se encuentran antecedentes de composición, evolución y calidad de los

principales afluentes, un balance hídrico, el origen de las sales disueltas y las vías evolutivas en relación con la geología de las cuencas.

En el año 2007, la empresa Minera Escondida Limitada presentó un Estudio de Impacto Ambiental para un proyecto que consiste en la extracción de aguas subterráneas a partir de ciertas cuencas de la Puna de la II Región, para así abastecer los procesos productivos del Proyecto Pampa Colorada (EIA Pampa Colorada). Se han usado para el presente estudio, algunos antecedentes geológicos, hidrogeológicos, hidrogeoquímicos, entre otros, que fueron publicados en el momento que fue presentado el estudio de impacto ambiental.

La empresa Exploraciones, Inversiones y Asesorías Mundo S.A. (EMSA) ha llevado a cabo diversas campañas de exploración de agua subterránea desde el año 1998, incluyendo estudios geofísicos, perforación de pozos y pruebas de bombeo, con el fin de identificar y cuantificar recursos hídricos explotables. Los resultados de dichas campañas identifican un alto potencial hidrogeológico en acuíferos profundos asociados a formaciones de rocas volcánicas. Se ha podido obtener datos del estudio realizado para EMSA llamado "Disponibilidad de Recursos Subterráneos en el Sistema Tuyajto, II Región de Antofagasta", del año 2007. El sistema Tuyajto de este estudio, está compuesto por las cuencas Laguna Tuyajto, Pampa Colorada y Pampa Las Texas. Este estudio busca determinar con un alto grado de precisión, cual es la disponibilidad del recurso subterráneo en el Sistema Tuyajto, utilizando los procedimientos clásicos para investigaciones hidrogeológicas.

1.6 LIMITACIONES

Una limitación que tiene el estudio tiene relación con la dificultad de acceder a los antecedentes geológicos, geofísicos, hidrológicos e hidroquímicos que existen para esta zona en particular, y que pertenecen a la empresa privada.

La mayor parte del área se encuentra cubierta por extensos y potentes depósitos volcánicos compuestos por ignimbritas y lavas, las que dificultan el reconocimiento de estructuras de mayor edad, y la posibilidad de identificar acuíferos en unidades geológicas pre-miocenas.

Las descripciones litológicas de los cutting obtenidos a partir de la construcción de los pozos no son adecuadas como para correlacionarlas con

las unidades geológicas descritas en la superficie. No se tuvo la oportunidad de acceder a estos cutting con el objetivo de describirlos con mayor detalle.

La DGA no cuenta con estaciones pluviométricas o fluviométricas en la Puna de Atacama, por lo tanto no se cuenta con datos para precipitaciones, tasas de evaporación, escurrimiento para el sistema de cuencas piloto. Las variables deben ser estimadas a partir de datos obtenidos a partir de estaciones cercanas.

La campaña de recolección de datos hidroquímicos es única y de corta duración. Esto limita la cantidad de muestras a retirar y descarta la posibilidad de incorporar la variable temporal o estacional al análisis de datos nuevos.

Los accesos a sectores determinados de las cuencas piloto son complicados, razón por la cual no fue posible retirar muestras hídricas a partir de todos los puntos pre-establecidos.

2 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

2.1 CORDILLERA DE LOS ANDES

La Cordillera de los Andes es la cadena montañosa de Sudamérica que se extiende casi paralela a la costa del Pacífico, desde el cabo de Hornos hasta las proximidades de Panamá. Considerando que la Cordillera de Los Andes se extiende por casi 8.000 km a lo largo del margen occidental del continente sudamericano, es posible dividirla en los siguientes segmentos de norte a sur: Los Andes Septentrionales ($12^{\circ}\text{N} - 5^{\circ}\text{S}$), Los Andes Centrales ($5^{\circ}\text{S} - 40^{\circ}\text{S}$) y Los Andes Patagónicos o Australes ($40^{\circ}\text{S} - 55^{\circ}\text{S}$) (Jordan et al., 1983). La zona de estudio se ubica en los Andes Centrales (Figura 2.1) que, en particular, forma la región más grande y montañosa de la Cordillera de los Andes. Este segmento de cerca de 4.000 kilómetros de largo es también subdividido en tres partes: Andes Centrales del Norte ($5^{\circ} - 13^{\circ}\text{S}$, situados enteramente en Perú), el Oroclino Boliviano ($13^{\circ} - 28^{\circ}\text{S}$, desde el sur peruano y boliviano hasta el norte chileno y noroeste argentino), y los Andes Centrales del Sur ($28^{\circ} - 40^{\circ}\text{S}$, en Chile central y en el centro de Argentina occidental). Este estudio se localiza en la parte central de los Andes Centrales, es decir, en la zona curvada denominada Oroclino Boliviano (Figura 2.2).

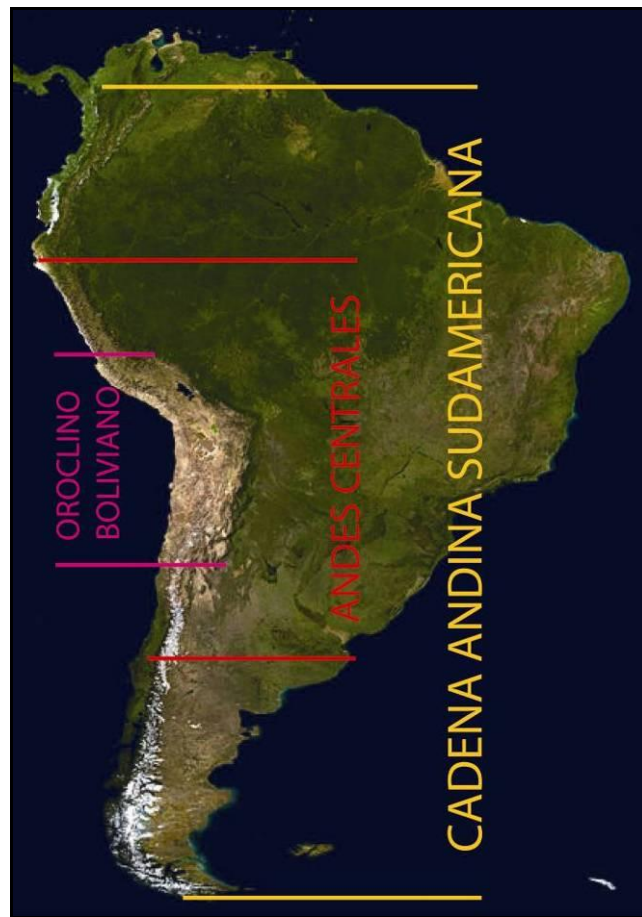


Figura 2.1 Segmento de los Andes Centrales y del Oroclino Boliviano, dentro de la extensión de la cadena Andina Sudamericana.

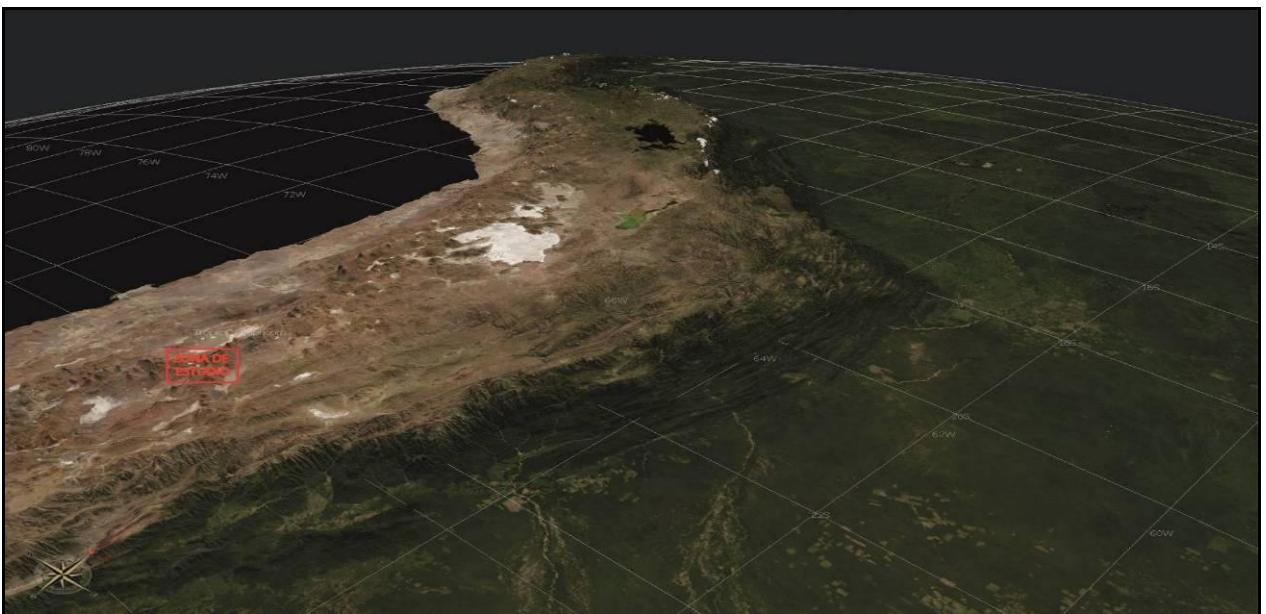


Figura 2.2 Imagen satelital que muestra la morfología del segmento del Oroclino Boliviano y la zona de estudio.

Cercano al paralelo 18°S, y recorriendo la cordillera de norte a sur, el rumbo característico NW-SE de Los Andes varía, y cambia su orientación preferencial a N-S. Es aquí donde se inicia la sección de los Andes Centrales. Se caracteriza por tener una geometría arqueada, donde la simetría se articula alrededor de un eje que pasa, al este, por la villa de Santa Cruz en Bolivia, y al oeste, sobre la caleta Loa. La cadena Andina central fue en gran parte desarrollada durante el ciclo orogénico Andino entre el Triásico y el Presente (Kley, 1999). El rasgo morfológico más importante que caracteriza a los Andes Centrales es la existencia de un plateau alto andino que al norte se denomina Altiplano y al sur se denomina Puna o Puna de Atacama, la que puede alcanzar alturas de hasta 4.200 m s.n.m.

2.2 UNIDADES FISIAGRÁFICAS REGIONALES

Se destacan en la II Región de Antofagasta, numerosas unidades fisiográficas de disposición aproximada norte - sur. Una sección entre los 20° - 28° permite reconocer 6 provincias morfogenéticas en el territorio chileno, que de oeste a este son: Cordillera de la Costa, Depresión Central, Cordillera de Domeyko, Depresión Pre-Andina, y Altiplano-Puna con el cordón volcánico en su borde occidental o Cordillera Occidental (Figura 2.3).

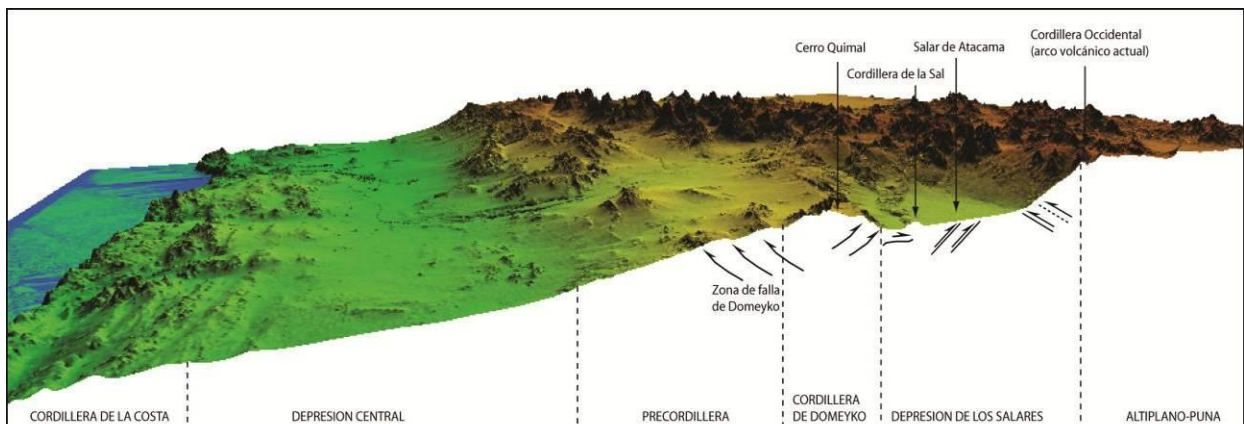


Figura 2.3 Perfil morfoestructural de la II Región de Chile, modificado de Moreno y Gibbons (2007).

Las cuencas piloto de la II Región de Chile se ubican en el borde occidental de la unidad altoandina, que a dicha latitud se denomina Puna de Atacama (Allmendinger et al., 1997). Estas se ubican en las cuencas intermontanas que se forman entre los altos topográficos de origen volcánico que componen la Cordillera Occidental en este sector (Figura 2.4). Los relieves volcánicos y sus respectivos depósitos, delimitan pequeñas cuencas endorreicas

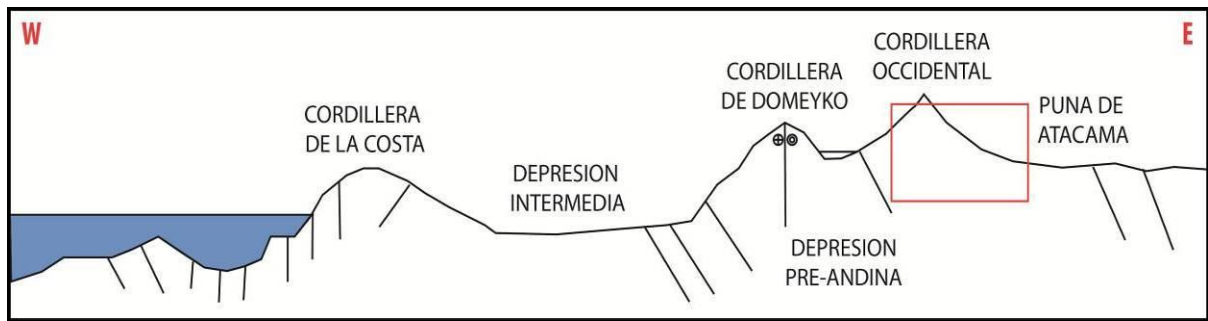


Figura 2.4 Perfil esquemático de unidades fisiográficas entre los 23°-24°S, donde se identifica en un cuadro rojo la zona de estudio (modificado de Charrier, 1993).

colindantes, algunas de las cuales presentan depósitos evaporíticos en sus áreas topográficamente más bajas. A continuación, se describen las unidades fisiográficas mencionadas que se relacionan con el sector de emplazamiento de las cuencas, y que son relevantes de caracterizar en un contexto geológico regional.

2.2.1 Cordillera occidental

El ciclo orogénico Andino abarca desde el Mesozoico al Presente y comprende una serie de arcos magmáticos que migran progresivamente hacia el este. Se han distinguido cuatro sistemas de arcos magmáticos: Jurásico a Cretácico Temprano; Cretácico Medio; Cretácico Tardío a Paleógeno; y Mioceno al Reciente (Coira et al., 1982; Reutter et al., 1988; Scheuber y Reutter, 1992). El volcanismo de arco actual se desarrolla en la Cordillera Occidental y describe a la actividad volcánica desarrollada durante el Mioceno - Reciente. Esta cordillera está constituida por un conjunto de edificios volcánicos que forman parte del Complejo Volcánico de los Andes Centrales (de Silva, 1989a).

El arco magmático actual describe una acentuada delimitación de un frente de estrato-volcanes. Este frente se extiende paralelo al margen oeste del continente sudamericano, a unos 200 - 250 km al este de la fosa Chile Perú (Isacks, 1988; Cahill y Isacks, 1992). Algunos ejemplares son Tata Sabaya y Parinacota (6.348 m), Tarapacá (5.850 m), Nevados de Payachata, San Pedro (6.145 m), Láscar (5.550 m), Socompa (6.051 m), Llullaillaco (6.739 m), Ollagüe (5.863 m), y el volcán más alto del mundo, Ojos del Salado (6.887 m).

2.2.2 Puna de Atacama

La característica fisiográfica de primer orden que se observa en los Andes Centrales, es la presencia del plateau altiplánico, el segundo más alto del mundo, después del Tíbet, y el más alto de origen no colisional (Isacks, 1988). Corresponde a una meseta que presenta alturas de 3.700 a 4.200 m s.n.m. Se extiende por unos 1.800 km en forma paralela al margen continental, y tiene un ancho que varía entre los 350 y 400 km. La meseta altoandina, se correlaciona espacial y temporalmente con el magmatismo de arco andino, pero su alzamiento se debe en primera instancia al engrosamiento cortical como respuesta al acortamiento horizontal de una litosfera de menor densidad y mayor temperatura. Sin embargo, dicho acortamiento en la superficie sólo justifica a un 70 – 80 % del engrosamiento cortical observado, sugiriendo que la adición magmática y otros procesos, tales como el adelgazamiento de la litosfera, hidratación del manto superior, o un underplating tectónico, podrían contribuir significativamente al engrosamiento (Allmendinger et al., 1997).

Conviene mencionar que la meseta altoandina de los Andes Centrales, se divide en dos secciones: una al norte de los 22°S que se denomina Altiplano, y otra al sur, que se denomina Puna. Esta diferencia se establece debido a que ambos segmentos presentan diferencias en sus características morfológicas, estructurales, en las edades de alzamiento, entre otras (Figura 2.5). A continuación se describen algunos de los rasgos morfológicos y geológicos que permiten diferenciar ambas unidades.

El alzamiento en la región del Altiplano comenzó hace unos 25 Ma, coincidiendo con un aumento en la tasa de convergencia y con la disminución del ángulo de subducción inferido; el alzamiento de la Puna comienza unos 5 – 10 Ma después (Allmendinger et al., 1997). Isacks (1988) propone un modelo de dos etapas para el desarrollo de la formación de la meseta. En una primera etapa, comienza el alzamiento, hace unos 25 Ma para el segmento del Altiplano, y hace unos 15 – 20 Ma para el segmento de la Puna. Esto ocurre durante un episodio de subducción de bajo ángulo a casi-subducción plana (Coira et al., 1993; Kay et al., 1995), que como consecuencia adelgaza, calienta y ablanda a la litósfera que subyace el área por alzarse. Para la segunda etapa, que comienza hace unos 12 – 6 Ma, el acortamiento cesa en el Altiplano y migra hacia el este, mientras que para la Puna continúa hasta hace unos 1 – 2 Ma (Allmendinger et al., 1997). En comparación al Altiplano, la Puna tiene una elevación promedio mayor, y una topografía más rugosa; la corteza de la Puna es más delgada (42–66 km vs. 62–80 km para el Altiplano, Yuan et al., 2002); y el acortamiento horizontal

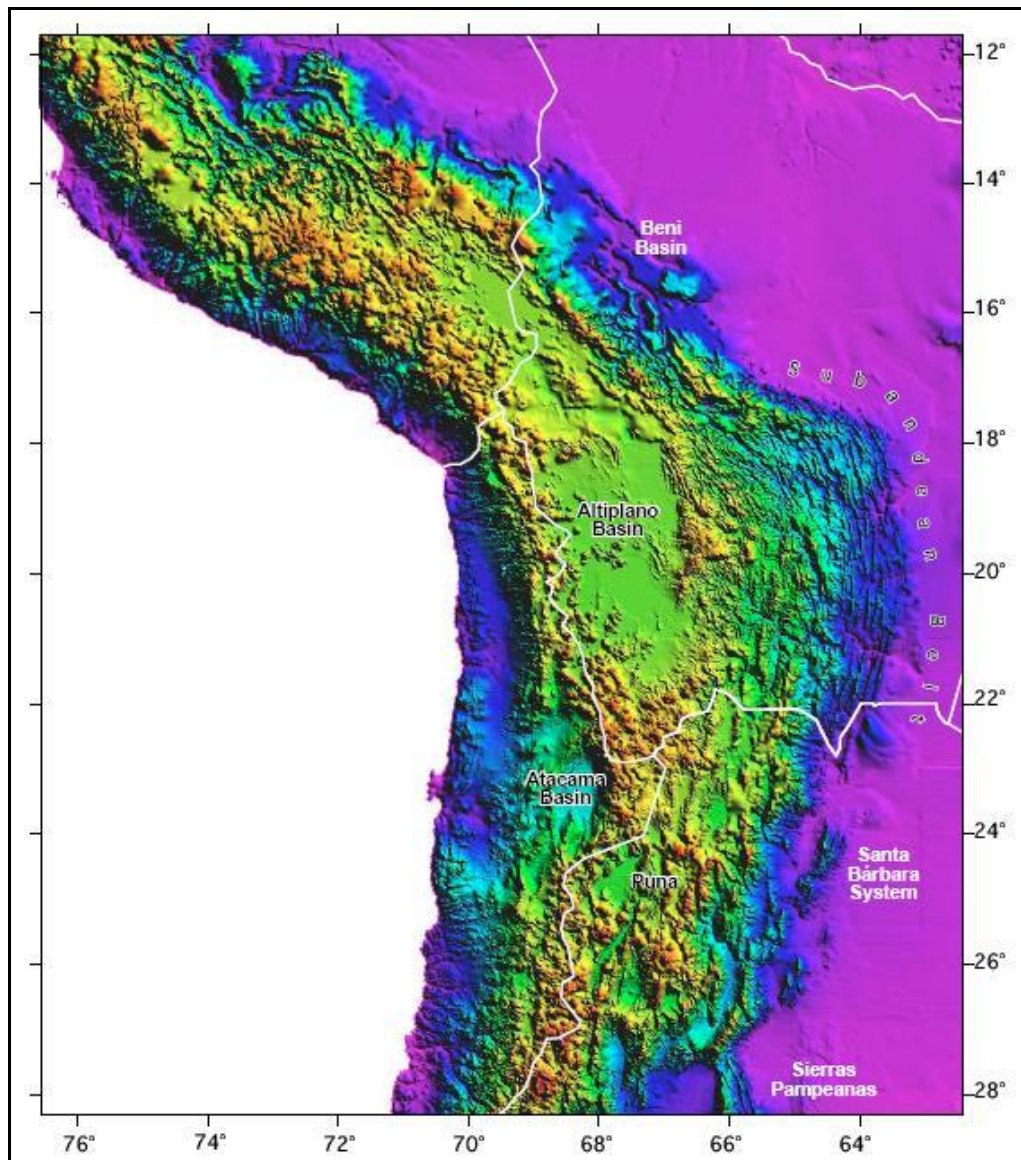


Figura 2.5 Mapa topográfico de los Andes Centrales que muestra diferencias de relieve entre el Altiplano (Altiplano Basin), la Puna y la Depresión preandina (Atacama Basin) (Allmendinger, 1997).

a lo ancho de la Puna es también menor. Esto sugiere que la gran elevación de la Puna, debe tener un soporte dinámico de un manto más buoyante y caliente, hechos que son consistentes con datos sísmicos (Whitmann et al., 1992), y es uno de los argumentos claves a favor de una delaminación de la litósfera, en el Cenozoico tardío, bajo la Puna (Kay y Kay, 1993; Kay et al., 1994a). Otra diferencia es que el Altiplano se limita al este por una ancha faja plegada y corrida de piel delgada, mientras que hacia el este de la Puna, encontramos una faja plegada y corrida de piel gruesa que forma el Sistema Santa Bárbara y las Sierras Pampeanas. Seggiaro y Hongn (1999) y Kley et al. (1999) enfatizan este contraste y su influencia en el estilo de deformación como también en la deformación del volcanismo cenozoico

tardío. Riller y Oncken (2003) también infieren una disminución progresiva de la edad del desarrollo del plateau hacia el sur, entre los 18°S a los 29°S, basado en las edades de la sedimentación que marcan el establecimiento de cuencas cerradas. Finalmente, existen diferencias en el ángulo de subducción de la placa de Nazca bajo las regiones altiplánicas del norte y sur, las cuales han sido bien establecidas, a través de datos sísmicos. Al norte de los 24°S, la placa de Nazca subduce con un ángulo entre los 25° y 30°, bajo el margen andino (Cahill y Isacks, 1992; Graeber y Asch, 1999; Gutscher et al., 2000) y el ángulo disminuye hacia el sur hasta alcanzar la región de "flat-slab" entre los 28° y los 33°S.

2.2.3 Cuencas endorreicas

Producto del régimen tectónico y volcánico que gobierna a los Andes Centrales, se generan las condiciones estructurales para que existan numerosas cuencas endorreicas con circulación restringida de sus aguas superficiales. El activo volcanismo producido por la efusión de lavas en el borde occidental de la unidad altiplánica, permite la formación de depresiones o pequeñas cuencas endorreicas, intra-montanas, situadas entre los aparatos volcánicos y a alturas cercanas a los 4.000 m s.n.m. Estas son formadas bajo condiciones climáticas áridas con gruesas acumulaciones evaporíticas y salinas, evidenciados en los numerosos salares y lagos que se distribuyen en las depresiones de la Puna de Atacama. La mayoría corresponde a cuencas de carácter endorreico, lo que indica que la descarga se produce principalmente por evaporación, y en menor proporción, por evapotranspiración.

El punto de descarga corresponde a lagos, salares o depresiones ubicadas en el punto topográfico más bajo de la superficie de la cuenca. Varias de estas cuencas presentan depósitos salinos denominados comúnmente salares. Los salares son un rasgo hidrográfico presente en gran parte de las cuencas endorreicas. Estos se forman producto de la acumulación de aguas en cuencas cerradas presentes en regiones áridas, donde la descarga por evaporación en el largo plazo, es mayor que la recarga por precipitación. Los salares están formados localmente por una fracción líquida correspondiente a salmueras, una fracción salina representada por la depositación de diferentes sales transportadas en solución a la cuenca, y una fracción sólida constituida por distintos niveles de arena, limo y arcilla. Predominan sales tales como cloruros, sulfatos, nitratos, boratos, entre otros. En el sistema de cuencas piloto, están los salares Aguas Calientes 2, Tuyajto, y El Laco, ubicados en las cuencas de igual nombre.

2.3 UBICACIÓN DE CUENCAS PILOTO

Actualmente, se han definido y delimitado 32 cuencas y sub-cuencas para el sector de la Puna de Atacama en la II Región de Antofagasta. Las cuencas hidrográficas que se han delimitado son las que reconoce la DGA para las decisiones de su competencia. El trazado que delimita cada una de las cuencas de este sector de la Puna, se puede observar en la (Figura 2.6). Se le ha dado un nombre propio y una numeración a cada una de las cuencas, lo que puede observarse en detalle en la Tabla 2.1.

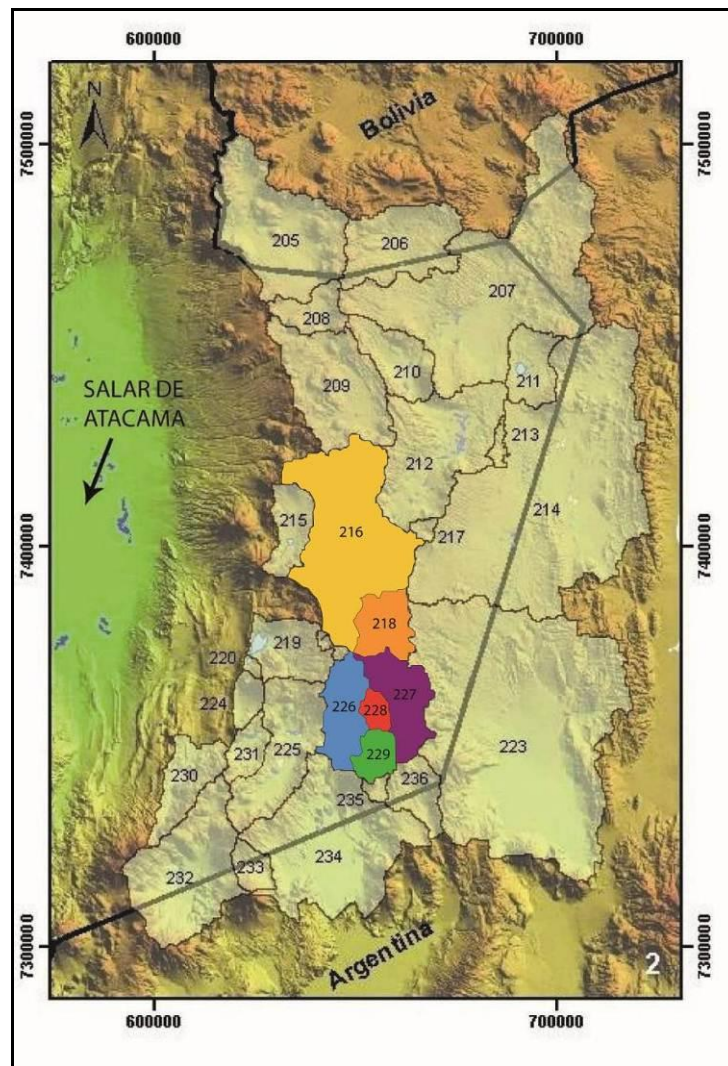


Figura 2.6 Delimitación de cuencas de la Puna de Atacama; en amarillo, cuenca Salar de Aguas Calientes 2 (216); en naranja, cuenca Puntas Negras. (218); en azul, cuenca Laguna Tuyajto (226); en rojo, cuenca Pampa Colorada (228); en verde, cuenca Pampa Las Tecas (229); y en lila, cuenca Salar El Laco (227), (modificada de PUC-DGA).

Tabla 2.1 Identificación de cuencas en la Puna de la II Región.

ID	Nombre	ID	Nombre
205	Laguna Verde	221	Sub-cuenca Miscanti
206	Laguna Blanca	222	Sub-cuenca A. Calientes 2
207	Salar de Tara	223	Salar del Rincón
208	Pampa La Bola y El Vallecito	224	Pampa Varela
209	Salar de Pujsa	225	Salar de A. Calientes 3
210	Salar de Aguas Calientes 1	226	Laguna Tuyajto
211	Laguna Helada	227	Salar del Laco
212	Salar de Quisquiro	228	Pampa Colorada
213	Sub-cuenca Salar de Jama	229	Pampa Las Tepas
214	Salar de Jama	230	Pampa de Tunco
215	Laguna Lejía	231	Salar de Capur
216	Salar de Aguas Calientes 2	232	Salar de Pular
217	Cerro Coquema	233	Laguna Aracar
218	Puntas Negras	234	Salar de Incahuasi
219	Laguna Miscanti	235	Sub-cuenca Laguna Jeche
220	Laguna Miñiques	236	Laguna Jeche

Fuente: [Elaboración PUC-DGA]

Dado que el tiempo destinado al proyecto no permite estudiar todas las cuencas y sub-cuencas por separado, se escogen 6 cuencas piloto y representativas, las que fueron caracterizadas y analizadas de manera de comprender el funcionamiento hidráulico de la Puna de la II Región de Atacama en general. Las cuencas piloto escogidas para cumplir con los objetivos descritos anteriormente son: Salar de Aguas Calientes 2, Puntas Negras, Laguna Tuyajto, Pampa Colorada, Pampa Las Tepas, y Salar El Laco.

2.4 VEGETACIÓN Y FLORA

La vegetación de la Puna de Atacama se desarrolla sobre el margen oriental del Desierto de Atacama, y ha sido descrita como la provincia biogeográfica de la Puna, denominado Estepa Alto Andina, la cual se extiende a través de la Cordillera de los Andes entre los 15° - 28° S (Udvardy, 1975). Se caracteriza fundamentalmente por cuatro tipos biológicos: plantas pulvinadas o en cojín, gramíneas cespitosas, pastos duros o coirones y arbustos de follaje bajo o tolar.

La vegetación identificada en el área de estudio se encuentra representada por tres formaciones vegetacionales, las que corresponden a pajonal, tolar, vega y bofedal, las que poseen las características que se describen a continuación.

Pajonal

Corresponde a extensas pampas arenosas dominadas por gramíneas llamadas comúnmente paja brava, no asociada a disponibilidad de agua en el suelo, sino más bien a precipitaciones estacionales (Villagrán et al., 1983). Es un excelente indicador de altura, ya que el pajonal aflora de manera absoluta sobre la cota de los 3.900 m s.n.m. En términos generales la mayor parte de la vegetación del área de estudio corresponde a una formación pajonal de altura inferior a 50 cm y cobertura que varía de muy escaso (5 - 10%) a claro (25 - 50%), en el cual como dominantes destacan *Jarava frigida* (coirón), *Festuca Orthophylla* (paja brava) (Fotografía 2.1), *Deyeuxia eminens* (waylla) y *Juncus articus* (junquillo) (EIA Pampa Colorada, 2007).

Tolar

En la zona de estudio, el tolar se corresponde con laderas, promontorios rocosos o zonas de escurrimiento superficial caracterizadas por la presencia de formas arbustivas bajas (Villagrán et al., 1983). En algunos sectores el pajonal se encuentra acompañado por especies arbustivas de altura inferior a un metro, destacando como dominantes *Mulinum crassifolium* (chukikaylla), *Adesmia* y *Parastrephia quadrangularis* (chacha-coba), entre otras (EIA Pampa Colorada, 2007).



Fotografía 2.1 Foto de *Festuca Orthophylla*, conocida localmente como paja brava, comúnmente identificado en sector de cuencas piloto.

Vega y Bofedal

En las regiones I y II de nuestro país, la presencia de un suministro constante de agua condiciona la existencia de sistemas vegetacionales característicos conocidos como vegas y bofedales. Estos corresponden a formaciones vegetacionales caracterizados por una condición hídrica permanente, ya sea superficial o subterránea. Presentan una gran diversidad biológica respecto al entorno, con un mayor número de especies vegetales propios de estos sistemas.

Los bofedales (**Error! Reference source not found.** 2.2) se producen cuando hay aguas corrientes con mayor concentración en oxígeno y menor concentración de sales, a diferencia de la mayor abundancia de aguas estancadas y salinas que desarrollan las vegas.

La flora se encuentra representada por un total de 101 especies, pertenecientes a 23 familias y 44 géneros. Los géneros más frecuentes en pampas y laderas son *Stipa*, *Maihueniopsis* y *Adesmia*, y en bofedales, *Scirpus*, *Potamogeton*, *Puccinellia* y *Stipia* (EIA, 2007). De acuerdo al listado del Libro Rojo de la Flora Terrestre, no se registran especies vegetales catalogadas en alguna categoría de conservación (Benoit, 1989).



Fotografía 2.2 Fotografía de bofedal tomada durante campaña de terreno 2008.

2.5 FAUNA

Estudios de la fauna de vertebrados dentro de la región, permiten reconocer algunas especies típicas de las formaciones vegetales que caracterizan al sector, como los artiodáctilos *Lama guanicoe* (Guanaco) y *Vicugna vicugna* (Vicuña) (Fotografía 2.3), y los roedores *Eligmodontia puerulus* (Laucha de la Puna), *Abrocoma cinerea* (Chinchilla) y *Lagidium viscacia* (Vizcacha), para la mastofauna.

La avifauna típica de la región incluye a especies de passeriformes de los géneros *Pterocnemis pennata* (Suri o Ñandú), *Geositta* (Minero), *Sicalis* (Jilguero) y *Phrygilus* (Cometocino), no obstante lo más característico son las aves acuáticas de los salares y lagunas altoandinas *Phoenicopus* y *Phoenicoparrus* (Flamencos Chileno, Flamencos Andinos y de James), *Fúlica ardesiaca* (taguas) (Fotografía 2.4) y diversas especies de patos. Entre la herpetofauna se pueden encontrar diferentes especies del género *Liolaemus* (lagartija), muchas de las cuales sólo se encuentran en esta región.

Se identifican 4 especies de mamíferos, 14 especies de aves, 2 especie de reptil y 16 especies de artrópodos (2 arácnidos, 1 escorpión y 13 insectos) (EIA Pampa Colorada, 2007). Del total de especies identificadas dentro del

área de estudio, se puede establecer que *Vicugna vicugna* (Vicuña) y *Lama guanicoe* (Guanaco), estarían dentro del listado de las especies en “peligro de extinción”. En el caso de *Lagidium viscacia* (Viscacha), *Larus serranus* (Gaviota Andina), *Chloephaga malanoptera* (Piuquén) y *Phoenicoparrus andinus* (ParinaGrande), estas se encuentran en categoría de “vulnerables” para la II Región (EIA Pampa Colorada, 2007).



Fotografía 2.3 Fotografía de vicuñas curiosas tomada en la Puna de la II Región.



Fotografía 2.4 Fotografía de Tagua nadando en pequeña laguna en bofedal.

2.6 POBLACIÓN

En la Puna de Atacama propiamente tal, la población es muy escasa y el único asentamiento humano estable corresponde al campamento del mineral El Laco donde habita el grupo familiar del cuidador y existe una avanzada de Carabineros de Chile. Existen asentamientos esporádicos de pastores en las localidades de Tara, Poquis, Aguas Calientes Norte, Léver y Mucar.

La actividad principal consiste en la crianza de ganado auquénido y caprino, que se desarrolla estacionalmente en los sectores antes mencionados (Fotografía 2.5). Más al oeste, y en el límite entre la Puna y la Depresión pre-Andina, la población se encuentra repartida en pequeños poblados que rodean la parte oriental del Salar de Atacama. Estos corresponden de norte a sur a: Toconao, Talabre, Cámar, Socaire y Peine. La actividad principal se relaciona con ganadería de ovinos, caprinos y auquénidos, chacarería y artesanía en piedra. Los recursos de agua dulce se restringen a Toconao, Talabre y Socaire, en tanto que en los demás poblados, el agua es ligeramente salobre.



Fotografía 2.5 Fotografía de joven Atacameño conduciendo un grupo de llamas.

3 CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA

3.1 GENERALIDADES

La importancia de definir y estudiar las cuencas hidrográficas se debe a que son la unidad básica e inicial del estudio del ciclo hidrológico. El presente capítulo, presenta una descripción fisiográfica de las cuencas de la Puna para el sector donde se emplazan las cuencas piloto. La caracterización está centrada en la descripción de los rasgos físicos de la superficie del territorio y de los fenómenos morfológicos de relieve que en ella se producen.

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

En la Figura 3.1 se presenta la toponimia del sector de estudio, con los nombres propios de cada unidad de relieve.

3.2 UNIDADES FISIAGRÁFICAS DE CUENCAS PILOTO

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

La Figura 3.2 permite identificar a las diferentes unidades morfológicas reconocidas para el sistema de cuencas piloto, las que se describen a continuación.

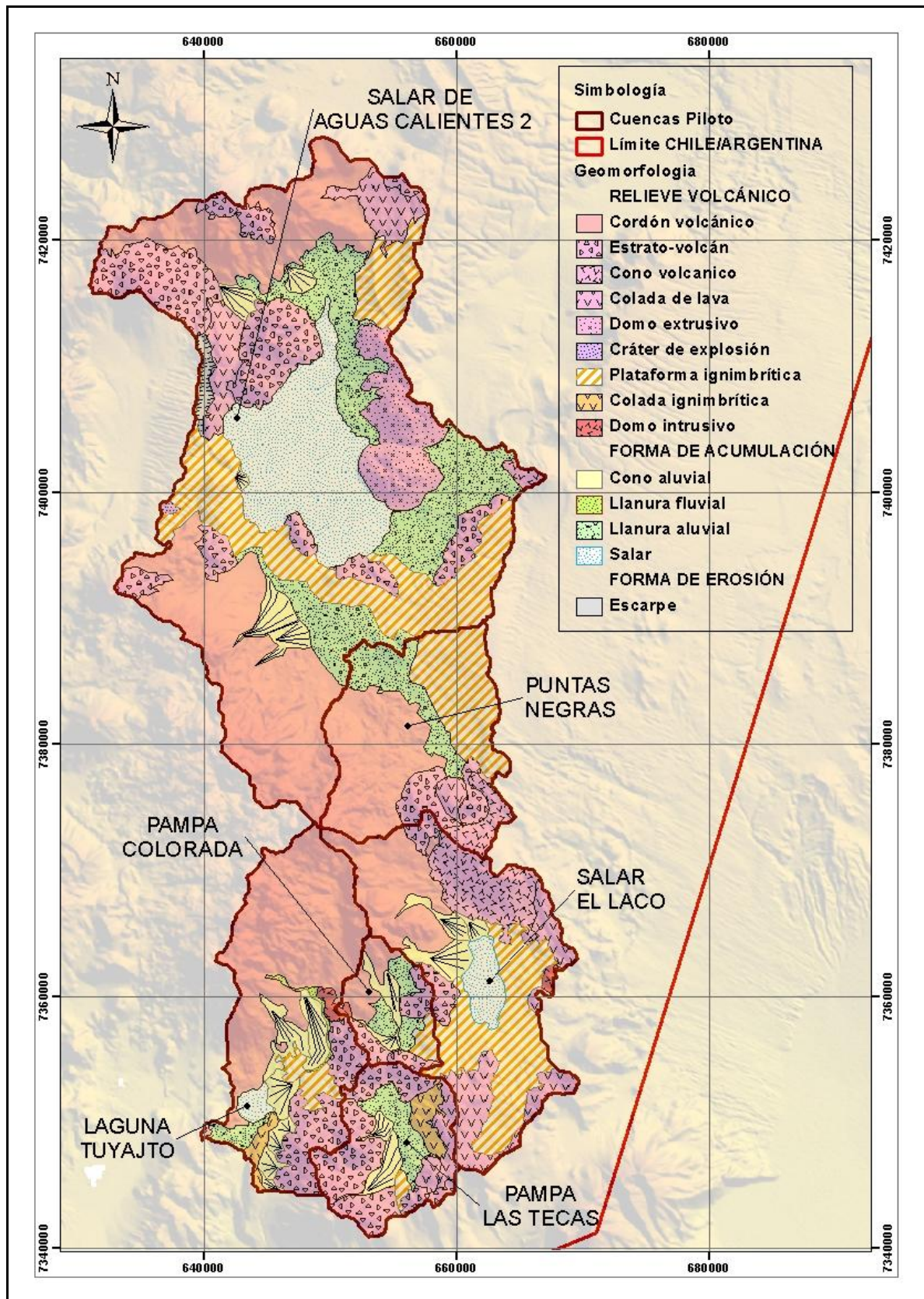


Figura 3.2 Mapa geomorfológico del sistema de cuencas piloto de la II Región de Chile.

3.2.1 Relieves volcánicos

Las cuencas endorreicas que componen al sistema piloto, se forman y se delimitan según la disposición de las diferentes unidades de relieve volcánico. Los relieves volcánicos son accidentes morfológicos, edificados con gran rapidez, y que construyen un relieve característico que permite la formación de las cuencas aisladas.

Cordón volcánico

Unidad de relieve mayoritariamente de acumulación, formado por el conjunto de materiales volcánicos y subvolcánicos. Abarca un conjunto de estratovolcanes, conos volcánicos, coladas de lava y domos. En el sistema de cuencas piloto, se identifican dos cordones volcánicos, el Cordón de Puntas Negras, hacia el norte, y el Cordón de Chalviri, más al sur. Ambos se disponen como una serie de centros eruptivos de orientación general WNW, ubicados en el sector occidental del sistema cuencas.

Estrato-volcán

Cuando las erupciones de lava alternan con la expulsión de materiales piroclásticos, se forman los denominados estratovolcanes o volcanes compuestos, consistentes en la superposición de capas en base a estos materiales sólidos, es decir, cenizas, coladas de lava y otras materias. Para su formación se requiere de un largo periodo de actividad eruptiva o la repetición de numerosas erupciones en un área restringida. Los mejores ejemplares de la zona de estudio son los volcanes Aguas Calientes (5.924 m s.n.m.), Pili (6.046 m s.n.m.), y Puntas Negras (5.852 m s.n.m.).

Cono volcánico

Un cono piroclástico es un cono volcánico que se levanta a partir de fragmentos volcánicos sueltos de tamaño ceniza (pómez, piroclastos, tefra). El edificio volcánico se construye a partir de la eyección y acumulación de coágulos de partículas y burbujas de lava eyectados a través de un conducto único. A medida que la lava rica en gases es expulsada violentamente hacia la atmósfera, esta se rompe en pequeños fragmentos que solidifican y decantan como ceniza alrededor del cráter, formando así un cono circular u ovalado. La mayoría de los conos piroclásticos tienen en la cima un cráter con forma de tazón. Los conos de ceniza raramente superan los 500 -750 m de potencia, y como son depósitos no-consolidados, tienden a ser vulnerables a la erosión. Se identifica un cono que aflora principalmente en la cuenca Salar El Laco, y denominado cerro Overo.

Domo volcánico

Los domos volcánicos son cuerpos sub-redondeados compuestos por acumulaciones de rocas incandescentes muy densas y viscosas que no son expulsadas como coladas de lava, sino que se acumulan en cuanto extruyen, formando peñascos inestables que luego se derrumban. Los domos del sector resisten por más tiempo a la intemperie debido a su composición vitrofírica (Gradeweg y Ramírez, 1985). Los mejores ejemplares reconocidos en el sistema de cuencas piloto, son el conjunto de domos de orientación N-S, ubicados hacia el costado oriental del Salar de Aguas Calientes 2. Corresponden, de norte a sur, a los cerros Bola, Purifican, Arenoso, Chivato Muerto y Chamaca.

Colada de lava

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

Colada ignimbrítica

Las coladas ignimbríticas son rocas que se generan a partir de flujos piroclásticos densos con un alto contenido en fragmentos magmáticos juveniles y que se emplazan a temperatura elevada. Las ignimbríticas se generan por colapsos de las columnas eruptivas en las erupciones plinianas, y en el de domos y coladas lávicas de viscosidad elevada. De acuerdo a la temperatura del flujo en el momento de su detención se distinguen ignimbríticas soldadas o no soldadas. Las coladas rellenan las depresiones morfo-estructurales y se disponen formando extensas mesetas inclinadas, como en el sur de la cuenca Laguna Tuyajto, o hacia el este de la cuenca Pampa Las Tecas.

Plataforma ignimbrítica

En la Puna de Atacama, los depósitos ignimbríticos se disponen formando extensas mesetas inclinadas entre 1° y 4° , preferentemente hacia el este. Se las reconoce formando delgadas "mesas" sobre unidades menos resistentes a la erosión, o adosadas a relieves positivos (Gardeweg y Ramirez, 1985). Esta unidad se compone principalmente por las mesetas ignimbríticas Cordón Alto de Toro Blanco, Alto de Lari, Alto de Caballo Muerto, Loma La Cantera y Loma Las Torres.

Domo intrusivo

Son afloramientos rocosos cristalinos, de carácter intrusivo, que dan forma a domos lisos y rocosos. La pendiente de estos domos es alta, y tienen forma parabólica. Se reconoce un afloramiento rocoso de carácter intrusivo en el límite entre las cuencas Laguna Tuyajto y Pampa Colorada.

Caldera

El término caldera lo define Williams (1941) como "una depresión volcánica grande, más o menos circular o en forma de círculo". Este es un rasgo geomorfológico generalmente más grande que un cráter volcánico, y la mayoría de las calderas son producto de hundimiento, o colapso. Smith y Bailey (1968) también definen el término de caldera resurgente, que define a una caldera donde el bloque hundido después de la subsidencia inicial, ha sido levantado, generalmente en la forma de un domo estructural. El domo estructural puede estar fracturado radialmente o concéntricamente, o ambos. Las calderas resurgentes comúnmente exhiben volcanismo resurgente o post-resurgente a lo largo de las fracturas anulares o a lo largo de las fracturas dentro del domo estructural.

La concentración miocena a pliocena de las calderas que componen el Complejo Volcánico Altiplano-Puna (CVAP) (de Silva, 1989) son por lejos una de las provincias ignimbríticas eruptivas más grandes en el mundo (Schnurr et al., 2007) (Figura 3.3). La zona de estudio se caracteriza por presentar sendos depósitos ignimbríticos asociados a erupciones provenientes de la caldera La Pacana. La caldera La Pacana es de gran relevancia en el sector norte del estudio, particularmente donde se emplaza la cuenca Salar de Aguas Calientes 2, que coincidiría con el cráter de la caldera (Gardeweg y Ramírez, 1987; Lindsay et al., 2001a, b; Schmitt et al., 2001, 2002) (Figura 3.3).

Gardeweg y Ramírez (1987) definen una caldera elíptica, con un tamaño de unos 60 x 35 km, con el eje mayor orientado N-S. El margen topográfico está bien definido hacia los costados este, sur y oeste, y se describen como acantilados compuestos por unidades pre-caldera, que son cubiertas por los depósitos de la Ignimbrita Atana, alcanzando relieves de hasta 1.000 m de espesor, por sobre la depresión topográfica de la caldera. El cordón La Pacana es un elongado domo resurgente de tobas intra-caldera, que ocupa un 25% del área que se ubica dentro de la depresión topográfica. Se identifican diversos domos andesíticos y dacíticos, de edades que varían entre los 2.7 – 4.8 Ma, que se reconocen a lo largo del margen del domo resurgente, y que se corresponden con depósitos que se clasifican como pre- y post-caldera (Gardeweg y Ramírez, 1987; Lindsay et al., 2001a, b). Las



Figura 3.3 Mapa esquemático del Complejo Volcánico de Los Andes Centrales enseñando la localización de los volcanes y sistemas de calderas, modificado de Schnurr, 2007.

áreas relativamente planas que se ubican entre el domo resurgente y el margen topográfico se definen como el foso de la caldera. Es una cuenca irregular de unos 2 – 10 km de ancho, que rodea al domo resurgente en sus flancos oeste, sur y este. El foso está parcialmente relleno por depósitos sedimentarios que derivan de la misma erosión del domo resurgente y de las paredes de la caldera, y por rocas volcánicas post-caldera. Las partes más

bajas del foso son ocupadas por salares, en donde se han depositado sedimentos aluviales, lacustres y evaporíticos (Gardeweg y Ramírez, 1987).

3.2.2 Relieves de acumulación

Los relieves de acumulación dependen de dos procesos denominados degradación y agradación. Degradación se refiere a la destrucción del relieve mediante la meteorización de las rocas, erosión de los suelos y movimientos de tierras. Los agentes externos como la precipitación, la escorrentía, el hielo, el viento y el oleaje hacen posible la degradación. Dichos agentes contribuyen a su vez con el transporte de materiales de unos lugares a otros para determinar la agradación, que corresponde a la acumulación de sedimentos que como consecuencia permite la construcción de otros relieves.

Conos aluviales

Los conos aluviales se reconocen por su forma en abanico, y son formados producto de los cauces torrenciales que se originan con los deshielos, que transportan a los sedimentos que provienen desde las altas cumbres del cordón volcánico, y que descienden en dirección a la llanura aluvial. Siendo que la pendiente disminuye drásticamente en las zonas bajas de las cuencas, la velocidad del agua disminuye, es incapaz de seguir transportando a los materiales, y por lo tanto deposita a los sedimentos en la zona terminal del abanico. Estos abundan en el sistema de cuencas piloto, especialmente en el sector sur del sistema, compuesto por las cuencas Laguna Tuyajto, Pampa Colorada, Pampa Las Tecas, y Salar El Lago.

Llanura fluvial

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

Llanura aluvial

Es el relieve sedimentario formado por el aporte de la erosión que rebaja las altas cumbres, y que mediante los cursos de agua o a través de procesos

gravitatorios, deposita material detrítico en las depresiones de la cuenca. Es común que en esta zona se distingan grandes conos aluviales superpuestos a estas zonas de baja pendiente. Su composición heterogénea y clástica, les confiere un alto potencial hidrogeológico, puesto que la mayor parte de las recargas acuíferas suelen infiltrarse en estas zonas, como ocurre en todas las cuencas que componen al sistema piloto. Es por este motivo, que suelen tener una red de drenaje poco desarrollada o ausente.

Salar

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

Erosión eólica

Las plataformas ignimbríticas contienen una gran cantidad de estructuras lineares y curvilíneas, que se identifican como canales o ridges. Se asume que los ridges lineares son formaciones típicas que se deben a la erosión eólica, mientras que los canales más sinuosos corresponden a ambientes fluviales. Los patrones distintivos más encontrados corresponden a estructuras lineares, orientadas NW –SE. Esto sugiere que la erosión eólica se complementa con procesos de erosión fluvial para dar forma al relieve observado (Bailey et al, 2007). A pesar del clima semi-árido que se reporta actualmente para la región, no se debe subestimar el rol de flujos de agua en la confección del relieve, considerando las épocas desde que se emplazan los depósitos ignimbríticos. La orientación preferencial de las estructuras NW – SE puede implicar algo más que condiciones de formación y/o propiedades superficiales de las ignimbritas. Los mecanismos de enfriamiento de la roca inciden en la formación de uniones de planos de enfriamiento dentro de la extensión de las ignimbritas, lo que provee de potenciales planos de debilidad a escalas menores que regionales. Se ha sugerido que estos planos de debilidad pueden influir en la alineación penetrante NW – SE de los caracteres derivados por efecto del viento (Bailey et al, 2007). Estudios del clima actual indican que la dirección del viento proviene predominantemente desde el NW (Das et al., 1998). La erosión eólica es muy activa debido a lo estéril y carente de vegetación que es el paisaje de la Puna. Si el viento mantiene una dirección constante, puede tener un efecto distintivo en el paisaje, esculpiendo estructuras lineares y paralelas (Whitney, 1978). Los vientos constantes pueden también rebajar la superficie al remover el material más fino y menos consolidado.

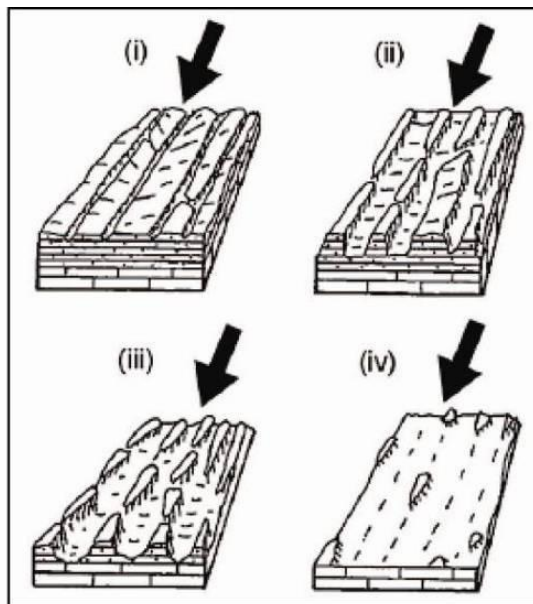


Figura 3.4 Proceso de erosión denominado deflación. Las flechas negras indican la dirección del viento, tomado de Bailey et al. (2007).

3.3 GEOMORFOLOGÍA DE CUENCAS PILOTO

Las cuencas se caracterizan por presentar altos gradientes topográficos entre las cumbres volcánicas que definen sus límites y las partes bajas, caracterizadas por acumulaciones sedimentarias que en algunas ocasiones presentan lagunas y/o salares. Producto de la escasez de precipitaciones y la consecuente ausencia de ríos permanentes, las formas de erosión son restringidas a plataformas volcánicas que por litología no favorecen la incisión fluvial y la consecuente formación de quebradas. Se distinguen más bien, formas de acumulación tales como conos aluviales y de derrubios, que en sus zonas terminales acumulan extensas llanuras aluviales. Además de la erosión pluvial, fluvial y eólica, se deben considerar los efectos de la meteorización química que produce la alteración hidrotermal. El aporte de detritos asociado a estos procesos ha generado depósitos antiguos y recientes, cuya morfología se ha conservado gracias a la aridez del clima. A continuación, se describen los elementos geomorfológicos principales que se identifican en cada cuenca piloto. Utilizando Modelos de Elevación Digital (DEM) del USGS, se determinaron las características morfométricas de cada una.

El norte del sistema de cuencas piloto se compone por las cuencas Salar de Aguas Calientes 2 y Puntas Negras (Figura 3.5).

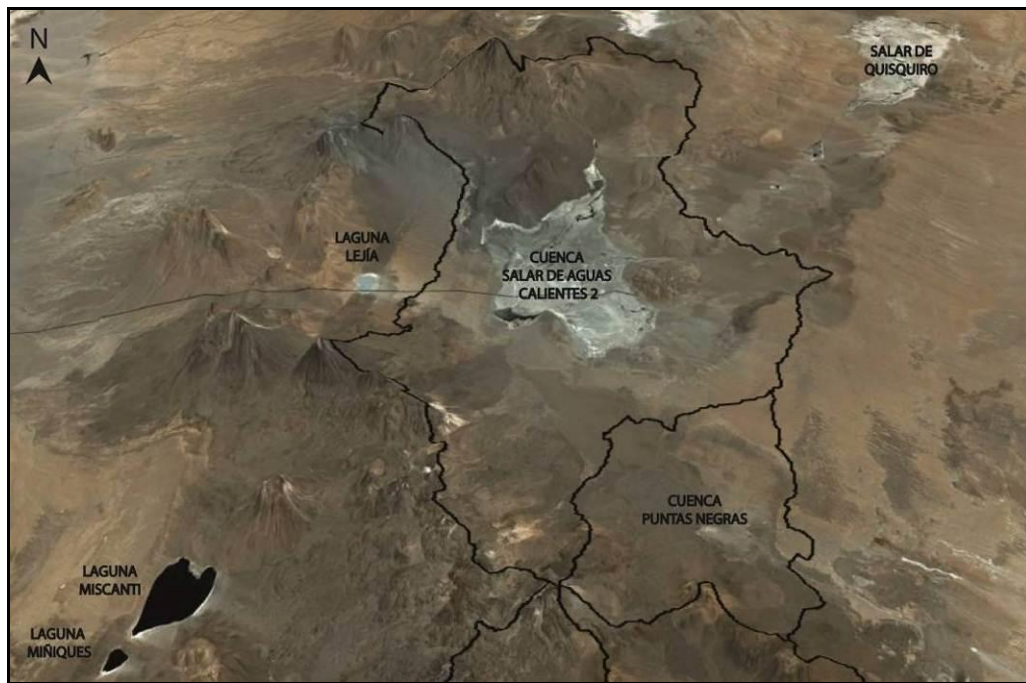


Figura 3.5 Imagen satelital Google Earth del límite del sistema de cuencas piloto del norte: cuencas Salar de Aguas Calientes 2 y Puntas Negras.

El sistema sur de cuencas piloto se compone por las cuencas Laguna Tuyajto, Pampa Colorada, Pampa Las Tecas, y Salar El Laco (Figura 3.6).

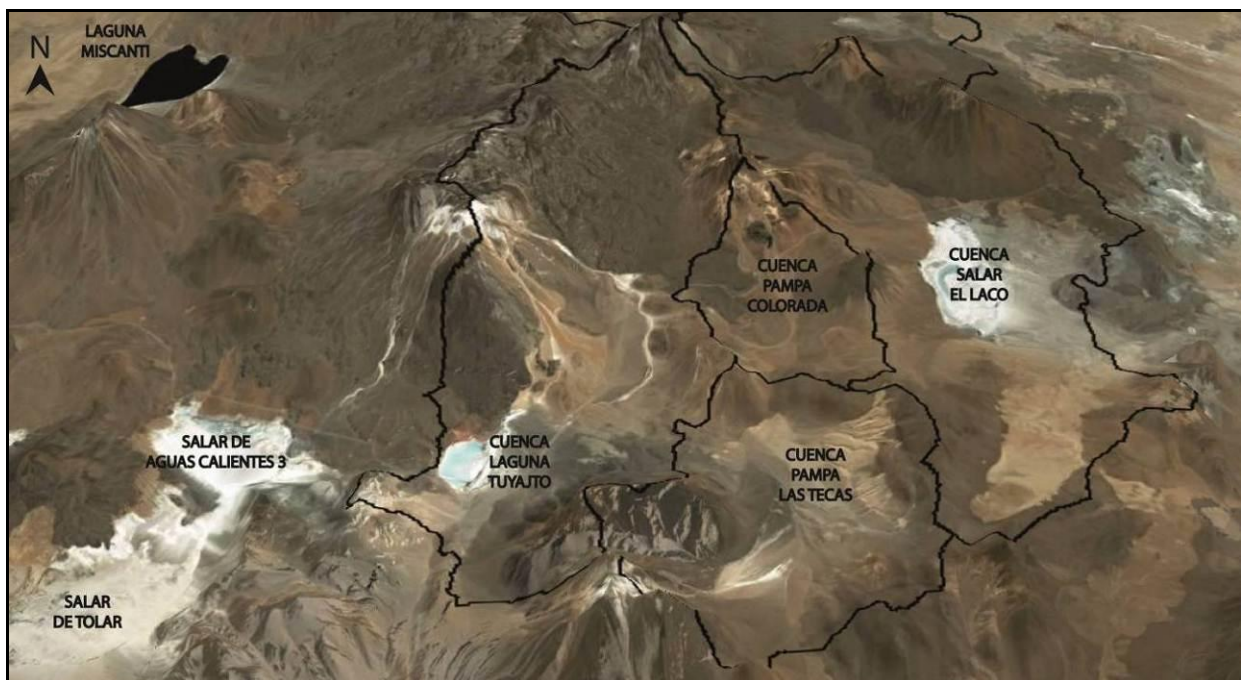


Figura 3.6 Imagen satelital Google Earth del límite del sistema de cuencas piloto del sur: cuencas Laguna Tuyajto, Pampa Colorada, Pampa Las Tecas, Salar El Laco.

3.3.1 Geomorfología cuenca Salar de Aguas Calientes 2

La hoya hidrográfica del salar de Aguas Calientes 2 (Figura 3.7) tiene forma ovalada y orientación N-S. Es la cuenca de mayor área de las cuencas piloto, con una superficie de 975 km² y un perímetro de 234 km. La cuenca se caracteriza por albergar un salar, de igual nombre, y área de 128 km². Este se encuentra centrado en la cuenca y se alimenta superficialmente a partir de tres vertientes puntuales que afloran en los extremos noroeste, norte y noreste del salar, y a partir de vertientes y afloramientos difusos en los extremos suroeste y sureste del salar.

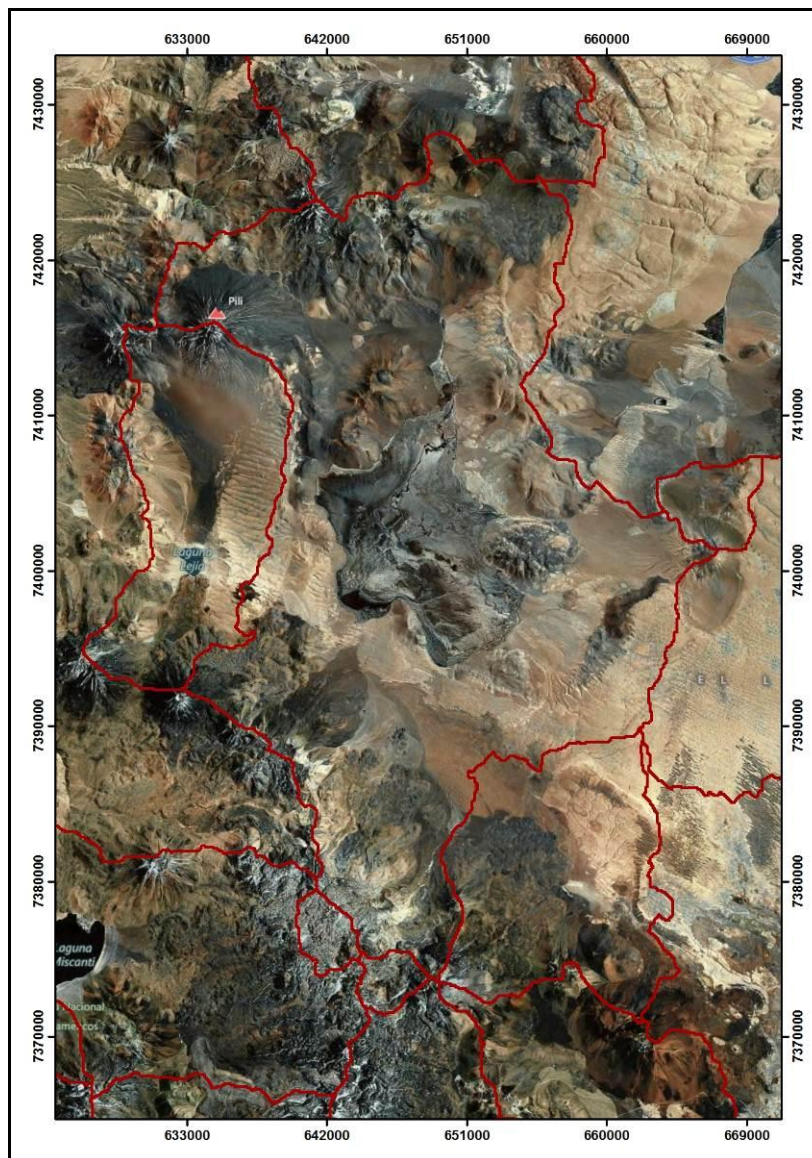


Figura 3.7 Imagen satelital Google Earth del Salar de Aguas Calientes 2.

Las unidades de relieve volcánico que definen los límites de la cuenca son: el Cordón de Puntas Negras, que define el límite suroeste; los estrato-volcanes volcán Aguas Calientes y volcán Pili (cerro Acamarachi, o Caracol de Piedra, en Aymara) hacia el noroeste; y el cordón Alto de Toro Blanco, una plataforma ignimbrítica que define el límite occidental con la cuenca Laguna Lejía. El límite oriental lo definen una cadena de domos volcánicos, de orientación N-S, compuesta por los cerros Purifican, Arenoso, Chivato Muerto y Chamaca. Se identifican pequeños conos aluviales que se originan en las partes altas de los afloramientos volcánicos que circundan al salar y cuyas fases terminales son abanicos aluviales perfectos, que coinciden con los márgenes del salar. La mayor elevación de la hoya del salar de Aguas Calientes 2 corresponde al volcán Pili, con 6.046 m s.n.m., mientras que la menor corresponde al sector central del salar, con 4.165 m s.n.m. La altura media de la cuenca es de 4.562 m s.n.m.

Tabla 3.1 Características morfométricas de la cuenca Salar de Aguas Calientes 2

Superficie cuenca	975 km ²
Pendiente media	14,95%
Altura máxima	6.046 m s.n.m.
Altura media	4.562 m s.n.m.
Altura mínima	4.165 m s.n.m.
Rango	1.881 m
Superficie del salar	128 km ²

3.3.2 Geomorfología cuenca Puntas Negras

La cuenca Puntas Negras (Figura 3.8) tiene forma redondeada. Abarca una superficie de 201 km², encerrada en un perímetro de 90 km. Se caracteriza por limitar al sur y oeste con depósitos volcánicos del Plioceno y Cuaternario, y al norte y este con las ignimbritas Atana, Pampa Chamaca y Tuyajto. Los productos de la erosión aluvial, fluvial y eólica de todos los afloramientos mencionados, se transportan y depositan en la parte más baja de la cuenca, donde se desarrolla una relativamente potente llanura aluvial. Esta unidad de relleno se encuentra a unos 4.355 m s.n.m., coincidiendo con la altura más baja de la cuenca.

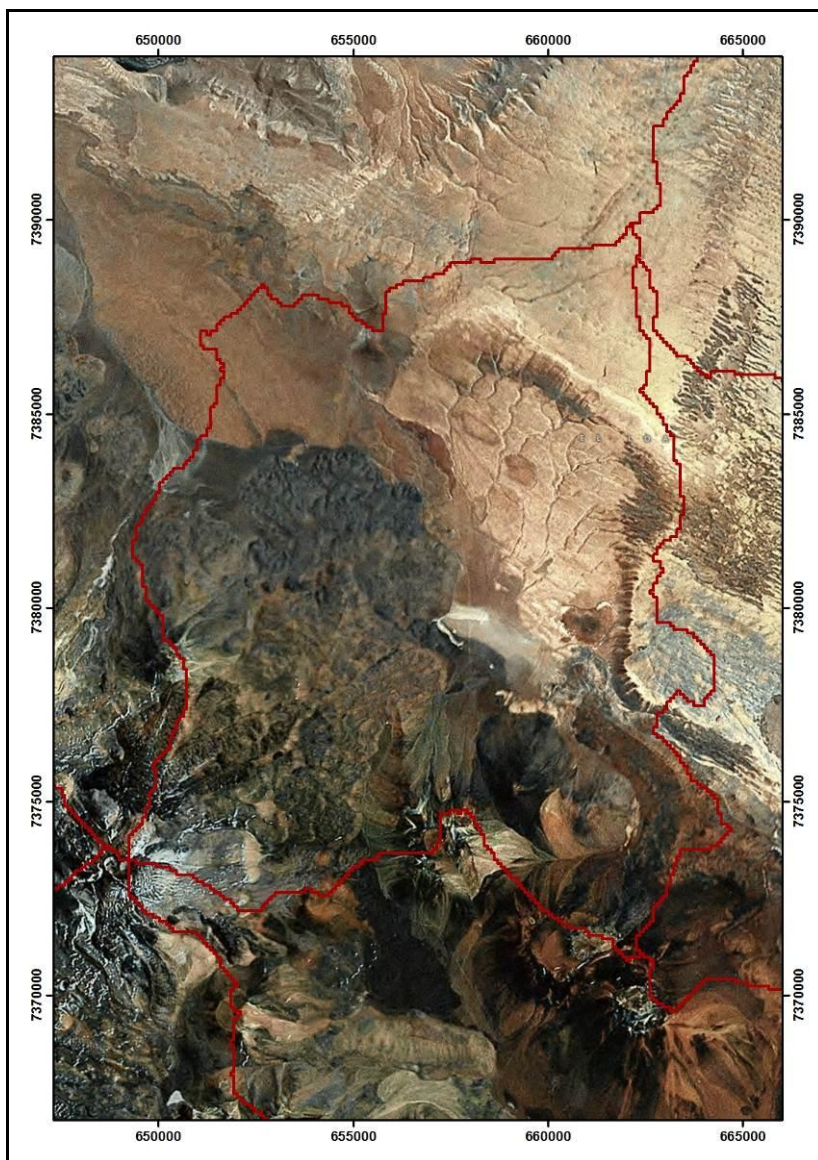


Figura 3.8 Imagen satelital Google Earth de la cuenca Puntas Negras.

En esta cuenca, las unidades de relieve son las que definen a los límites de la cuenca.

Los de mayor consideración y envergadura son: el Cordón de Puntas Negras, que define el límite suroeste; los estrato-volcanes cerros Granates, de alturas máximas cercanas a los 5.250 m s.n.m. y que corresponden al límite sureste de la cuenca; las plataformas ignimbríticas que se identifican en el sector altos de Lari y Caballo Muerto, y que corresponden al límite oriental de la cuenca. La mayor elevación de la hoya de Puntas Negras corresponde al volcán Puntas Negras, con 5.852 m s.n.m., mientras que la altura media de la cuenca es de 4.644 m s.n.m.

Tabla 3.2 Características morfométricas de la cuenca Puntas Negras

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

3.3.3 Geomorfología cuenca Laguna Tuyajto

La hoya hidrográfica Laguna Tuyajto (Figura 3.9) tiene forma de riñón, orientada N-S y comprende un área calculada en 249 km², encerrado en un perímetro de 110 km. La laguna Tuyajto, ubicada en el extremo suroeste de la cuenca, también tiene forma de riñón, y su área es de apenas unos 3 km², y se ubica a una altura promedio de 4.035 m s.n.m., muy por debajo de los casi 4.600 m.s.n.m promedio que se calculan para la cuenca. Se identifican vertientes puntuales que alimentan a la laguna, desde el norte y desde el este. Se identifican depósitos evaporíticos que están depositados hacia el este de la laguna. Las unidades de relieve volcánico definen los límites noroeste, noreste y sureste de la cuenca: el Cordón de Chalviri, que incluye al los estrato-volcanes Tuyajto y Puntas Negras; estrato-volcán cerro El Hueso, donde se ubica la mina El Laco; y los cerros Peinado, de origen intrusivo, y Las Tecas, de origen volcánico. La mayor elevación de la hoya de la laguna Tuyajto corresponde al volcán Puntas Negras, con 5.852 m s.n.m., mientras que la menor corresponde al sector suroeste de la cuenca, donde aflora la laguna a una altura de 4.033 m s.n.m. La altura media de la cuenca es de 4.596 m s.n.m.

Se identifican abanicos aluviales bien conservados, formados por abundantes sedimentos producto de la erosión de las rocas volcánicas que conforman las altas cumbres. Aunque no son de carácter permanente, pueden reconocerse y trazarse los cursos de agua que se originan producto de los deshielos de las precipitaciones estivales, y sus depósitos fluviales asociados. La laguna Tuyajto se caracteriza por presentar una terraza hacia el este, indicando los antiguos niveles de la laguna. Además, pueden reconocerse líneas de costa que evidencian el sistemático descenso de las aguas de la laguna.

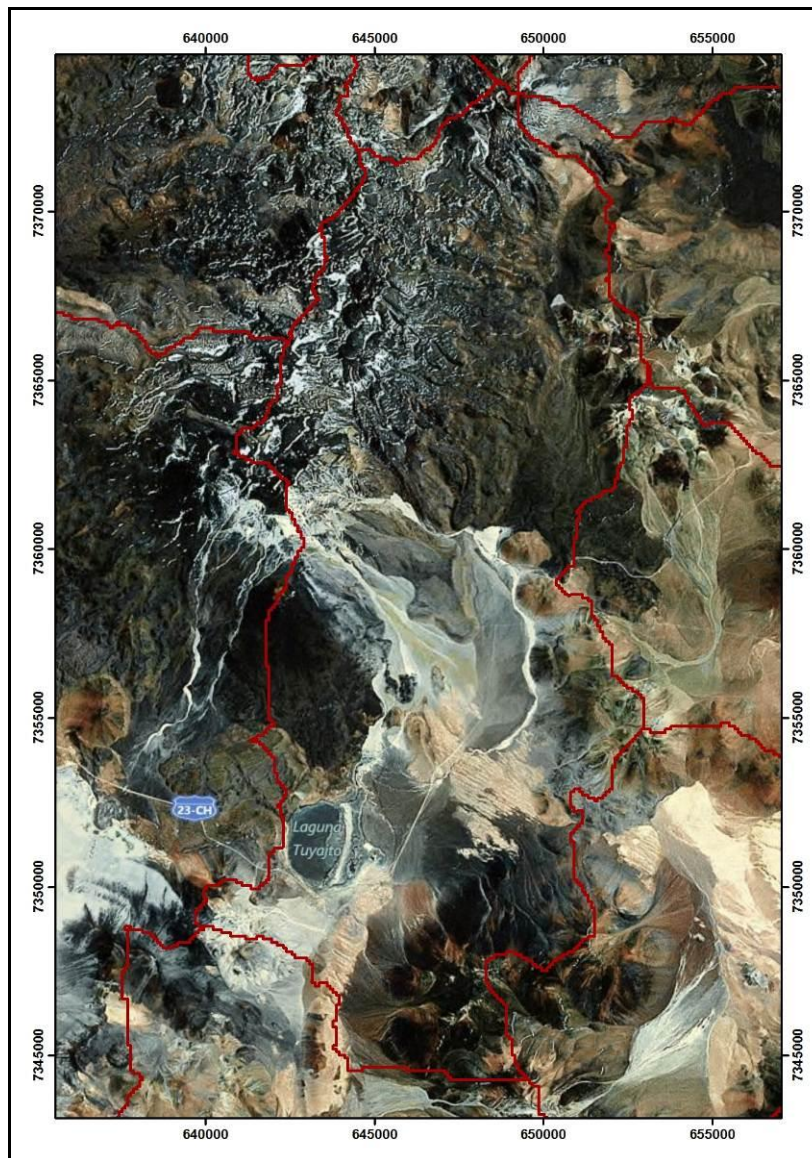


Figura 3.9 Imagen satelital Google Earth de la cuenca Laguna Tuyajto.

Tabla 3.3 Características morfométricas de la cuenca Laguna Tuyajto

Superficie cuenca	249 km ²
Pendiente media	19,43%
Altura máxima	5.852 m s.n.m.
Altura media	4.596 m s.n.m.
Altura mínima	4.033 m s.n.m.
Rango	1.819 m
Superficie Laguna	2,6 km ²

3.3.4 Geomorfología cuenca Pampa Colorada

La cuenca Pampa Colorada (Figura 3.10) está sitiada por un anfiteatro de cerros, algunos de los cuales superan los 4.500 m s.n.m., destacando en la dirección suroeste el cerro Las Tecas con 4.747 m de altitud. Tiene forma sub-redondeada y es la más pequeña de las cuencas piloto, con un área de 58 km², y un perímetro de 43 km.

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

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

3.3.5 Geomorfología cuenca Pampa Las Tecas

La cuenca Pampa Las Tecas (Figura 3.11) tiene forma sub-redondeada y es la segunda más pequeña de las cuencas piloto, con un área de 109 km² y un perímetro de 59 km.

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

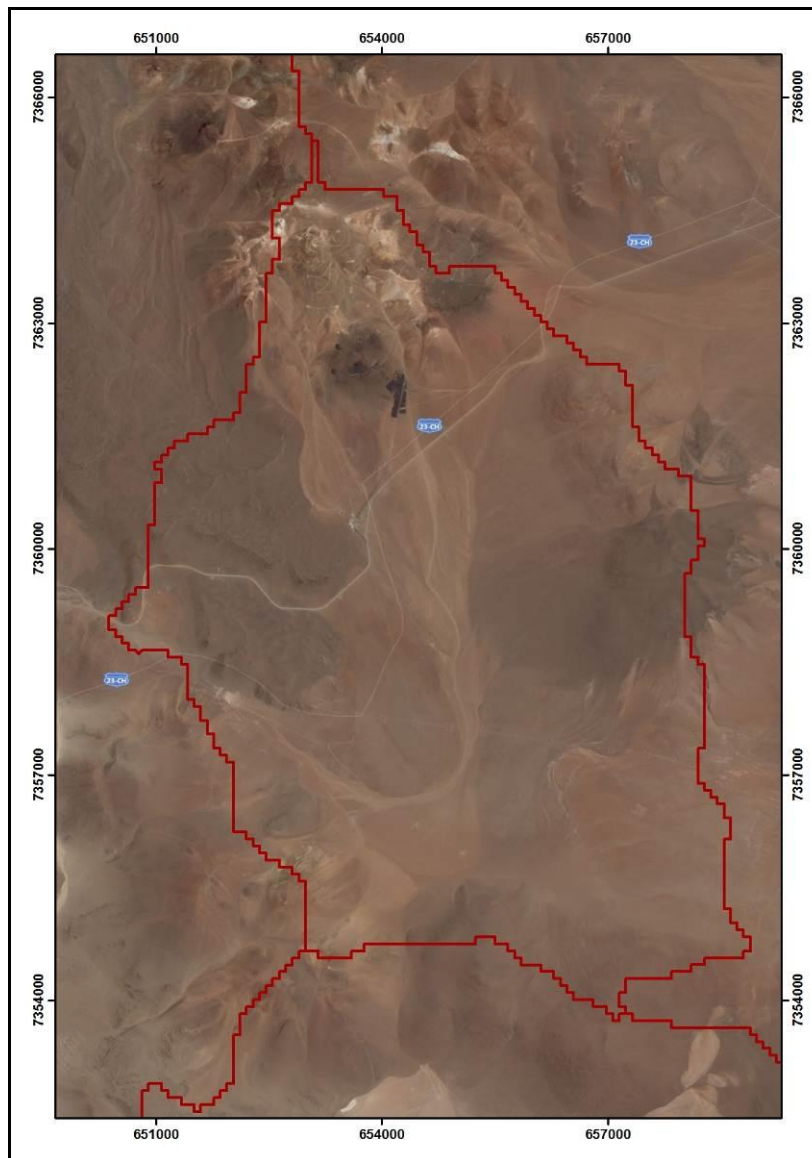


Figura 3.10 Imagen satelital Google Earth de la cuenca Pampa Colorada.

Tabla 3.4 Características morfométricas de la cuenca Pampa Colorada

Superficie cuenca (km ²)	58 km ²
Pendiente media (%)	15,59%
Altura máxima (m s.n.m.)	5.269 m
	s.n.m.
Altura media (m s.n.m.)	4.472 m
	s.n.m.
Altura mínima (m s.n.m.)	4.256 m
	s.n.m.
Rango (m)	1.013 m
Superficie laguna o salar (km ²)	-

que transportan sedimentos que provienen desde el este y oeste de la cuenca.

Esta cuenca se caracteriza por su extensa cubierta aluvial en comparación al tamaño de la cuenca, con depósitos sedimentarios que se transportan y depositan en las partes más bajas de la cuenca, a unos 4.180 m s.n.m. El promedio de altura de la cuenca se calcula en 4.567 m s.n.m. y la mayor elevación corresponde a 5.685 m s.n.m.

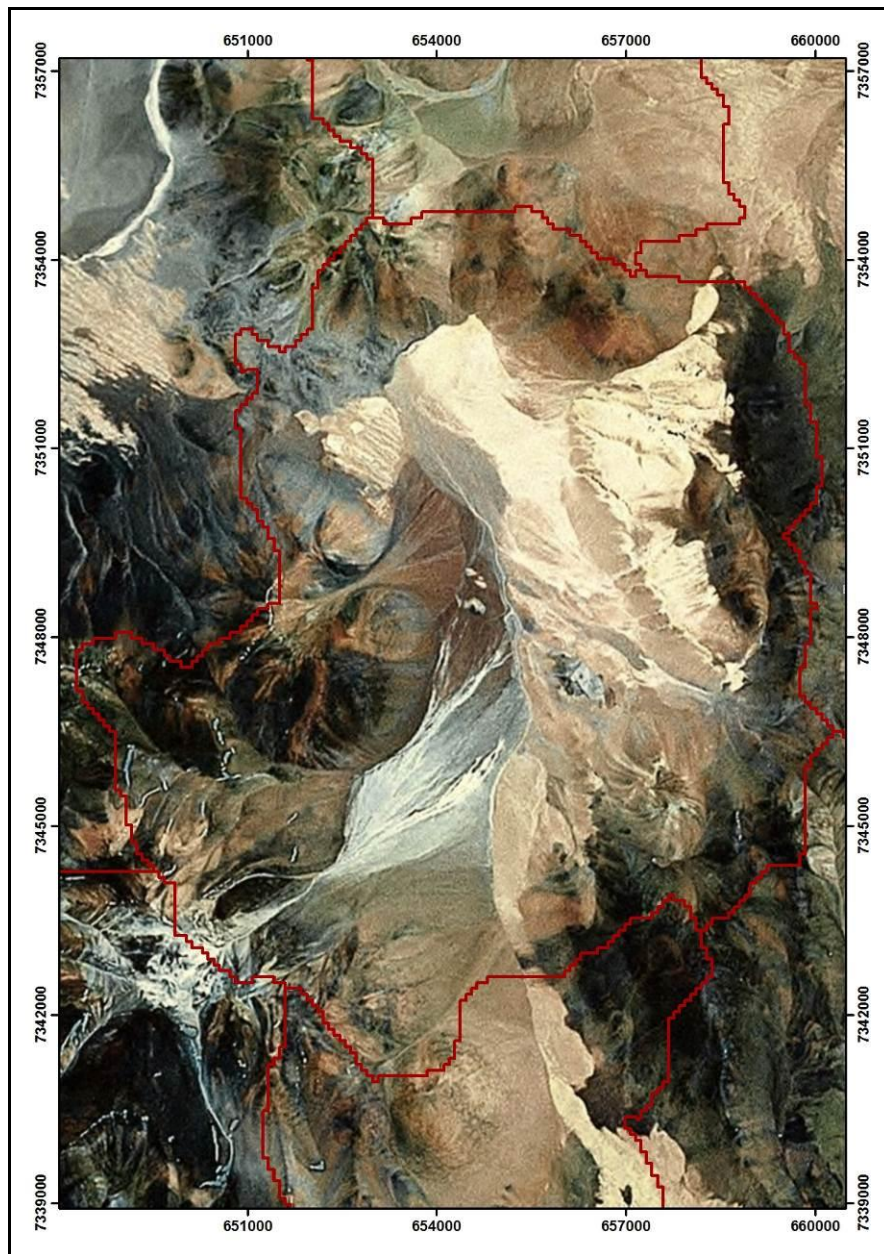


Figura 3.11 Imagen satelital Google Earth de la cuenca Pampa Las Tepas.

Tabla 3.5 Características morfométricas de la cuenca Pampa Las Tecas

Superficie cuenca	109 km ²
Pendiente media	21,12%
Altura máxima	5.685 m s.n.m.
Altura media	4.567 m s.n.m.
Altura mínima	4.181 m s.n.m.
Rango	1.504 m
Superficie Laguna	-

3.3.6 Geomorfología cuenca Salar El Laco

La hoya hidrográfica del salar El Laco (Figura 3.12) es una cuenca que tiene la forma de riñón y comprende un área calculada en 271 km², encerrado en un perímetro de 121 km. La cuenca se caracteriza por su salar, de forma ovalada y orientada N-S, y de igual nombre que la cuenca.

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

Las unidades de relieve volcánico definen los límites de la cuenca, donde los depósitos ignimbríticos superan en área a los volcánicos. Los de mayor consideración y envergadura son: el estrato-volcán miocénico de Loma Negra, hacia el oeste de la cuenca; estrato-volcán cerro Overo, hacia el norte; y las lomas La Cantero y Las Torres, de carácter ignimbrítico y que limitan hacia el margen sur del salar. La mayor elevación de la hoya del salar de El Laco corresponde al volcán Puntas Negras, con 5.852 m s.n.m., mientras que la altura media de la cuenca es de 4.518 m s.n.m.

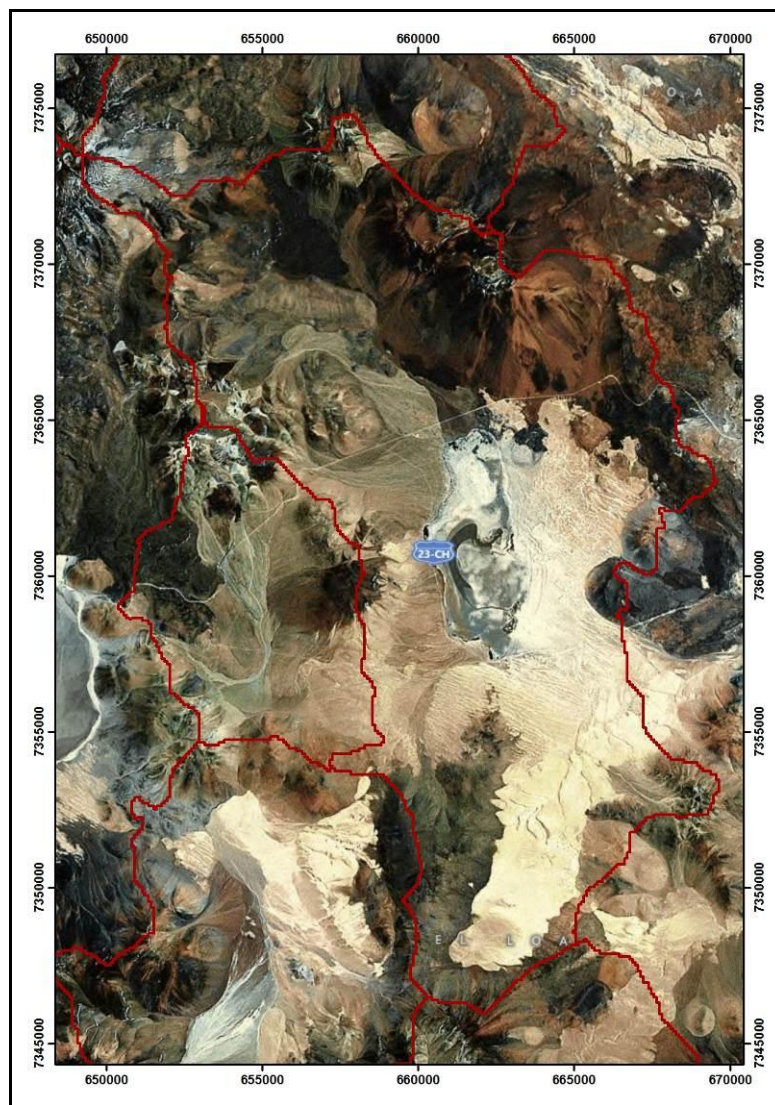


Figura 3.12 Imagen satelital Google Earth de la cuenca Salar El Laco.

Tabla 3.6 Características morfométricas de la cuenca Salar El Laco

Superficie cuenca	271 km ²
Pendiente media	14,61%
Altura máxima	5.852 m s.n.m.
Altura media	4.518 m s.n.m.
Altura mínima	4.219 m s.n.m.
Rango	1.633 m
Superficie salar	16,2 km ²

4 GEOLOGÍA SUPERFICIAL

4.1 GENERALIDADES

Se presentan en este capítulo los resultados del estudio geológico de superficie, que tuvo como finalidad caracterizar las diferentes unidades geológicas que afloran en superficie e identificar la presencia de estructuras tales como fallas y lineamientos en el sector donde se emplazan las cuencas piloto de la II Región de Chile. El estudio se realizó en base a la recopilación de antecedentes en cartas y mapas geológicos, observaciones realizadas durante la campaña de terreno, y la interpretación de imágenes satelitales.

Para caracterizar la geología de superficie, se dibuja un mapa geológico de superficie (Figura 4.1 y 4.2) que muestra las diferentes unidades litológicas que afloran en la superficie de las cuencas piloto. Se presentan las descripciones correspondientes a cada unidad, con énfasis en las características litológicas que son relevantes para definir las unidades acuíferas. El mapa geológico se dibuja a partir de la digitalización y unión de los mapas geológicos de la Hoja Toconao N° 66 (Gardeweg y Ramírez, 1982) ubicada entre los 23°-24° S y 67°30´-69° W y la Hoja Río Zapaleri N° 54 (Ramírez y Gardeweg, 1985), ubicada al este del meridiano 67°30´ W, entre los límites con Bolivia y Argentina. Los documentos mencionados pertenecen a la Carta Geológica de Chile del SERNAGEOMIN, escala 1:250.000. Existe un cuadrante en el sector sur de la cuenca Laguna Tuyajto que no ha sido mapeado, razón por la cual se ha recurrido a imágenes satelitales Landsat ETM+ (NASA, 1999) y observaciones en terreno para completar la geología superficial de la cuenca en cuestión.

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

Las rocas volcánicas del Mioceno superior - Cuaternario que caracterizan el sector de la Puna, presentan una estructura de caldera resurgente a la cual

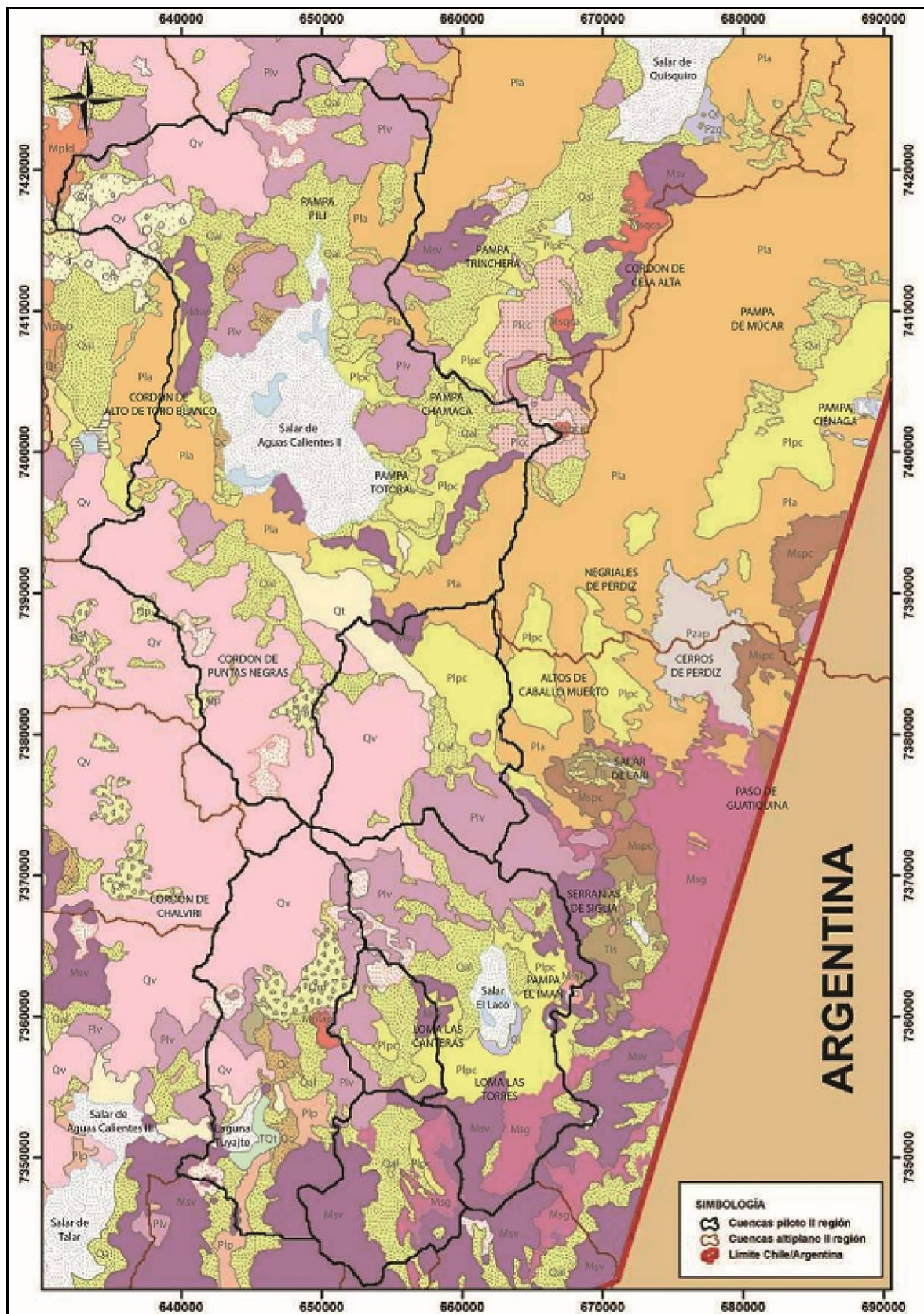


Figura 4.1 Litología de la Puna de Atacama, modificado de las Hojas Toconao (Gardeweg y Ramírez, 1982) y Río Zapaleri (Ramírez y Gardeweg, 1985), escala 1:250.000.



Figura 4.2 Leyenda del mapa geológico (Figura 4.2) modificado de las Hojas Toconao (Gardeweg y Ramírez, 1982) y Río Zapaleri (Ramírez y Gardeweg, 1985), escala 1:250.000.

está relacionada la más extensa ignimbrita del sector y cuyo domo resurgente está ubicado en el extremo nor-occidental de la zona, en el sector de la cuenca del Salar de Aguas Calientes 2.

La mineralización metálica consiste en cuerpos de mineralización maciza de hierro, y en pequeñas vetas de antimonio, plata y estaño. Los recursos no metálicos corresponden a sales de potasio y litio, en la salmuera de los salares. Como recursos energéticos potenciales se puede mencionar las posibilidades geotérmicas, relacionadas con la caldera resurgente.

4.2 DESCRIPCIÓN DE UNIDADES ESTRATIGRÁFICAS

4.2.1 Rocas paleozoicas

Formación Aguada de la Perdiz (Ordovícico-Pzap)

García et al (1962) denominaron Formación Aguada de Perdiz a una secuencia de 2.000 m de espesor de "areniscas cuarcíferas y capas de pedernal". Esta unidad se expone hacia el este de la cuenca Puntas Negras, en el sector de Cerros de Perdiz. La base de la formación no aparece expuesta y su techo corresponde al contacto discordante con las ignimbritas Atana y Guatiquina.

Se definieron dos miembros para la Formación Aguada de la Perdiz, donde el inferior portador de graptolites, estaría compuesto por 1.450 m de arenisca cuarcífera, de grano medio a grueso, bien estratificado y compacto, con intercalaciones de lutitas. El miembro superior estaría caracterizado por pedernal con intercalaciones de lutita silíceo laminar y bien estratificada.

Gardeweg y Ramirez (1982) indican que la formación está compuesta en gran parte por una alternancia de areniscas y limolitas, de unos 700 m. En la vertiente occidental de estos afloramientos aparecen niveles de tobas, diques y filones. Los bancos de areniscas presentan espesores que varían entre los 0.4 - 0.5 m, con intercalaciones de delgados niveles limolíticos. Son frecuentes los bancos de areniscas y conglomerados macizos de hasta 3 m de espesor.

Estratos del Salar de Quisquiro (Paleozoico indiferenciado-Pzq)

García (1967) reconoció una sección de arenisca de cuarzo, con más de 50 m de espesor, en la parte sureste del salar de Quisquiro, a la que se le asignó una edad paleozoica. Esta unidad se expone en pequeños afloramientos de estratos ubicados en la parte sureste del salar de Quisquiro, La base de estos estratos es desconocida, y están cubiertas por la Ignimbrita Atana. A su vez, el paleorelieve de suaves lomajes está relleno por los depósitos lacustres del salar de Quisquiro. También tiene una gran similitud litológica y de características sedimentarias con los niveles de areniscas cuarcíferas de la Formación Lila del Devónico.

La secuencia se compone por areniscas cuarcíferas bien estratificadas en bancos de 1 – 3 m de potencia, con intercalaciones de granulometría más fina. Se caracteriza por su coloración crema-rojiza y rojo-violácea.

4.2.2 Rocas mesozoicas

Formación Siglia (Terciario inferior-Tis)

Se distribuye en el sector del Salar de Lari y en la Serranía de Siglia, hacia el suroriente de las cuencas piloto. Su base no se observa y subyace en discordancia angular a la cubierta compuesta por las ignimbritas Guatiquina y Atana. Esta unidad se encuentra intruida por los pórfidos de Siglia y Lari.

Se constituye por más de 300 m de areniscas de grano fino y limolitas, con venillas e intercalaciones de yeso. Localmente, presenta brechas monomícticas con matriz de yeso. La estratificación es en general pobre y difusa, los afloramientos están disgregados y mal preservados. En el sector de Siglia, aflora una secuencia descrita por Tavera (1962) y Vogel et al (1947) compuesta por 3 miembros. El miembro inferior está constituido por lutitas bien estratificadas, con bancos de lutitas arenosas y yeso; el miembro intermedio se constituye por 100 - 150 m de brechas y alternancia de lutitas arenosas; y el miembro superior formado por 130 - 150 m de sedimentos finos, que incluyen lutitas esquistasas y areniscas finas. En la localidad de Lari, se reconocen los tres miembros, principalmente el intermedio. La secuencia se encuentra intensamente plegada y está intruida por pequeños diques y filones de pórfidos riolíticos, monzonítico-cuarcíferos y dioríticos.

Formación Pastos Chicos (Mioceno superior-Mspc)

Se encuentra al este de Cerros de Perdiz y al sur de Lari en el sector sur oriental. La formación sobreyace en discordancia angular a los depósitos de

la Formación Aguada de la Perdiz, y la envuelven depósitos de las ignimbritas de Guatiquina.

Se compone de gravas mal estratificadas, en afloramientos pobremente expuestos. Al sur de Lari, se observan gravas de grano medio a fino, mal consolidados, con rodados sub-redondeados de lavas y de un material compuesto por hematita y biotita.

4.2.3 Rocas volcánicas del Cenozoico superior

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

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

Los productos volcánicos están representados por flujos de ignimbrita, depósitos de caídas de piroclastos, grandes estrato-volcanes, pequeños conos piroclásticos, y domos y estructuras subcirculares, estando los últimos cuatro, agrupados como Conjuntos de Volcanes. No existen registros históricos de actividad volcánica en el sector, a excepción de la actividad hidrotermal permanente de algunos salares.

4.2.3.1 Ignimbritas

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

Las ignimbritas presentes en este sector de la Puna consisten en tobas con distintos grados de soldamiento, de composición dacítica y riolítica, colores gris-rosado y pardo-rojizo, con texturas vitroclásticas y eutaxíticas (bandas y fragmentos de distintos colores), y se han diferenciado en base a sus características petrográficas (contenido y tipo de cristales y matriz), presencia y tipo de pómez o fiammes, grado de soldamiento, distribución areal, posición estratigráfica, y edades radiométricas. Las edades asignadas se basan en sus relaciones estratigráficas y en dataciones radiométricas (K-Ar).

Las unidades descritas se integran por uno o más flujos piroclásticos, separados entre sí por delgados depósitos piroclásticos aéreos. A su vez, las distintas unidades de ignimbritas, que por lo general constituyen una unidad de enfriamiento, están separados por depósitos irregulares de flujos piroclásticos con estratificación cruzada ("surges"), o por depósitos aéreos, Ellas corresponden a: Ignimbrita Guatiquina, Ignimbrita Atana, Ignimbrita Pampa Chamaca, Ignimbrita Patao, Ignimbrita Cajón y la Ignimbrita Tuyajto, con un rango de edades que va desde el Mioceno superior al Pleistoceno-Holoceno.

Dos ignimbritas mayores parecen haberse originado a partir de la caldera La Pacana, basado en sus variaciones de espesor, distribución lateral y relaciones estratigráficas. La Ignimbrita Toconao aflora más al oeste del sistema de cuencas piloto (4 – 5 Ma), es una toba riolítica, con notables variaciones verticales en su grado de soldamiento. Corresponde a una toba blanco-grisácea o parda clara, débilmente soldada, con fragmentos abundantes de pómez (25%) capilares, de color pardo claro, de hasta 4 cm de longitud, y pequeños clastos líticos, grises, y de tobas gris-rosadas oscuras. Los mega-fenocristales son escasos y corresponden a plagioclasa y biotita cobriza orientada. La Ignimbrita Atana es dacítica y presenta fenocristales de cuarzo rosado, plagioclasa, biotita cobriza y escasos líticos (4 Ma). Siguiendo al colapso de la caldera y la formación del bloque resurgente Atana, se forman diversos domos dacíticos a riolíticos ricos en cristales, a lo largo del margen del bloque resurgente. Este volcanismo post-caldera

continúa entre los 4 – 2 Ma, lo que indica que el sistema magmático La Pacana estuvo activo al menos durante 2 Ma posterior a la erupción principal. La ignimbrita Atana se extiende hacia el oeste, sur y este de la caldera La Pacana (Lindsay et al., 2001a, b). Se debe agregar que las ignimbritas Atana y Toconao que se relacionan al evento eruptivo de La Pacana, han sido estudiadas, a diferencia del resto de las ignimbritas del sector de la Puna, de las cuales poco se sabe.

Ignimbrita Guatiquina (Mioceno superior-Msg)

Esta unidad denominada por Francis y Baker (1978) se distribuye en el sector sureste de la Puna, y su localidad tipo corresponde al paso de Guatiquina, reconociéndose sus afloramientos también en el sector de la Pampa del Rincón y Pampa Las Tecas. Se ubica estratigráficamente sobre las formaciones Siglia y Pastos Chicos, pórfidos y diques de Siglia y lavas pertenecientes al Conjunto de Volcanes I, piroclastos del Conjunto de Volcanes II, a la Ignimbrita Atana y a la Ignimbrita Cajón. La Ignimbrita Guatiquina forma una superficie inclinada de 1 – 1.5° hacia el SE, generalmente plana, con algunos frentes abruptos de color blanco y rojo, producto de fallas o de erosión diferencial. Además, se observan torres aisladas o grupos de ellas, de hasta 15 m de altura, y que son remanentes de la erosión. Hacia el este, estas torres forman cordones asociados a un drenaje tipo "cola de caballo". La presencia de fragmentos líticos, provocan un fenómeno de erosión diferencial, que genera una morfología de "dedos" de hasta 30 cm de longitud, dispuestos horizontales.

Litológicamente, los depósitos de esta unidad corresponden a una unidad de enfriamiento constituida por al menos dos flujos de toba de color pardo-rojizo a gris-rosáceo e inclusive blanco, con presencia ocasional de fiammes negras y/o rojas que dependen del grado de soldamiento de esta unidad. Comúnmente, la base es poco soldada, con lentes de fragmentos líticos, grandes pómez blancas, y escasos fenocristales de plagioclasa y biotita. Ocasionalmente, la base se presenta vitrofírica de color levemente anaranjado, con abundantes pómez pequeñas. Hacia el techo, presenta un soldamiento mediano, con menor proporción de líticos, pequeñas y abundantes pómez blancas, rojas y negras de sección basal circular, dando a la roca una textura eutaxítica. Localmente presenta zonas muy blandas y poco soldadas, con biotita oxidada cobriza y pómez deleznable.

Ignimbrita Atana (Plioceno-Pla)

Ramirez y Gardeweg (1982) denominaron Ignimbrita Atana a un extenso flujo que aflora típicamente en las laderas del cordón cerros de Atana. Es una de las ignimbritas de gran volumen que se emplaza en el Complejo Volcánico

de la Puna durante el Mioceno tardío y el Pleistoceno. El centro de emisión de esta ignimbrita corresponde a una gran caldera denominada La Pacana, y se estima un volumen de al menos 2.500 km³, lo que la clasifica como el cuarto depósito ignimbrítico más grande reconocido en el mundo (Lindsay et al., 2001a; Mason et al., 2004). Su parte central formado por el Cordón de Pacana, corresponde a un domo estructural resurgente, constituido por tobas fuertemente soldadas, cortadas por un sistema de fallas sub-paralelas características. La Ignimbrita Atana subyace a las ignimbritas Pampa Chamaca y Tuyajto, y a los depósitos del Conjunto de Volcanes II, y sobreyace a todas las formaciones sedimentarias locales que están comprendidas entre el Ordovícico y el Terciari, a la ignimbrita Guatiquina, a los pórfidos dacíticos de Quilapana y Ceja Alta, y a lavas del Conjunto de Volcanes I, II, y III.. Los extensos afloramientos alejados de la caldera, dan origen a superficies inclinadas 2.5 - 4° E, donde la erosión ha originado notables estructuras que forman altas paredes o columnas.

La unidad extracaldera está comúnmente formado por flujos de composiciones similares, separados entre sí por depósitos piroclásticos irregulares. Corresponde a tobas menos soldadas de color blanco a pardo-rosáceo, localmente con una delgada base vítrea de 1 - 3 cm de espesor. Hacia arriba, los distintos flujos se separan por depósitos piroclásticos aéreos, formados por pequeñas pómez angulosas o surges. Todos los niveles de esta ignimbrita presentan pómez, donde pueden alcanzar hasta 25 cm de diámetro cercano al centro de emisión. Todos los flujos se caracterizan por la presencia de grandes fenocristales de cuarzo rosado, plagioclasa, y biotita negra o cobriza, y escasos líticos. La unidad intracaldera se compone por las tobas densamente soldadas, de color rojizo, con pómez aplastadas, y mayor porcentaje de fenocristales. Se caracteriza por su gran potencia, cercana a los 1.000 m y donde no se reconocen flujos individuales. En Pampa de Múcar y Alto de Lari, esta ignimbrita presenta numerosas estructuras circulares en la superficie, similares a cráteres de disolución.

Ignimbrita Pampa Chamaca (Plioceno-Plpc)

Gardeweg y Ramirez (1985) designan un flujo de ignimbrita de vidrio y cristales, de amplia distribución, y en general delgado, que se extiende hacia la franja oriental del mapa, en las pampas Chamaca, Totoral, Trinchera y El Imán, Pampa Ciénaga, los Altos de Lari y Caballo Muerto, y en los Negriales de Perdiz. Se encuentra estratigráficamente sobre las lavas y domos del Conjunto de Volcanes I y II, Ignimbrita Guatiquina, e Ignimbrita Atana. Subyace a la Ignimbrita Tuyajto y a depósitos aluviales. Aflora hacia el sector oriental de las cuencas piloto rellenando paleorelieves relacionadas a calderas de colapso más antiguas y asociadas a las ignimbritas Guatiquina y Atana. Esta ignimbrita podría tener su origen en la depresión actualmente

ocupada por el Salar de Aguas Calientes 2 o en alguna estructura ahora cubierta por los volcanes del Cordón Puntas Negras.

Corresponde a una toba con notables cambios de color, textura y proporción de cristales, las cuales en general, están relacionadas con el grado de soldamiento y la potencia del afloramiento. La base corresponde a un nivel vítreo con grandes pero escasos fiammes rojizos o negros. Hacia el techo, grada a un nivel gris-rosáceo, medianamente soldado, con abundantes cristales de plagioclasa, biotita cobriza y cuarzo, además de pequeñas pómez, cuya proporción aumenta hacia el techo. En el sector de las pampas Trinchera y Chamaca, la superficie de erosión de la toba presenta un característico diaclasamiento poligonal. En los afloramientos en los alrededores del Salar El Laco, se presenta fuertemente erosionada, y aflorando en filas de torres.

Ignimbrita Patao (Plioceno-Plp)

Ramirez (1978) define la localidad tipo en el borde de la quebrada Nacimiento. Los afloramientos en la zona de estudio son escasos y se reconocen en el sur de la cuenca Laguna Tuyajto. Sobreyace a la Ignimbrita Atana y se encuentra bajo el Conjunto de Volcanes III. Al sur de Socaire se encuentran sus afloramientos más extensos, rellenando quebradas y con una dirección de flujo de este a oeste.

Corresponde a una toba gris clara, con la porción basal deleznable y la porción superior bien soldada. Está afectada, ocasionalmente, por diaclasamiento columnar y comúnmente presenta una superficie rugosa asociada a drenaje tipo dendrítico en zonas de poca pendiente, y a drenaje tipo "cola de caballo" en zonas de pendiente más fuerte. Es una toba gris clara o pardo rosado claro, con escasos fenocristales de plagioclasa, biotita cobriza y escaso cuarzo. Presenta fragmentos de pómez blancas, rocas y escoria volcánica de color pardo oscuro.

Ignimbrita Tuyajto (Pleistoceno-Holoceno-Qt)

Ramírez y Gardeweg (1982) denominaron Ignimbrita Tuyajto a una toba de extensión reducida que aflora típicamente en los alrededores de la laguna Tuyajto y del Salar de Aguas Calientes 3. Esta ignimbrita se encuentra sobre lavas del Conjunto de Volcanes I, y sobre la Ignimbrita Atana. Sus afloramientos son discontinuos y su centro de emisión probablemente se ubica en el área del cordón Puntas Negras.

Corresponde a una toba pardo-rojiza, y a pesar de su reducido espesor (3 m), se distinguen al menos dos unidades de flujo. Tiene una base vítrea, que grada desde una zona poco soldada hasta una zona bien soldada, localmente con fiammes oscuras, comúnmente eutaxítica. Ocasionalmente se presenta con bandas rojas y negras, y/o clastos de andesita. Los niveles superiores tiene vitrófiros basales negros, de 10-20 cm de espesor. Contiene fenocristales de plagioclasa, piroxenos y escaso cuarzo. Además contiene fragmentos líticos, volcánicos y de pómez.

4.2.3.2 Volcanes

En la zona de estudio, se encuentran numerosos centros volcánicos, los que han dado origen a estrato-volcanes y secuencias volcánicas estratificadas, de composición andesítica y, subordinadamente, dacítica y basáltica. Los estrato-volcanes se presentan en complejos de dos o más conos y ocasionalmente, tienen asociados pequeños domos en sus flancos. Las secuencias estratificadas corresponden a afloramientos aislados de lavas y piroclastos de distintas composiciones, comúnmente plegadas, y que no pueden ser directamente relacionadas a centros de emisión. En menor proporción, se reconocen cuerpos sub-redondeados llamados domos y estructuras circulares, que se constituyen por lavas viscosas y de composición principalmente riolítica. Además hay conos piroclásticos y de escoria, basálticos, correspondientes a estructuras monogenéticas, formadas por la acumulación de escoria marcadamente vesicular, ceniza y lava, en torno a un centro de emisión. Los volcanes se presentan en forma aislada o formando grupos o complejos de dos o más aparatos volcánicos alineados en varias direcciones, aunque de preferencia NW-SE, paralelos al cordón Puntas Negras, y al cordón de ignimbritas La Pacana.

En conjunto, estos centros volcánicos se disponen cubriendo discordantemente las formaciones Aguada de la Perdiz, Siglia, Pastos Chicos, pórfidos del Mioceno, y engranan parcialmente con las ignimbritas.

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

En estos centros volcánicos se pueden distinguir cinco tipos petrográficos, los cuales corresponden, en orden decreciente de abundancia a: andesitas de

piroxeno, andesitas de hornblenda y/o biotita, dacitas, basaltos y/o andesitas basálticas y riolitas. Dentro de algunos de estos tipos se pueden diferenciar rocas cristalinas, vitrofíricas, esferulíticas y bandeadas.

Conjunto de Volcanes I (Mioceno superior-Msv)

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

Conjunto de Volcanes II (Plioceno-Plv)

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

Conjunto de Volcanes III (Plioceno – Pleistoceno-Qv)

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

Depósito Piroclástico de Corral Coquena (Plioceno-Plcc)

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

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

4.2.4 Depósitos no-Consolidados y salinos

Los depósitos no-consolidados se asignan casi todos al Cuaternario y son los que se componen por acumulaciones locales de sedimentos, que se depositan sobre las unidades consolidadas, más antiguas. Estas rellenan valles y depresiones, o se ubican hacia los sectores bajos de las laderas de los cerros, en las llanuras que caracterizan las partes más bajas de las cuencas.

Dado el carácter endorreico de las cuencas de la Puna, la descarga se produce principalmente por evaporación, y en menor proporción, por evapotranspiración. En consecuencia, varias de estas cuencas presentan depósitos salinos denominados comúnmente salares, en las partes más bajas y planas de las cuencas cerradas.

Depósitos Aterrazados (Terciario-TQt)

Se identifican únicamente en la ladera oriental del volcán Tuyajto, al norte de la laguna de igual nombre. Corresponden a sedimentos medianamente litificados, con estratificación regular y granulometría variable. Son depósitos de piedemonte y corrientes de barro, constituidos predominantemente por gravas, arenas y limos, los cuales se encuentran encausados por los cauces de las quebradas actuales. En general presentan intercalaciones de ceniza volcánica deleznable mezcladas entre las gravas.

Depósitos Aluviales (Qal)

Corresponden a los depósitos no-consolidados más abundantes dentro del área de estudio, y agrupan materiales de piedemonte, bajadas, y depósitos fluviales. Se encuentran rellenando las depresiones donde se ubican los salares de esta zona, como también algunas quebradas. Estos depósitos están constituidos por una mezcla heterogénea de gravas, arenas y limos, de composición polimíctica, originados en corrientes de barro, avenidas por un compuesto de transporte por acción de la nieve, el agua, y el viento de la cordillera, que erosionan los afloramientos cercanos, mezclados con material piroclástico como ceniza y pómez.

Depósitos Coluviales (Qc)

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

Depósitos Lacustres (Ql)

Estos depósitos afloran en las cercanías de la laguna Quisquiro y El Laco. Corresponden a sedimentos depositados en los márgenes de antiguos lagos, donde se observan líneas paralelas al depósito salino, con cota decreciente hacia estos. Estas líneas podrían corresponder a la traza de los estratos, y se han interpretado como antiguas líneas de costa.

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

Depósitos Murrénicos (Qm)

Los depósitos murrénicos se reconocen en el Cordón de Puntas Negras entre los 4.350 y 4.900 m s.n.m. a ambos lados de dicho cordón. Las morrenas de fondo rellenan los valles labrados en coladas de lava, entre los principales aparatos volcánicos. La superficie de estos depósitos es irregular ya que los bloques forman pequeños montículos. Las morrenas laterales están adosadas a las paredes de los valles. Se les asigna una edad holocénica.

Depósitos Piroclásticos (Qp)

Se distribuyen en las faldas de los volcanes Láscar y Aguas Calientes, y en el cordón Puntas Negras. Consisten en depósitos de escoria volcánica, pómez y ceniza, extruida recientemente, y que permanece in situ.

Depósitos Laháricos (Qla)

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

Depósitos Salinos (Qs, Qcl, Qsl, Qcs)

Estos se forman por una fracción líquida correspondiente a salmuera, una fracción salina representada por la depositación de diferentes sales transportadas en solución a la cuenca, y una fracción sólida constituida por distintos niveles de arena, limo y arcilla. La salinidad varía junto con los cambios en la flora y fauna, desde niveles muy bajos en los sitios de surgencia, hasta máximos en el interior de las lagunas o riberas alejadas de la surgencia.

Existen varios salares o cuerpos salino-detríticos que encierran lagunas salobres y cuya extensión depende del nivel freático estacional. Los salares o cuerpos salino-detríticos principales que afloran en la zona de estudio son los salares Loyoques o Quisquiro, Aguas Calientes 2, Aguas Calientes 3, Talar, Laguna Tuyajto y El Laco. Estos depósitos se componen de limos salinos, cloruros, sulfatos y boratos, que se exponen como una banquisa rugosa de color variable entre pardo claro y blanco. Estos cuerpos se depositan en las partes más bajas del área estudiada que son depresiones topográficas de origen principalmente volcano-tectónico, y formadas durante el Plioceno.

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

4.2.5 Rocas intrusivas

Existen escasos afloramientos intrusivos, siendo la mayor parte de ellos pequeños cuerpos porfídicos con características de rocas sub-volcánicas, además de diques y filones. La composición de estos cuerpos es principalmente dacítica, con variaciones a riolitas, y localmente a monzonitas y dioritas. La edad de ellos fluctúa entre el Mioceno Medio y Superior, e intruyen a las unidades sedimentarias del área, y a su vez, están cubiertos por lavas e ignimbritas de diversas edades. Asociados a estos cuerpos hay pequeñas zonas de alteración hidrotermal. Estos cuerpos originan cerros de perfil relativamente plano y sección basal, en general, alargada (Gardeweg y Ramírez, 1982).

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

En las localidades de Siglia, Cerro Imán y ocasionalmente en Lari, se han reconocido pequeños cuerpos intrusivos que conforman montículos cónicos o diques, que afloran en los pequeños cerros de la serranía Siglia. Son rocas de color gris claro o verde claro, de granulometría variada, de fina a porfídica, excepcionalmente con fenocristales de hasta 1,5 cm de diámetro. La composición varía de pórfidos riolíticos, en cuerpos mayores, a monzonitas y monzonitas cuarcíferas, con extremos de dioritas cuarcíferas.

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

En las vertientes occidentales de los cordones de Quilapana y Ceja Alta, afloran tres cuerpos aislados de pórfidos dacíticos, dispuestos en una franja de dirección aproximada N-S, y que cubren una superficie total de alrededor de 20 km². Se incluye en esta unidad el pequeño cuerpo que constituye la cumbre del cerro Coquena (Cepeda, 1978). Corresponde a un pórfido dacítico, de color gris-verdoso o gris-blanco, con variadas proporciones de fenocristales blancos de plagioclasa, biotitas negras o rojizas más pequeñas y, ocasionalmente cuarzo y feldespato alcalino. La alteración, principalmente silicificación, varía tanto de un afloramiento a otro, como dentro del mismo afloramiento.

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

Aflora en los cerros Hónar, Rayado, Gigantes y Peinado. Corresponde a un pórfido andesítico de hornblenda y piroxeno. Son rocas rosadas porfíricas con fenocristales de tamaño medio de plagioclasa, con piroxeno y anfíbola en proporciones variables.

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

Es un cuerpo alargado en dirección N-S que aflora en los cerros de Sáltar. Presenta una importante zona de alteración en el extremo norte. Son rocas grises, porfídicas, con mega-fenocristales de plagioclasa, cuarzo y biotita.

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

Aflora en el cerro Corona y en cerros menores y cercanos. En la cumbre presenta un cuerpo hipabisal, más resistente a la erosión, cuyo aspecto de corona debe su nombre al cerro. Son rocas rosadas o gris-verdosas, porfídicas, con proporciones variables de mega-fenocristales de plagioclasa, biotita, anfíbola y escaso cuarzo.

4.3 GEOLOGÍA SUPERFICIAL DE CUENCAS PILOTO

Se identifican a continuación las unidades geológicas que afloran en la superficie de cada cuenca piloto, con el objetivo de facilitar futuras correlaciones con las unidades geológicas reconocidas en sub-superficie.

4.3.1 Geología cuenca Salar de Aguas Calientes 2

La cuenca presenta en su zona central y topográficamente más baja un gran depósito evaporítico salino. Afloran mayoritariamente alrededor del sector sur del salar de Aguas Calientes 2, rocas de las ignimbritas Atana, Pampa Chamaca, y Tuyajto, encontrándose las más antiguas hacia el este de la cuenca, y las más nuevas hacia el oeste. Hacia el norte de la cuenca, se reconocen los imponentes estrato-volcanes Aguas Calientes y volcán Pili, correspondientes al Conjunto de Volcanes III, y cuyos afloramientos también predominan hacia el costado occidental de la cuenca. Existen depósitos volcánicos correspondientes a los conjuntos de volcanes I y II, hacia el noreste y sureste de la cuenca, respectivamente. Los depósitos piroclásticos del Corral de Coquena, se ubican más allá del límite este de la cuenca. El relleno sedimentario es principalmente de carácter aluvial y origen volcánico, estos depósitos predominan hacia el norte del salar, en el sector denominado Pampa Pili, y hacia el este del salar, entre los depósitos volcánicos de las ignimbritas Atana y Pampa Chamaca. Existen escasos depósitos no-consolidados laháricos, piroclásticos, morrénicos y de alteración hidrotermal, situados entre las cumbres volcánicas.

4.3.2 Geología cuenca Puntas Negras

El noreste de la cuenca está cubierto por depósitos de las ignimbritas Pampa Chamaca, Atana y Tuyajto, hacia el norte, y el suroeste de la cuenca corresponde a la sección austral del cordón de Puntas Negras, compuesto por depósitos volcánicos del Conjunto de Volcanes III. Afloran en el extremo sur-oriental de la cuenca rocas volcánicas del Conjunto de Volcanes II. Los depósitos aluviales son escasos y se acumulan hacia el centro de la cuenca.

4.3.3 Geología cuenca Laguna Tuyajto

Los afloramientos se distribuyen en tres franjas de orientación aproximada NNE-SSW. La franja occidental se caracteriza por presentar hacia el norte depósitos volcánicos del cordón de Chalviri, que corresponden al conjunto de volcanes III. Más al sur, existen escasos depósitos volcánicos asociados a los conjuntos de volcanes II y III. La franja central se caracteriza por presentar al norte, depósitos morrénicos hacia los pies del cordón Chalviri. Es en este sector se identifica un pequeño afloramiento de Depósitos Aterrazados terciarios. Hacia el centro de la cuenca, hay un pequeño cuerpo de agua denominado laguna Tuyajto, que aflora en medio de abundantes depósitos evaporíticos salinos. Hacia el norte de la laguna se identifican escasos afloramientos de la Ignimbrita Tuyajto, y hacia el este de la laguna se reconocen una plataforma volcánica compuesta por la Ignimbritas Patao, que aflora exclusivamente en esta cuenca. Esta franja central se encuentra cubierta por abundantes depósitos aluviales y coluviales que provienen principalmente de la erosión del cordón volcánico Chalviri, más al norte. La franja oriental de la cuenca se compone por rocas de los conjuntos de volcanes II y III, hacia el norte y sur, respectivamente. Hacia el extremo central-oriental de la cuenca, se identifica un domo intrusivo, que corresponde al pórfido andesítico de Cerros Gigantes.

4.3.4 Geología cuenca Pampa Colorada

La cuenca limita al oeste con depósitos volcánicos del Conjunto de Volcanes II, y al este con depósitos volcánicos del Conjunto de Volcanes I y una plataforma de la Ignimbrita Pampa Chamaca. Son abundantes los depósitos sedimentarios aluviales que cubren toda el centro de la cuenca.

4.3.5 Geología cuenca Pampa Las Tecas

Hacia el noroeste de la cuenca aflora un pequeño depósito volcánico del Conjunto de Volcanes II. El resto de la cuenca se compone mayoritariamente por depósitos volcánicos del Conjunto de Volcanes I. Se identifica al este, una plataforma volcánica de la Ignimbrita Guaitiquina, que está en contacto con una franja delgada de la Ignimbrita Pampa Chamaca. Abundan los depósitos sedimentarios aluviales que se acumulan hacia el sector central de la cuenca.

4.3.6 Geología cuenca Salar El Laco

Hacia el norte de la cuenca, se identifican depósitos volcánicos asociados a los conjuntos de volcanes II y III, mientras que el sur de la cuenca se compone por depósitos volcánicos del Conjunto de Volcanes I, y por un gran afloramiento de la Ignimbrita Guaitiquina. Es en el sector central de la cuenca se ubica el salar El Laco, que hacia el norte presenta abundantes depósitos aluviales, y hacia el sur sobreyace a la Ignimbrita Pampa Chamaca.

4.4 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

La evolución miocena-cuaternaria de la actividad magmática de los Andes Centrales se asocia a dos tipos de estructuras principales, de orientación N-S y NW-SE. Por una parte, el volcanismo de arco describe la actividad volcánica que se desarrolla durante el Mioceno-Holoceno en la Cordillera Occidental, donde la zona de arco actual se delimita por un acentuado frente de estrato-volcanes que se extienden paralelos al margen occidental sudamericano, entre los 14° y 27°S, de orientación N-S. Por otra parte, y hacia al este, se centra a lo largo de estructuras de carácter regional y de orientación NW-SE, y que muestran una componente sinistral.

Una de estas estructuras transcurrentes es de gran importancia y se denomina Falla Calama - Olocapato - El Toro. Esta puede trazarse por unos 300 km al este del arco, hasta el límite con la zona sub-andina, en la cordillera Oriental (Figura 4.3). Esta estructura se inicia en el sector de la Puna de Atacama, en el cordón volcánico de Puntas Negras, y su prolongación se reconoce por la presencia de centros magmáticos del Mioceno, que se alinean sobre la traza de la falla (Matteini et al., 2002a;

Matteini et al., 2002b). El volcanismo de transarco a lo largo de los lineamientos NW-SE se relaciona a variaciones en el ángulo de subducción de la placa de Nazca subductante (Kay et al., 1999). Matteini et al. (2002a,b), han estudiado la evolución del volcanismo de arco-transarco a lo largo de una de las estructuras transversales más extensas de los Andes Centrales, la falla Calama - Olocapato - El Toro, a los 24°S. La variación composicional del volcanismo de arco, hacia el volcanismo de transarco, proporciona aproximaciones a la petrogénesis y a las regiones donde se origina el magma. Los centros volcánicos de Puntas Negras y Rincón corresponden a un magmatismo de tipo arco y tienen una típica signatura geoquímica calcoalcalina y predominan las andesitas y dacitas. El volcanismo de transarco describe a la actividad volcánica del Mioceno que se desarrolla detrás (más al este) del frente de arco. Los productos volcánicos que se relacionan a estructuras transversales a voluminosas ignimbritas dacíticas.

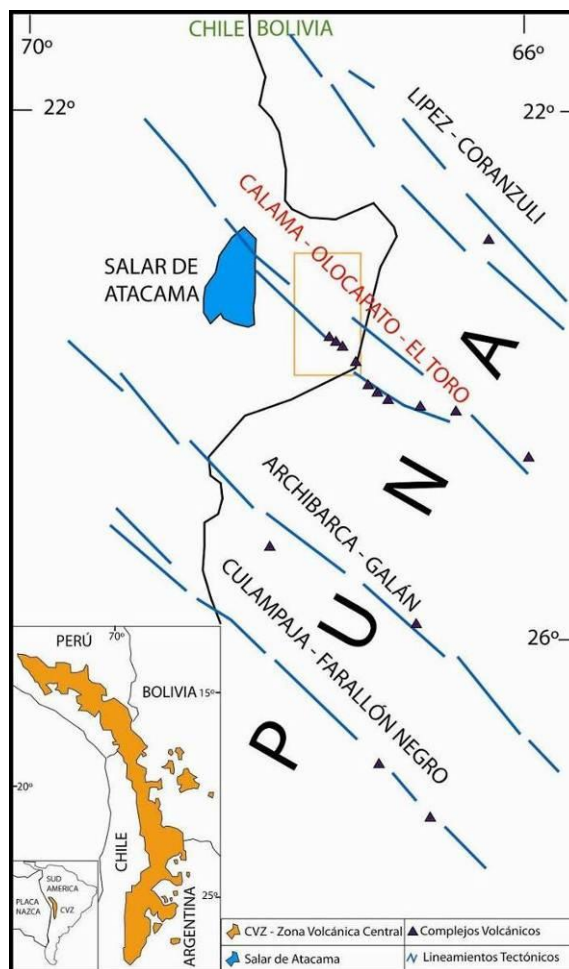


Figura 4.3 Bosquejo que indica distribución de volcanismo de arco y de trans-arco. En rojo, falla Calama – Olocapato – El Toro, triángulos muestran estrato-volcanes y centros ignimbríticos de la Puna; en cuadro amarillo, área de estudio, modificado de Matteini et al. (2002b).

5 GEOLOGÍA DE SUB-SUPERFICIE

5.1 CATASTRO DE POZOS PROFUNDOS

Se realizó un catastro de pozos profundos que se han construido en el sector donde se emplaza el sistema de cuencas piloto de la II Región de Chile, recopilando información para 47 pozos (Anexo A). Las fuentes de la información que se ha recolectado son el EIA Proyecto Pampa Colorada (2007) y el informe "Disponibilidad de Recursos Subterráneos en el Sistema Tuyajto, II Región de Antofagasta" (EMSA, 2007).

La Figura 5.1 muestra un esquema con la ubicación de los 47 pozos. Los pozos identificados se ubican generalmente en las llanuras aluviales, en los sectores topográficamente más bajos de cada cuenca. Los pozos de diferentes profundidades, suman un total de 10.422 metros perforados.

El objetivo de realizar un catastro de los pozos existentes en el sistema de cuenca piloto es recolectar antecedentes para la litología que se ha descrito durante las campañas de construcción de los pozos, y conocer además el nivel estático que se ha medido, de manera de conocer a la profundidad a la cual se encuentra el nivel freático.

Para efectos de la reconstrucción geológica de sub-superficie que se ha realizado en el presente estudio, se han considerado para el análisis a los pozos que se ubican dentro del sector delimitado por las cuencas piloto que tengan una profundidad > 100 m, incluyendo además el registro lito-estratigráfico del pozo PAAR-2, ubicado en Salar Aguas Calientes 3.

En la Tabla 5.1 se indican las características generales de los pozos, tales como: identificación, ubicación, coordenadas UTM, cota terreno, cota napa, profundidad napa, profundidad de pozo. Los niveles estáticos que se indican en la Tabla 5.1 fueron medidos entre los meses de marzo y abril del año 2008.

Para la construcción de la mayor parte de los pozos, se utilizó la técnica de perforación mediante circulación aire reverso y doble tubo (DTRC). Los pozos cuyo índice culmina en -DC, corresponden a perforaciones con diamantina,

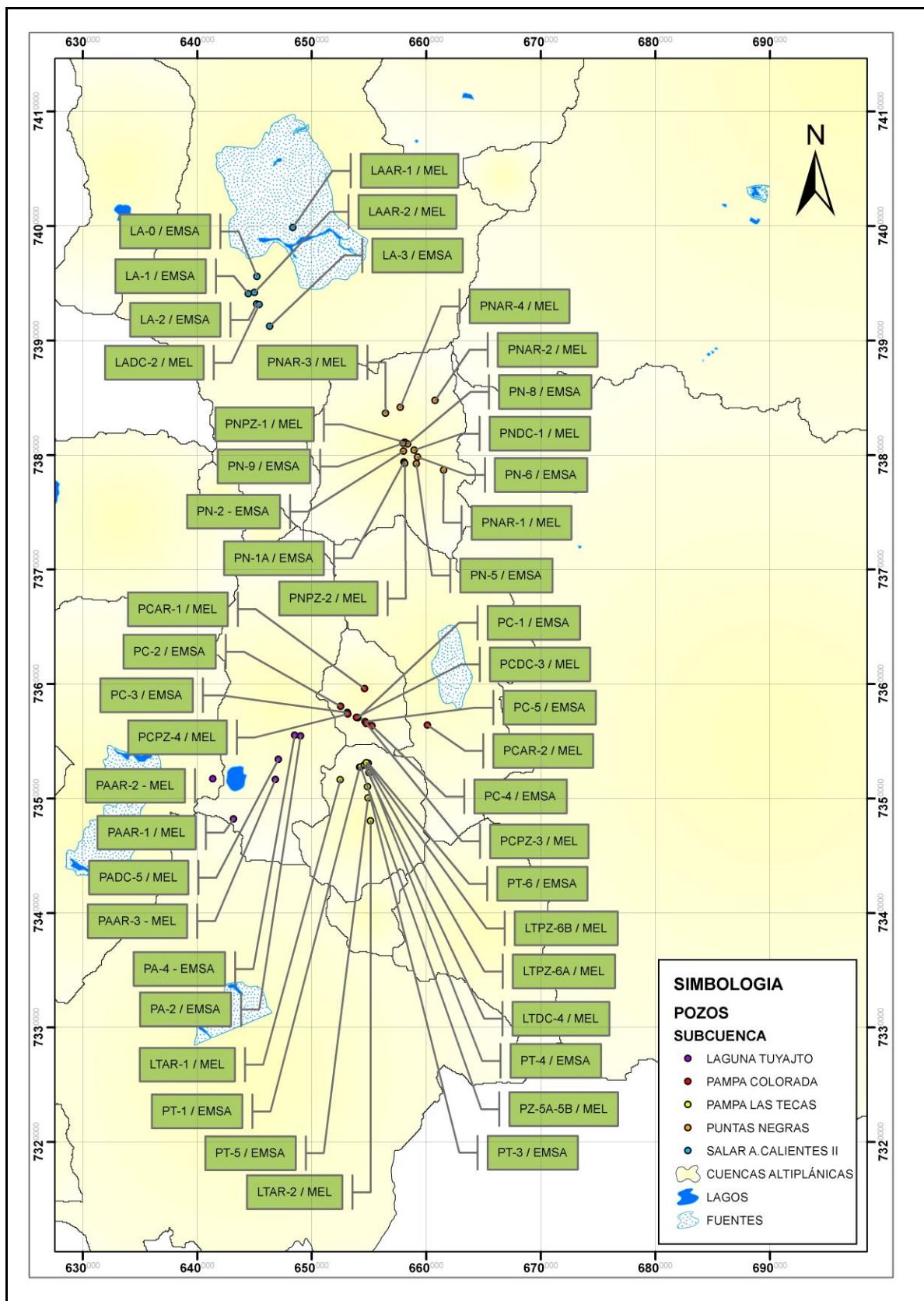


Figura 5.1 Ubicación de pozos profundos > 100 en sector de cuencas piloto de la Puna de Atacama.

Tabla 5.1 Catastro de pozos > 100 m para el sector de las cuencas piloto de la II Región de Chile

Pozo	Ubicación	Coordenadas UTM (PSAD 56)		Cota terreno (m s.n.m.)	Cota napa (m s.n.m.)	Prof. Napa (mbs)	Prof. Pozo (m)
		Norte (m)	Este (m)				
LA-0	Salar A. Calientes 2	7395588	645217	4.219,75	4.207,17	12,58	105
LA-1	Salar A. Calientes 2	7394080	644466	4.234,36	4.210,54	23,82	202
LA-2	Salar A. Calientes 2	7393190	645194	4.248,04	4.213,65	34,39	202
LA-3	Salar A. Calientes 2	7391251	646336	4.304,89	4.214,66	90,23	201
LAAR-1	Salar A. Calientes 2	7388880	648364	4.352,42	4.216,89	135,53	230
LAAR-2	Salar A. Calientes 2	7394197	644993	4.241,95	4.208,50	33,45	150
LADC-2	Salar A. Calientes 2	7393139	645409	4.251,44	4.213,63	37,81	230
PN-1A	Puntas Negras	7379393	658068	4.361,20	4.322,05	39,15	203
PN-2	Puntas Negras	7380329	658018	4.362,43	4.321,85	40,58	145
PN-5	Puntas Negras	7379247	659147	4.355,92	4.321,78	34,14	201
PN-6	Puntas Negras	7379813	659248	4.366,14	4.321,69	44,45	200
PN-8	Puntas Negras	7380970	658374	4.374,64	4.321,75	52,89	200
PN-9	Puntas Negras	7381034	657973	4.374,06	4.321,77	52,29	200
PNAR-1	Puntas Negras	7378686	661521	4.451,44	4.322,73	128,71	300
PNAR-2	Puntas Negras	7384776	660767	4.445,98	4.321,68	124,30	240
PNAR-3	Puntas Negras	7383662	656456	4.407,35	4.320,85	86,50	230
PNAR-4	Puntas Negras	7384162	657730	4.450,78	4.321,26	129,52	250
PNDC-1	Puntas Negras	7380424	658933	4.369,28	4.321,59	47,69	270
PNPZ-1	Puntas Negras	7381107	658132	4.376,51	4.321,64	54,87	250

PNPZ-2	Puntas Negras		7379267	658125	4.364,55	4.322,04	42,51	250
PC-1	Pampa Colorada		7357059	654028	4.283,64	4.195,37	88,27	200
PC-2	Pampa Colorada		7358054	652526	4.261,99	4.194,49	67,50	200
PC-3	Pampa Colorada		7357511	653109	4.269,07	4.195,29	73,78	200
PC-4	Pampa Colorada		7356340	655253	4.291,52	4.194,17	97,35	200
PC-5	Pampa Colorada		7356708	654652	4.291,97	4.194,92	97,05	200
PCAR-1	Pampa Colorada		7356584	654612	4.364,14	4.194,39	169,75	240
PCDC-3	Pampa Colorada		7357068	653899	4.281,96	4.195,13	86,83	240
PCPZ-3	Pampa Colorada		7356530	654771	4.290,75	4.194,51	96,24	231
PZN-4	Pampa Colorada		7357388	653155	4.270,49	4.195,24	75,25	209
DC-5	Laguna Tuyajto		7353419	647075	4.088,51	4.038,17	50,34	382
PA-2	Laguna Tuyajto		7355454	649013	4.169,96	4.051,92	118,04	195
PA-4	Laguna Tuyajto		7355522	648505	4.161,40	4.050,61	110,79	203
PAAR-1	Laguna Tuyajto		7348212	643170	4.069,05	4.024,70	44,35	203
PAAR-3	Laguna Tuyajto		7351655	646820	4.075,80	4.037,56	38,24	200
LTAR-1	Pampa Las Tepas		7351271	652955	4.275,70	4.089,75	185,95	240
LTAR-2	Pampa Las Tepas		7351626	652490	4.288,97	4.112,00	176,97	280
LTDC-4	Pampa Las Tepas		7352930	654592	4.183,70	4.099,41	84,29	242
LTPZ-6A	Pampa Las Tepas		7352930	654592	4.187,82	4.102,23	85,59	210
LTPZ-6B	Pampa Las Tepas		7352940	654803	4.185,90	4.099,47	86,43	216
LTPZ-5A	Pampa Las Tepas		7353115	654770	4.182,11	4.098,42	83,69	200
PT-1	Pampa Las Tepas		7352737	654192	4.181,56	4.098,78	82,78	200
PT-3	Pampa Las Tepas		7351035	654874	4.213,60	4.099,61	113,99	200

	Tecas						
PT-4	Pampa Las Tecas	7352249	655000	4.203,48	4.099,53	103,95	200
PT-5	Pampa Las Tecas	7350049	654911	4.230,98	4.099,89	131,09	200
PT-6	Pampa Las Tecas	7353071	654938	4.188,44	4.099,31	89,13	200
PCAR- 2	Salar El Laco	7356418	660098	4.312,48	4.234,55	77,93	222
PAAR- 2	Salar A. Calientes 3	7351716	641359	4.017,29	3.992,32	24,97	200

lo que aporta con caracterizaciones litológicas adecuadas que permiten ser correlacionadas con las descripciones a partir de los cutting recuperados mediante el método común de aire reverso.

En general, se espera que las unidades geológicas reconocidas bajo la superficie e identificadas en los registros lito-estratigráficos de los pozos perforados, se correlacionen con las principales unidades geológicas que se reconocen en superficie, y que se han descrito en el capítulo anterior. Se hace complejo identificar y correlacionar las unidades geológicas de sub-superficie por los siguientes motivos. En primer lugar, el material extraído de los pozos mediante el método de aire reverso corresponde principalmente a fragmentos o cutting, que representan las diferentes unidades de ignimbrita. Las ignimbritas pueden diferenciarse en base a su depositación, diferencias mineralógicas, grado de soldamiento, porcentaje y tipo de matriz, contenido en líticos, pómez, fiammes, edades, entre otras. Las descripciones litológicas realizadas no hacen alusión a estas características descriptivas. En segundo lugar, y probablemente debido al método de perforación, las descripciones litológicas son pobres de información, y en otros casos poco confiables, ya que en general no se correlacionan con las descripciones en diamantina. Se suma el hecho de que las perforaciones han sido realizadas por diferentes empresas contratistas, lo que tiene como consecuencia que la modalidad de las descripciones varíe.

5.2 ESTRATIGRAFÍA DE CUENCAS PILOTO

Se describen las diferentes unidades de roca que se reconocen bajo la superficie de cada cuenca piloto, unificando las descripciones lito-estratigráficas recolectadas durante las campañas de perforación de los pozos. Estas descripciones analizadas de manera conjunta permiten

comprender y modelar la geología de sub-superficie de la zona de estudio, lo que en una etapa posterior contribuye a definir y caracterizar las unidades hidrogeológicas o acuíferos.

Todas las perforaciones indican la existencia de una unidad sedimentaria superior compuesta por porcentajes variables de gravas, arenas, limos y arcillas. La subyace diferentes unidades de ignimbritas, que en algunas ocasiones presentan intercalaciones de horizontes erosionados/meteorizados compuestas por fracciones variables de gravas, arenas, limos y arcillas, intercalaciones de lavas y/o brechas volcánicas, y lentes de arcilla muy localizadas.

Es importante resaltar que ninguna de las perforaciones realizadas identifica la presencia de alguna unidad de roca que pudiera correlacionarse de manera evidente con el basamento rocoso, compuesto por rocas pre-miocenas. No se identificaron niveles salinos en profundidad que pudieran corresponder a depósitos evaporíticos más antiguos y que podrían estar aportando sales a las aguas subterráneas. Finalmente, hay que tener en cuenta que los niveles arcillosos detectados son muy locales, razón por la cual se descarta la posibilidad de identificar un estrato confinante generalizado que pudiera indicar la presencia de un acuífero confinado.

5.2.1 Estratigrafía de cuenca Salar de Aguas Calientes 2

Los pozos en la cuenca del Salar de Aguas Calientes 2 se construyeron orientados NW-SE sobre la pampa Loma Amarilla norte, en el suroeste de la cuenca, y al sur del salar (Figura 5.2). Los pozos de la cuenca varían en profundidad entre los 105 y 230 m bajo el nivel de la superficie. Todos los pozos perforan inicialmente un nivel poco potente de relleno aluvial, compuesto por gravas volcánicas insertas en una matriz arenosa y limosa, provenientes de la erosión de los depósitos volcánicos del cordón de Puntas Negras. Bajo el nivel sedimentario, se reconocen diversas unidades ignimbríticas que varían su composición con la profundidad. La unidad superior se compone por una toba andesítica con cristales de plagioclasa y anfíbola. La subyace una ignimbrita lito-cristalina andesítica a dacítica con fenocristales de plagioclasa, cuarzo y biotitas oxidadas. Finalmente, se identifica una ignimbrita lito-cristalina riódacítica con unos característicos ojos de cuarzo y biotitas. Se reconocen intercalaciones de horizontes de arenas (LAAR-1, LAAR-2) con óxidos de hierro.

Las ignimbritas pueden ser correlacionada con la ignimbrita Tuyajto en el techo, y luego la subyace las ignimbritas Pampa Chamaca (de poca potencia) y Atana. La ignimbrita riodacítica con característicos ojos de cuarzo, no ha podido correlacionarse con ninguna de las ignimbritas descritas.

5.2.2 Estratigrafía de cuenca Puntas Negras

La mayor parte de los pozos construidos en esta cuenca se ubican sobre la Pampa Puntas Negras, hacia el centro de la superficie de la hoya hidrográfica. Los pozos denominados con el prefijo PNAR-, son de mayor profundidad (230 – 300 m) y se distribuyen sobre sectores topográficamente más altos, tanto en el norte (PNAR-2/3/4) como en el sureste de la cuenca (PNAR-1). Se identifica hacia el techo una cobertura aluvial que corresponde a los depósitos sedimentarios de la cuenca, y que se compone por arenas y gravas de origen volcánico y clastos angulares, insertos en una matriz arenosa-limosa. Bajo la cobertura aluvial, se identifican dos unidades ignimbríticas; una ignimbrita lito-cristalina dacítica con fenocristales de plagioclasa, cuarzo y biotitas oxidadas, otra inferior, lito-cristalina y riodacítica con unos característicos ojos de cuarzo y biotitas. Se identifican potentes intercalaciones de lavas (PNPZ-2, PNAR-1), horizontes intensamente alterados donde predominan los óxidos de hierro (PNPZ-1), y horizontes sedimentarios (PNDC-1, PNAR-3). A profundidades mayores que los 230 m se reconoce una toba cristalina silicificada y brechas de origen volcánico (PNDC-1).

Las ignimbritas se puedan correlacionar en el techo, con las ignimbritas Pampa Chamaca y Atana, y hacia la base con la ignimbrita riodacítica.

5.2.3 Estratigrafía de cuenca Laguna Tuyajto

En la cuenca Laguna Tuyajto se han construido pozos profundos que se ubican alineados hacia al oriente de la laguna, en dirección NE-SW. Estos cubren el sector central y sur de la hoya hidrográfica, y sus profundidades varían entre los 195 y 382 m de profundidad. Los pozos se caracterizan por presentar una cobertura aluvial compuesta por gravas y arenas oligomícticas de fragmentos de tobas y lavas, e insertos en una matriz de arena y poco limo. Bajo este nivel sedimentario, se reconocen diversas unidades de

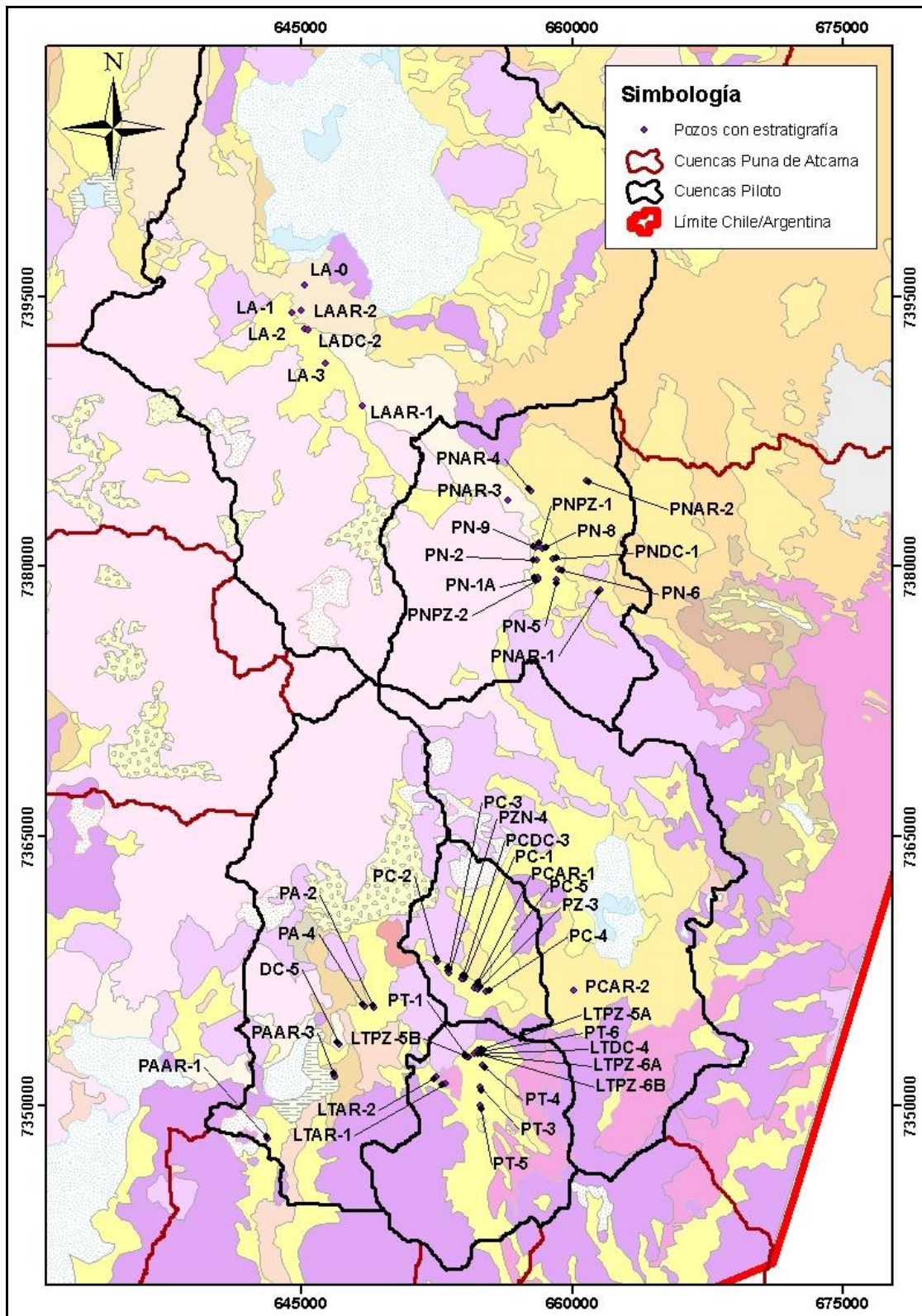


Figura 5.2 Ubicación de pozos con litoestratigrafía y mapa geológico de superficie de la Puna de Atacama, modificado de las Hojas Toconao (Ramírez y Gardeweg, 1982) y Río Zapalero (Gardeweg y Ramírez, 1985), escala 1:250.000.

ignimbritas. En el techo, y hacia el NE de la cuenca, se identifica una toba cinerítica gris con escasos cristales de cuarzo. La subyace una unidad de toba cristalina dacítica con cristales de plagioclasa, cuarzo y biotita. Se identifica hacia la base, una unidad potente de tobas de ceniza con cristales de Bt, Qz y Pg. El pozo PADC-5 presenta un potente intercalación de lavas andesíticas (62 m).

Hacia el occidente de la cuenca, las lavas identificadas en los pozos se correlacionan espacialmente con las del Conjunto de Volcanes I, mientras que las lavas identificadas en el pozo PADC-5, hacia el NE de la cuenca, se correlacionan espacialmente con lavas del Conjunto de Volcanes II. Se ha podido correlacionar la ignimbrita superior al NE de la cuenca, con la ignimbrita Patao. Las dos ignimbritas que la subyacen no se han podido correlacionar con ninguna de las ignimbritas descritas, y podrían corresponder a ignimbritas más antiguas.

5.2.4 Estratigrafía de cuenca Pampa Colorada

Los pozos de la cuenca Pampa Colorada están contruidos hacia el sur de la cuenca en dirección NW-SE, sobre la llanura aluvial. Se caracteriza por un cono aluvial ubicado al norte, y que transporta sedimentos desde el cordón Puntas Negras hacia los sectores más bajos. Todos los pozos indican que la geología de sub-superficie se compone por una cubierta sedimentaria aluvial, que puede alcanzar espesores importantes (80 m) para los pozos que se ubican sobre el cono aluvial ubicado al norte de la cuenca (PC-5 y PCAR-1). Esta cubierta sedimentaria se compone de gravas y arenas polimícticas sub-redondeadas, y clastos tobáceos y lávicos. Subyace a la cubierta sedimentaria dos unidades de ignimbritas de composición diferenciada. La ignimbrita superior está compuesta por una toba dacítica con fenocristales de cuarzo, plagioclasa y biotita. la subyace una unidad potente de tobas de ceniza con biotita, cuarzo y plagioclasa. Se han identificado potentes unidades de lavas y brechas andesíticas bajo la ignimbrita de composición dacítica, hacia el W de la cuenca (PCPZ-4, PCAR-1, PCDC-3). A 210 m de profundidad bajo el nivel de la superficie, el pozo PCDC-3 presenta un horizonte erosionado compuestos por arenas de origen volcánico de 7 m de espesor, seguido en profundidad por una brecha volcánica de al menos 24 m de espesor.

No se ha podido correlacionar a las dos unidades de ignimbrita identificadas con ninguna de las descritas anteriormente, sin embargo, estas si se correlacionan con las unidades ignimbríticas inferiores de la cuenca Laguna

Tuyajto. Las intercalaciones de lavas y brechas se correlacionan con las rocas pertenecientes al Conjunto de Volcanes II.

5.2.5 Estratigrafía de cuenca Pampa Las Tecas

Prácticamente todos los pozos de Pampa Las Tecas se han construido agrupados hacia el sector norte de la cuenca. En general, estos sondajes se han construido sobre una potente capa de depósitos sedimentarios, próxima al límite con la cuenca Pampa Colorada. La cuenca se caracteriza por presentar las mayores potencias de la cubierta aluvial sedimentaria (hasta 80 m de espesor) en comparación a las otras cuencas piloto. Este relleno aluvial se compone de gravas de color pardo y origen volcánico. Bajo la cubierta sedimentaria, se identifican dos unidades de ignimbrita que varían en composición. La unidad superior es una toba cinerítica, poco soldada, con cristales de biotita, cuarzo y plagioclasa. La unidad inferior está compuesta por una toba andesítica con cristales de plagioclasa y anfíbola. Se identifican intercalaciones de lava en los pozos LTPZ-5A/5B. El pozo LTAR-2 presenta hacia el final de la perforación, un estrato compuesto por una brecha volcánica de 80 m de espesor. Se identifican tobas silicificados a mayor profundidad, en los pozos LTAR-2 Y LTDC-4. El pozo LTAR-1 presenta a profundidad intermedia una unidad volcánica de 60 m de espesor compuesto por una intercalación rítmica de lavas y tobas de composición andesítica.

En esta cuenca, se ha correlacionado la ignimbrita superior con la ignimbrita Guaitiquina. No se ha podido correlacionar la unidad ignimbrítica inferior con ninguna de las ignimbritas descritas. Las secuencias de lavas y tobas del Mioceno pertenecen al Conjunto de Volcanes I.

5.2.6 Estratigrafía de cuenca Salar El Laco

El catastro de pozos indica que existe un único pozo (PCAR-2), ubicado hacia el extremo suroeste de la cuenca, cercano al límite sureste de Pampa Colorada. El sondaje indica que el relleno se compone en el techo por depósitos sedimentarios que corresponden al relleno aluvial compuesto por gravas de origen volcánico. Subyacen dos unidades de ignimbrita, donde la superior se compone por una toba dacítica, y la inferior por una toba andesítica. Se identifica un horizonte meteorizado de 2 m de espesor entre las unidades ignimbríticas, a unos 150 m bajo la superficie, compuesto por arenas de origen volcánico.

Las unidades de ignimbrita pueden correlacionarse con la Ignimbrita Guatiquina en el techo, y con la misma unidad andesítica reconocida en la vecina cuenca Pampa Las Tepas.

5.3 PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

5.3.1 Generalidades

Para la elaboración del EIA Pampa Colorada (2007) se llevó a cabo una campaña geofísica entre los años 2004 y 2005, utilizando el método de transiente electromagnético (TEM). La campaña fue realizada con el fin de obtener mayor información acerca de los materiales de sub-superficie en el área de estudio, particularmente para conocer lo que sucedía entre los límites de las cuencas hidrográficas. Durante las exploraciones iniciales realizadas en el sector de la Puna de Atacama, EMSA (2007) también llevó a cabo un número limitado de sondeos TEM en septiembre del 2006 y febrero del 2007.

La técnica de TEM es un método electromagnético de prospección geofísica que funciona en el dominio del tiempo. Operacionalmente, se aplica una corriente eléctrica variable a una espira de cable aislado desplegado con una forma usualmente cuadrada sobre el terreno. Esta corriente genera un campo magnético (principal) que induce corrientes de conducción en el subsuelo. Luego se interrumpe la corriente y se mide el campo magnético (secundario) inducido por las corrientes de conducción, el cual posee una respuesta transiente, es decir, dependiente del tiempo. Este transiente magnético se mide mediante la detección del voltaje que se induce en un loop receptor o bobina. Las corrientes inducidas en el subsuelo se distribuyen de acuerdo al mecanismo físico de difusión y el comportamiento que muestran depende de las resistividades, tamaños y formas de las estructuras geoelectricas sub-superficiales. El análisis numérico de la curva transiente, o de decaimiento en el tiempo del campo magnético, permite inferir información cuantitativa acerca de los parámetros geoelectricos del subsuelo. Esta respuesta es controlada por las propiedades del medio, su humedad y las diferencias relativas de conductividad que posean los distintos materiales, y dependen de propiedades tales como la mineralogía (litología) y micro-estructura (porosidad, granulometría, fracturamiento) de las rocas, las cuales varían significativamente según la profundidad. Afecta de manera importante a la resistividad, el tipo de fluidos que contengan las rocas (grado de saturación, salinidad, etc.). La existencia de estructuras y fenómenos de

alteración también producen cambios de la resistividad que pueden ser detectados con un estudio geoelectrico. En cualquier área de exploración, sólo es posible resolver los efectos relativos de cada uno mediante la comparación con información de sondajes.

A continuación se presenta una compilación de las definiciones, resultados y conclusiones más importantes que se obtienen a partir de los trabajos mencionados.

5.3.2 Geofísica EIA

A solicitud de Minera Escondida y en el marco del desarrollo de sus proyectos de exploración de aguas subterráneas, la empresa Water Management Company (WMC) encargó a Geodatos Ltda. efectuar un estudio geofísico mediante la técnica de Transiente Electromagnético (TEM). Se realizaron 273 sondeos TEM que cubren alrededor de 120 km (Figura 5.3). En el trabajo de exploración, se usó un tamaño de circuito cerrado de 200 x 200 metros y los sondeos se llevaron a cabo separados en tramos de entre unos 200 y unos 800 m a lo largo de las líneas de perfiles. En los márgenes de las cuencas se usó una separación de sondeos de 200 m, para lograr una mejor resolución para la evaluación de flujos entre cuencas. Al aplicar este método en este entorno de resistividad característico y con el rango de tiempo de registro empleado, pueden resolverse bordes con significativos contrastes de resistividad, que varían en un rango de profundidad de 60 a 500 m.

WMC definió 5 unidades geoelectricas en el área que son las que se describen a continuación. Las unidades 4 y 5 solo se identifican en el sector sur, en las cuencas Laguna Tuyajto, Pampa Colorada y Pampa Las Tecas.

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

Unidad 2: Exhibe resistividades intermedias generalmente del orden de 10 a 50 ohm-m. Más comúnmente, las resistividades corresponden a 25 a 50 ohm-m y se correlacionan con roca fracturada con un bajo contenido de arcilla (mejor permeabilidad), un buen almacenamiento y una buena calidad

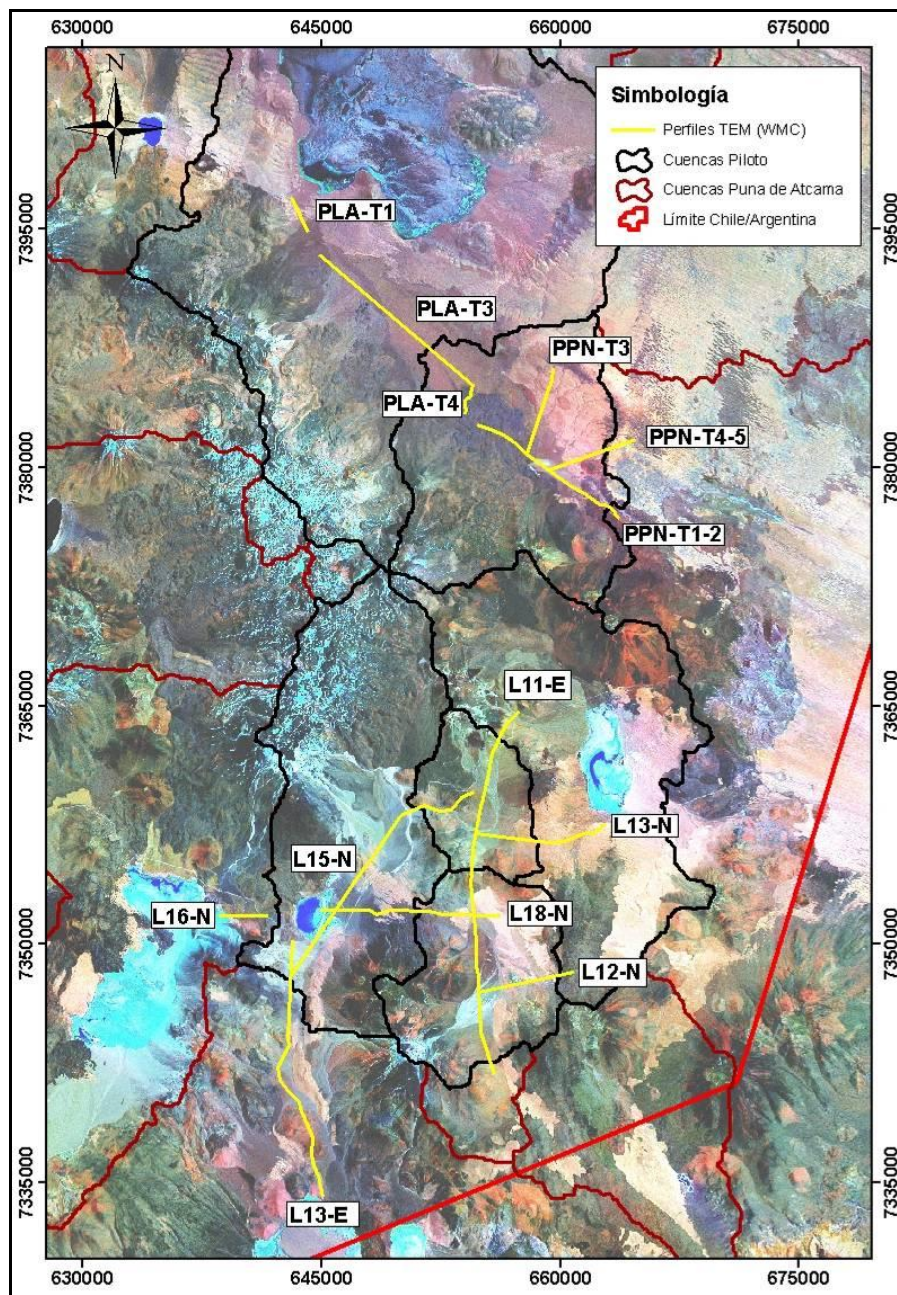


Figura 5.3 Ubicación de perfiles geofísicos TEM (en amarillo) realizados a solicitud de Water Management Company (WMC) para el EIA Pampa Colorada (2007), por la empresa Geodatos Ltda.

del agua. Cuando esta segunda capa muestra resistividades del orden de 10 a 25 ohm-m se indica agua más salina o una roca más alterada, rica en arcilla. El espesor de esta capa varía de 50 a 400 m.

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

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

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

Para el sector norte se concluye con respecto a los sondeos TEM que existe una buena correlación de los datos con la información litológica de los pozos. Se logra distinguir el acuífero principal que está compuesto principalmente por las unidades de tobas inferiores, mientras que las tobas de profundidad intermedia no están resueltas por los sondeos TEM como un acuífero. El acuífero es relativamente homogéneo y tiene una buena extensión lateral, especialmente en Puntas Negras. Hacia la base de las tobas inferiores se produce una disminución de la conductividad, que puede correlacionarse con una menor permeabilidad/almacenamiento; el basamento no está resuelto en forma clara, es decir, es probable que el acuífero tenga un espesor mayor a 400 m.

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

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

Es importante destacar la continuidad que existe en las resistividades graficadas en los perfiles TEM que fueron ubicados de manera de conectar dos cuencas aledañas. En general, no se identifican discontinuidades en los límites de las cuencas.

5.3.3 Geofísica EMSA

Los perfiles geofísicos efectuados por EMSA (2007) estuvieron orientados principalmente a investigar las condiciones subterráneas en las divisorias de aguas de las cuencas hidrológicas, y por ello se realizaron perfiles longitudinales vinculando cuencas y perfiles transversales para definir estas posibles áreas de comunicación.

Se realizaron 131 sondeos TEM que cubren alrededor de 60 km, en un total de 16 perfiles. Estos perfiles se conectan a los perfiles realizados por encargo del EIA Pampa Colorada (2007), para así prolongar el área investigada. Ellos identifican dos unidades geoelectricas contrastantes en su respuesta resistiva. Ningún perfil geofísico registra resistividades que indiquen la presencia de un basamento de rocas impermeables, sino que las resistividades tienden a disminuir con la profundidad, insinuando un posible aumento de la salinidad y/o temperatura de los fluidos contenidos en las rocas.

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

Unidad Inferior: Presenta un rango de resistividades inferior a 50 ohm/m y está integrada por rocas volcánicas y volcano-clásticas fracturadas y saturadas. En las proximidades a los salares, esta unidad está conformada por sedimentos saturados, de granulometría variable.

Los perfiles que conectan a las cuencas Salar El Laco con Pampa Colorada y Pampa Las Tepas muestran una clara conexión subterránea, representada por la continuidad de la unidad geo-eléctrica inferior. Los perfiles transversales realizados para las mismas cuencas anteriores han definido franjas de conexión hidráulica entre las cuencas, cuyos límites laterales no se han identificado por la imposibilidad de realizar una prospección más extensa, debido a impedimentos topográficos propios de las cuencas.

5.4 DEFINICIÓN DE UNIDADES GEOLÓGICAS DE SUB-SUPERFICIE

En general, el análisis realizado en este estudio a la lito-estratigrafía, indica que la sub-superficie del sector donde se han construido los pozos se describe de techo a base por: un nivel aluvial sedimentario al cual subyacen unidades ignimbríticas diferenciadas, de las cuáles algunas han podido correlacionarse con las ignimbríticas descritas en la superficie de las cuencas. Ocasionalmente se identifican horizontes sedimentarios de espesor considerable compuestos por porcentajes variables de grava, arena y finos que separan las unidades ignimbríticas. Se identifican además, intercalaciones de lavas y brechas pertenecientes a los conjuntos de lava I, II, y III.

Para definir las unidades de sub-superficie, se analizó el conjunto de datos lito-estratigráficos y geofísicos del sistema de cuencas piloto y se construyeron perfiles geológicos.

Se identifica una estratigrafía compuesta por una unidad superior que agrupa los depósitos sedimentarios aluviales y coluviales cuaternarios. La subyace una unidad de espesor variable compuesta por diferentes unidades ignimbríticas. En el sector norte del sistema de cuencas piloto, las ignimbríticas más cercanas a la superficie se han correlacionado, de base a techo, con las ignimbríticas Tuyajto, Pampa Chamaca y Atana. Se identifica una ignimbrítica riodacítica basal. En sector sur, se ha identificado a la ignimbrítica Tuyajto hacia el NE de la cuenca Laguna Tuyajto, y a la ignimbrítica Guaitiquina en las cuencas Pampa Las Tepas y El Laco. En las cuencas

Laguna Tuyajto y Pampa Colorada, se identifica ignimbrita dacítica, que subyace al relleno aluvial, bajo la cual se identifica otra unidad de tobas de ceniza con cristales de biotita, cuarzo y plagioclasa. Se identifican horizontes meteorizados/erosionados que se desarrollan en el contacto entre las diferentes ignimbritas, y que están mejor desarrollados en la zona norte, especialmente en Puntas Negras. Es probable que estos horizontes se hayan desarrollado durante una etapa de receso de la actividad volcánica, y producto de la meteorización y erosión de las rocas volcánicas preexistentes. Finalmente, se agrupa en una unidad a las lavas andesíticas, tobas, brechas silicificadas y arenas que se reconocen en profundidad en las cuencas Pampa Las Tecas y Pampa Colorada, y que podrían corresponder a unidades pre-cenozoicas. Se han construido 4 perfiles geológicos ubicados según se indica en la Figura 5.4 de manera de graficar la geología de sub-superficie en las diferentes cuencas.

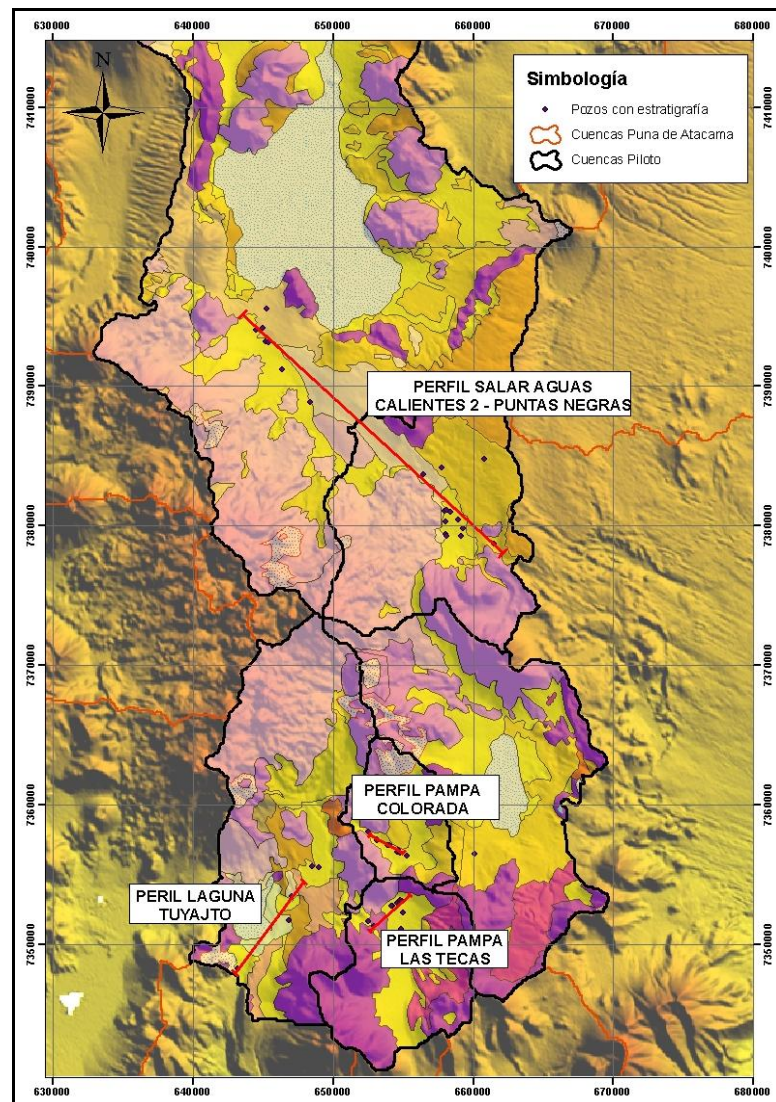


Figura 5.4 Ubicación de perfiles lito-estratigráficos.

Los perfiles geológicos permiten visualizar la geometría y distribución de las diferentes unidades geológicas en la sub-superficie (Figura 5.5, Figura 5.6, Figura 5.7 y Figura 5.8).

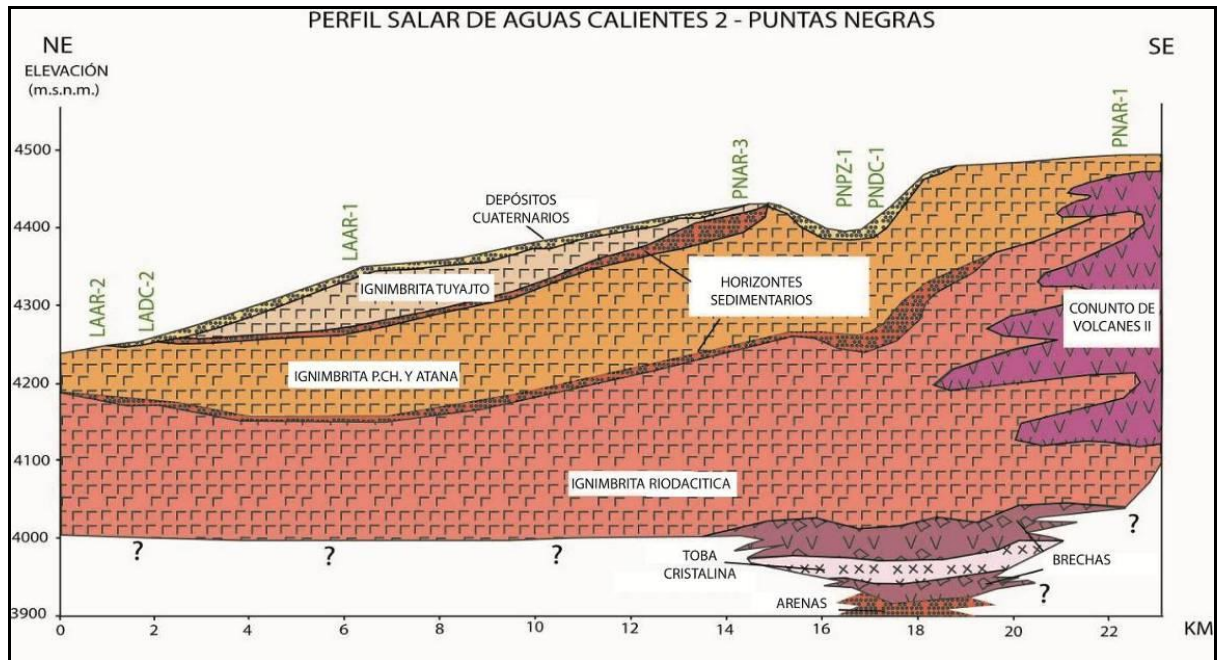


Figura 5.5 Perfil esquemático cuencas Salar de Aguas Calientes 2 – Puntas Negras.

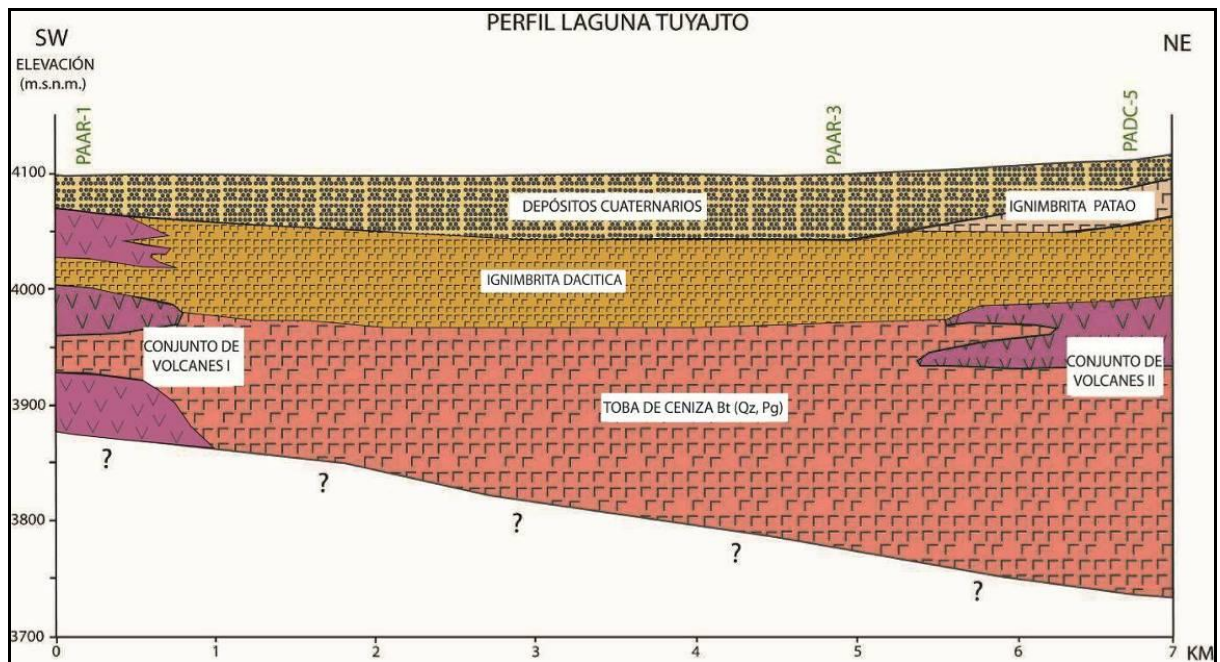


Figura 5.6 Perfil esquemático cuenca Laguna Tuyajto.

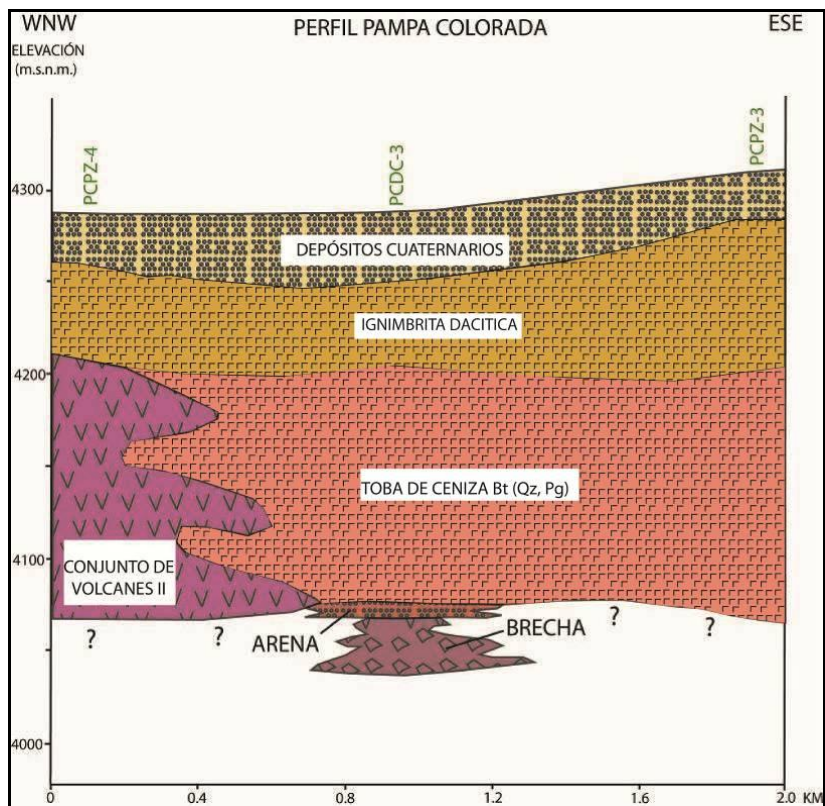


Figura 5.7 Perfil esquemático cuenca Pampa Colorada.

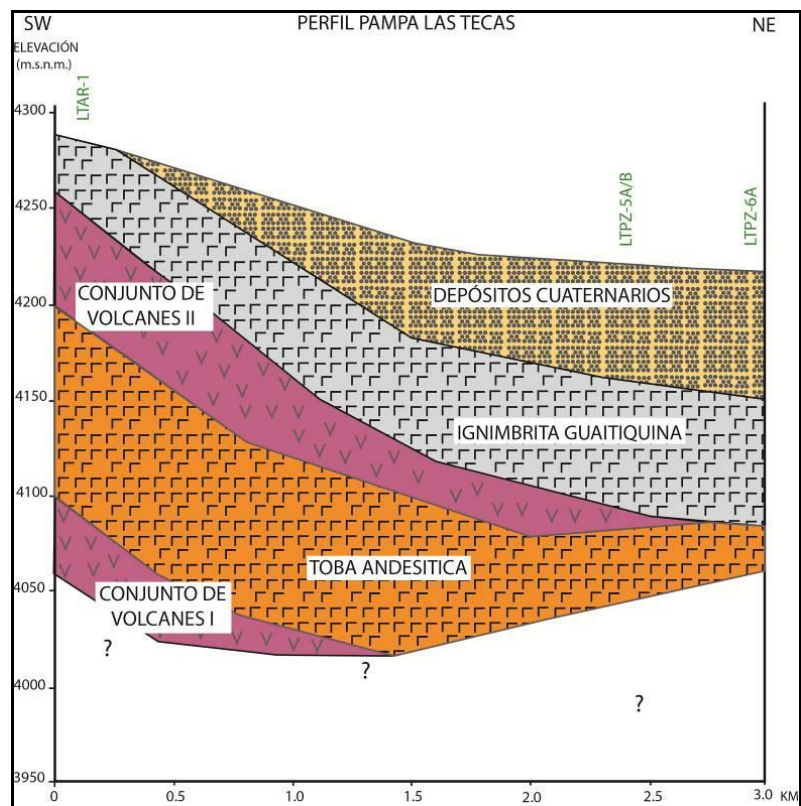


Figura 5.8 Perfil esquemático cuenca Pampa Las Tecas.

6 CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA

6.1 CLIMA

La II Región constituye una de las regiones más áridas del territorio nacional, en el cual las precipitaciones son muy poco frecuentes, y donde las áreas bajo los 3.000 m s.n.m. reciben una precipitación de menos de 50 mm por año, mientras que sobre los 4.000 m s.n.m., éstas pueden alcanzar un promedio sobre los 250 mm por año. Las escasas tormentas que se producen en la región generalmente se restringen a zonas altiplánicas y se producen durante los meses de verano por efectos de masas de aire provenientes de la cuenca amazónica. Este fenómeno se conoce como invierno boliviano o invierno altiplánico. Además, una serie de fenómenos climáticos inusuales y catastróficos, incluyendo precipitaciones torrenciales, tienden a producirse en años en que la corriente de El Niño avanza hacia el sur, calentando las aguas oceánicas al frente de Ecuador, Perú y el norte de Chile. A pesar de la gran cantidad de precipitaciones en el altiplano, el agua que alimenta a los recursos de agua superficial y subterránea es escasa, debido principalmente a las altas tasas de evaporación de la zona (Kampf, 1999).

Dado que en Chile las características topográficas varían considerablemente en un corte transversal de oeste a este, el clima también varía, influenciado por factores como la latitud, las corrientes atmosféricas y la altura. La considerable elevación de la Puna y su localización geográfica son los principales factores que explican las particulares condiciones climáticas que predominan en esa región. Estas se caracterizan por temperaturas relativamente bajas, valores reducidos de presión y de densidad del aire, y baja humedad atmosférica. Producto de la altura, la atmósfera local tiene un menor espesor óptico total de elementos absorbentes y dispersantes de la radiación solar, y como consecuencia presenta niveles relativamente elevados de radiación solar y de radiación ultravioleta durante los días despejados. Adicionalmente, el menor espesor óptico de los gases de efecto invernadero favorece un mayor enfriamiento radiativo nocturno de la superficie. La baja presión atmosférica se calcula en aproximadamente 620 hPa a 4000 m s.n.m., un 40% menor a la del nivel del mar. Dado este valor de presión y una temperatura promedio de 10°C, la densidad del aire se calcula en 0.9 kg/m³, lo que es un 35% inferior al valor correspondiente al nivel del mar. Los eventos de precipitación se asocian en su mayoría a tormentas locales de origen convectivo que se desarrollan durante la tarde, como resultado del fuerte calentamiento radiativo de la superficie (Aceituno, 1996). Estudios recientes indican que el clima en el Desierto de Atacama pudo haber sido solo semi - árido durante el Neógeno (Gaupp et al., 1999;

Hartley y Chong, 2002). Otros estudios demuestran períodos húmedos que han ocurrido en la historia geológica reciente (Kull y Grosjean, 1998; Latorre et al., 2003; Rech et al., 2002).

6.2 PRECIPITACIONES

Las precipitaciones están influenciadas por la altura en un sistema convectivo que genera lluvias estivales en el Altiplano. Estas tormentas son en general de corta duración y de poca extensión territorial. Las variaciones anuales de precipitaciones son grandes, presentándose series de años muy secos. La gran variabilidad que caracteriza este tipo de precipitaciones las hace difíciles de representar a través de métodos tradicionales. En primer lugar, la reducida extensión espacial de las lluvias hace que la relación entre los registros entre distintas estaciones sea muy variable, ya que suele ocurrir que mientras una estación registra una cierta tormenta, otra estación relativamente cercana queda fuera del radio de influencia. Además, la variabilidad interanual de las precipitaciones puede hacer que una misma estación tenga comportamientos aparentemente diferentes de un año a otro. Estadísticamente, se esperan correlaciones deficientes entre las precipitaciones registradas en distintas estaciones, así como bajas autocorrelaciones entre las lluvias registradas en una misma estación, por diferentes períodos (DGA, 2012).

En el sistema de cuencas piloto se dispone de 4 estaciones pluviométricas instaladas con el convenio PUC-DGA. Además, se seleccionaron 3 estaciones cercanas de la DGA, y se dispone de estadísticas de precipitación en 6 estaciones pertenecientes a la empresa GeoAguas Consultores. De las 13 estaciones disponibles 8 se encuentran dentro del sistema piloto.

La Tabla 6.1 presenta la ubicación y altitud de estas estaciones. Para las estaciones PUC-DGA en la II Región se dispone para el presente estudio de solamente de un año de estadística entre noviembre de 2007 y febrero de 2009, en las estaciones GeoAguas se dispone de aproximadamente 2 años de registro a partir del año hidrológico 2006-2007, y en las estaciones DGA se dispone de más de 20 años de registros de años completos. Por consiguiente, con los datos de las estaciones DGA es posible obtener estadígrafos sobre el comportamiento de largo plazo de la precipitación anual y mensual en la zona. En cambio los registros de las estaciones PUC-DGA y GeoAguas permiten establecer solamente el comportamiento puntal de la precipitación para los años hidrológicos 2006-2007 y 2007-2008.

Tabla 6.1 Estaciones pluviométricas seleccionadas para el sistema piloto

Nº	Fuente	Estación Pluviométrica	UTM (PSAD 1956)		Altitud [m s.n.m.]
			Este	Norte	
1	PUC-DGA	Tuyajto	646.828	7.353.961	4.187
2	PUC-DGA	El Laco	665.437	7.367.499	4.449
3	PUC-DGA	Puntas Negras	658.814	7.377.199	4.459
4	PUC-DGA	A. Calientes 2	641.914	7.398.591	4.323
5	DGA*	Camar	606.276	7.411.224	3.020
6	DGA*	Socaire	613.485	7.391.129	3.251
7	DGA*	Talabre	613.735	7.421.435	3.600
8	GeoAguas	Laco Estación Meteorológica	659.240	7.364.924	4.344
9	GeoAguas	Laco Camino Puntas Negras	656.630	7.372.398	4.683
10	GeoAguas	Laguna Tuyajto	644.260	7.352.781	3.990
11	GeoAguas*	ACS Evaporímetros (salar)	636.531	7.353.164	3.920
12	GeoAguas*	ACS sector Purichare	623.501	7.335.263	4.226
13	GeoAguas	Pampa Las Texas	655.571	7.344.709	4.480

*Estaciones fuera de sistema de cuencas piloto

En la Figura 6.1 se presenta la precipitación anual en las estaciones PUC-DGA, GeoAguas y DGA ordenadas de norte a sur. Se observa que el agua caída en las estaciones PUC-DGA, entre noviembre de 2007 y octubre de 2008, y en las estaciones GeoAguas es similar a la precipitación media registrada históricamente en las estaciones DGA.

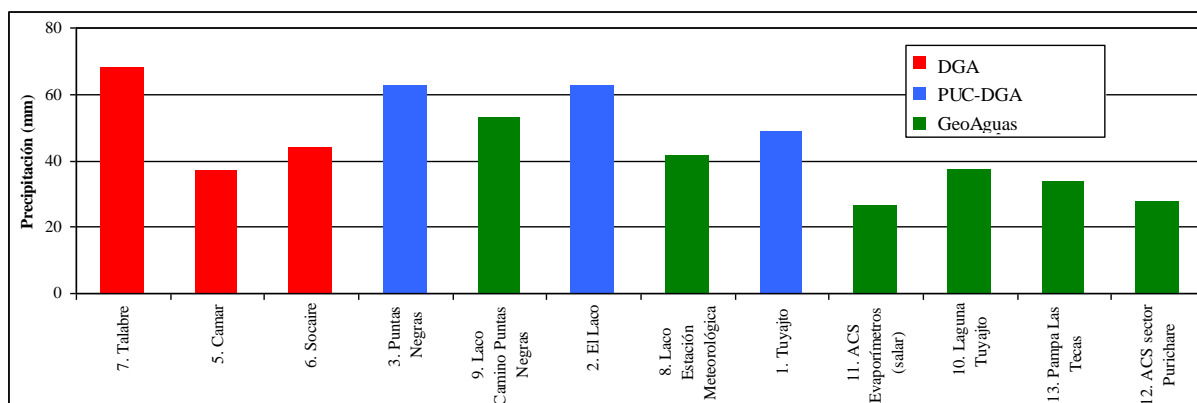


Figura 6.1 Precipitación media anual en las estaciones seleccionadas. El valor presentado para las estaciones nuevas del convenio PUC-DGA corresponde al año hidrológico (2007-2008).

El trazado de las isoyetas se realizó a través de una interpolación de los valores de precipitaciones medias anuales del año hidrológico de las estaciones analizadas (Figura 6.2), el que fue corregido por la topografía de la zona en función de los gradientes de precipitaciones calculados y teniendo como antecedente general las isoyetas trazadas en el Balance Hídrico de Chile (DGA, 1987). Se observa que en las áreas de exploración la precipitación media anual fluctúa entre 150 y 200 mm al año. Se reconocen épocas de abundancia de lluvia entre los años 1971 a 1976, 1982 a 1986 y 1998 a 2001, y épocas de marcada escasez desde 1967 a 1970, 1987 a 1995, y recientemente entre el 2002 y el 2006. Para los rangos de años más secos, las precipitaciones escasas varían intercalando años muy secos con otros menos secos.

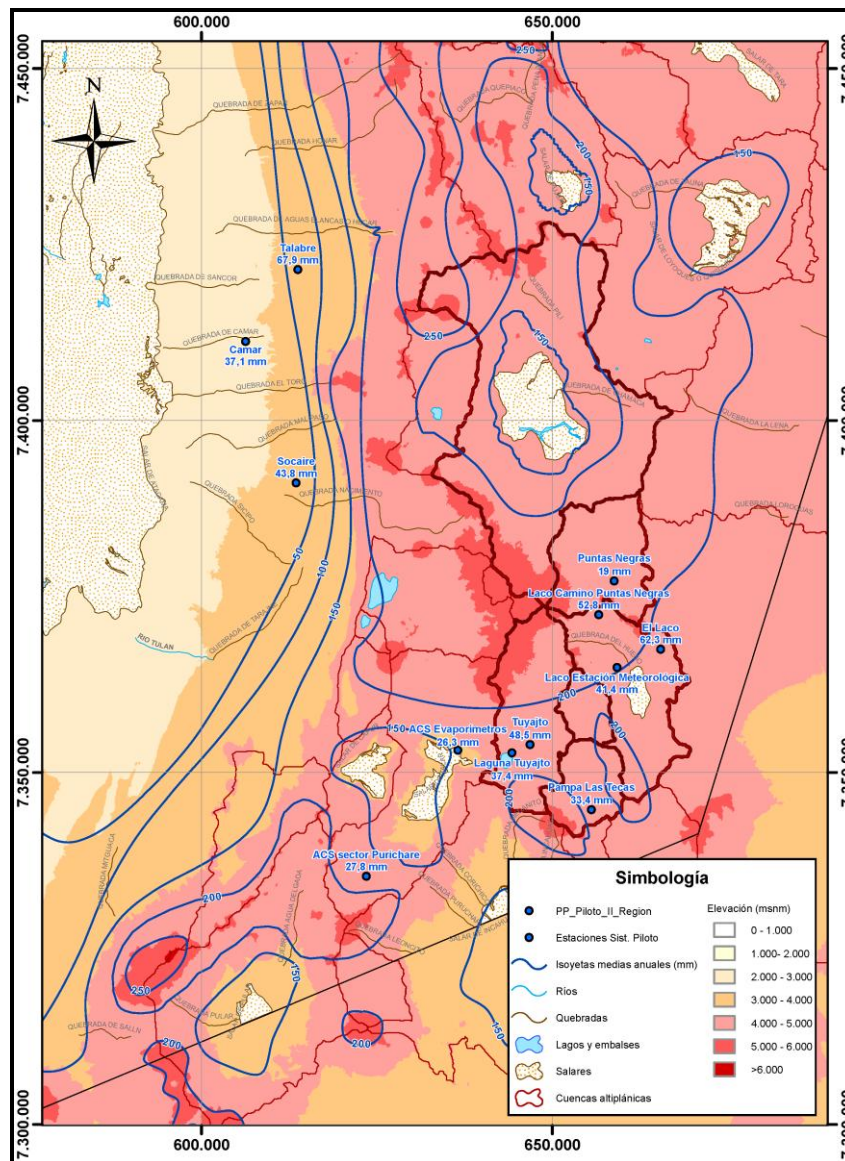


Figura 6.2 Mapa de Isoyetas de la Puna de Atacama, II Región de Chile. Fuente: [Elaboración PUC-DGA].

6.3 ESCURRIMIENTOS Y RED DE DRENAJE

Prácticamente a ninguno de los salares del norte de Chile, excepto al de Tara ubicado más al norte de la zona de estudio, confluyen cauces superficiales permanentes de importancia, y la gran mayoría son alimentados sólo por las lluvias y aguas subterráneas, suficientes como para formar pequeñas lagunas con un nivel freático inestable (Teillier y Becerra, 2003).

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

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

A pesar de la ausencia de cursos de agua superficial permanentes de importancia en el sector de las cuencas piloto, se realiza de manera complementaria, un trazado de la red de drenaje de la zona. Esta contempla a cada cuenca en particular, las cuales desarrollan diferentes diseños de redes, de acuerdo al relieve y tipo de roca que erodan. Las redes de drenaje se desarrollan esporádicamente, por lo que se mantienen lechos secos durante la mayor parte del año y se preservan las formas de acumulación, tales como los conos y llanuras aluviales.

Se ha identificado y trazado la red de drenaje para el sistema de cuencas piloto, basado en la identificación de incisiones fluviales utilizando los Modelos de Elevación Digital (DEM) del USGS e imágenes satelitales (Landsat y Google Earth). La red hidrográfica se presenta en la Figura 6.3.

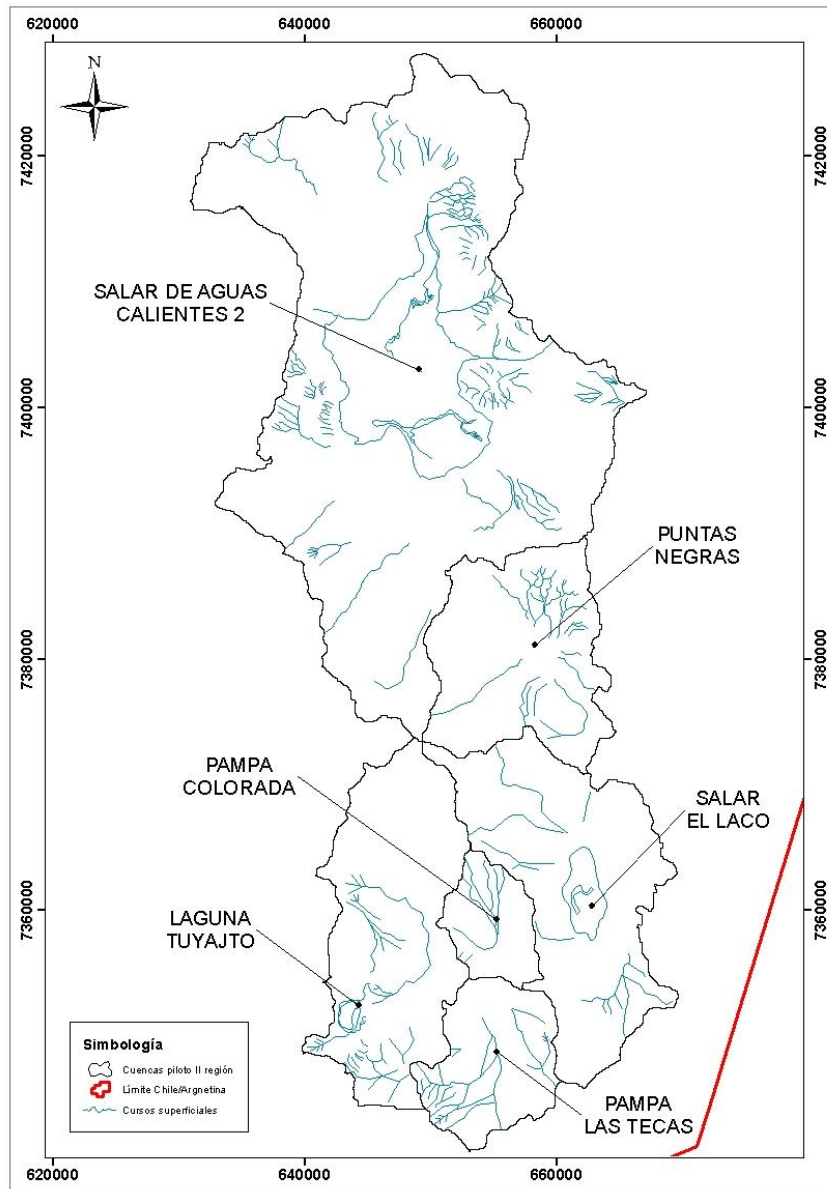


Figura 6.3 Red Hidrográfica de cuencas piloto de la II Región de Chile.

6.4 EVAPORACIÓN

En el sistema piloto de la II Región se dispone de 4 estaciones meteorológicas con registro de evaporación de tanque. La Tabla 6.2 presenta la ubicación de estas estaciones, altitud y vigencia, y en la Figura 6.4 se presenta su ubicación en forma gráfica.

Tabla 6.2 Estaciones meteorológicas con registros de evaporación seleccionadas para el sistema piloto de la II Región.

Nº	ID	Estación	UTM (PSAD 1956)		Altitud [m s.n.m.]	Estado	Años
			Este	Norte			
1	DGA*	Socaire	613.485	7.391.129	3.251	S	25
2	GA	El Laco (Sup.)	660.629	7.361.987	4.250	V	<1
3	GA	Tuyajto (Sup.)	644.159	7.352.607	4.048	V	<1
4	GA*	Talar (Sup.)	630.017	7.343.738	3.943	V	<1

*Estaciones fuera de sistema de cuencas piloto; GA: GeoAguas

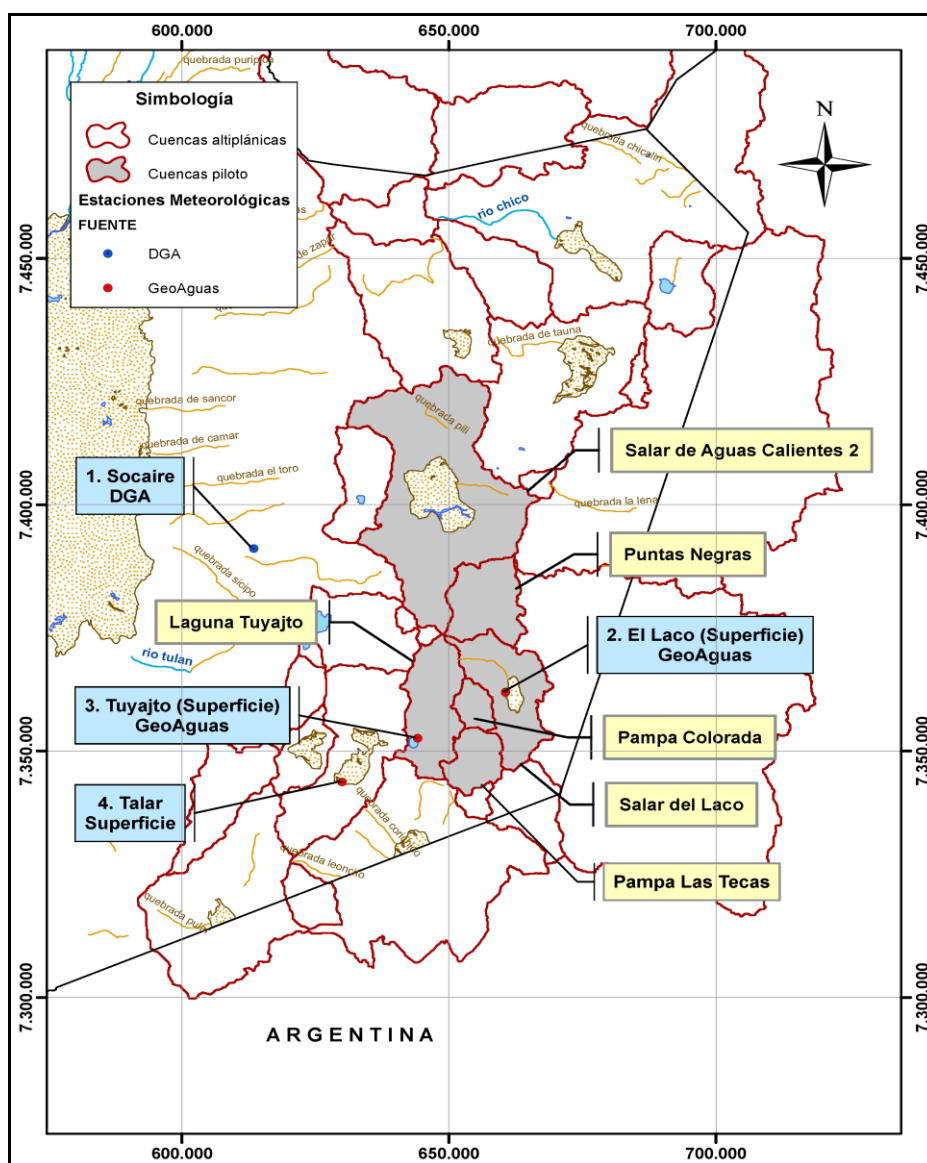


Figura 6.4 Estaciones meteorológicas con registros de evaporación seleccionada para el sistema piloto de la II Región.

En la estación Socaire (DGA) se dispone de información a nivel mensual y anual de series de evaporación total y media. En cambio en las estaciones GeoAguas se dispone registros solamente a nivel mensual.

La Figura 6.5 presenta la variación de la evaporación a lo largo de los meses del año, en las estaciones seleccionadas. Se observa que los meses con mayor evaporación son noviembre, diciembre y enero, alcanzando valores de hasta 350 mm mensuales en la estación Socaire. Por otra parte la menor evaporación ocurre en los meses de junio y julio con valores de alrededor de 170 mm en la estación Socaire. En las estaciones pertenecientes a GeoAguas se ordenó la serie de acuerdo al año hidrológico. Se observa un comportamiento similar en la variación mensual de la evaporación respecto a la estación Socaire. Sin embargo, la magnitud del agua evaporada es menor en las estaciones GeoAguas que en la estación Socaire, lo cual se debe a que esta última estación se encuentra localizada aproximadamente 1.000 m s.n.m. debajo de la estaciones GeoAguas. No existen datos para las estaciones de GeoAguas para los meses de junio y julio del 2006. En caso de realizarse un balance hídrico, se debe tener en consideración además, el fenómeno de la evapotranspiración.

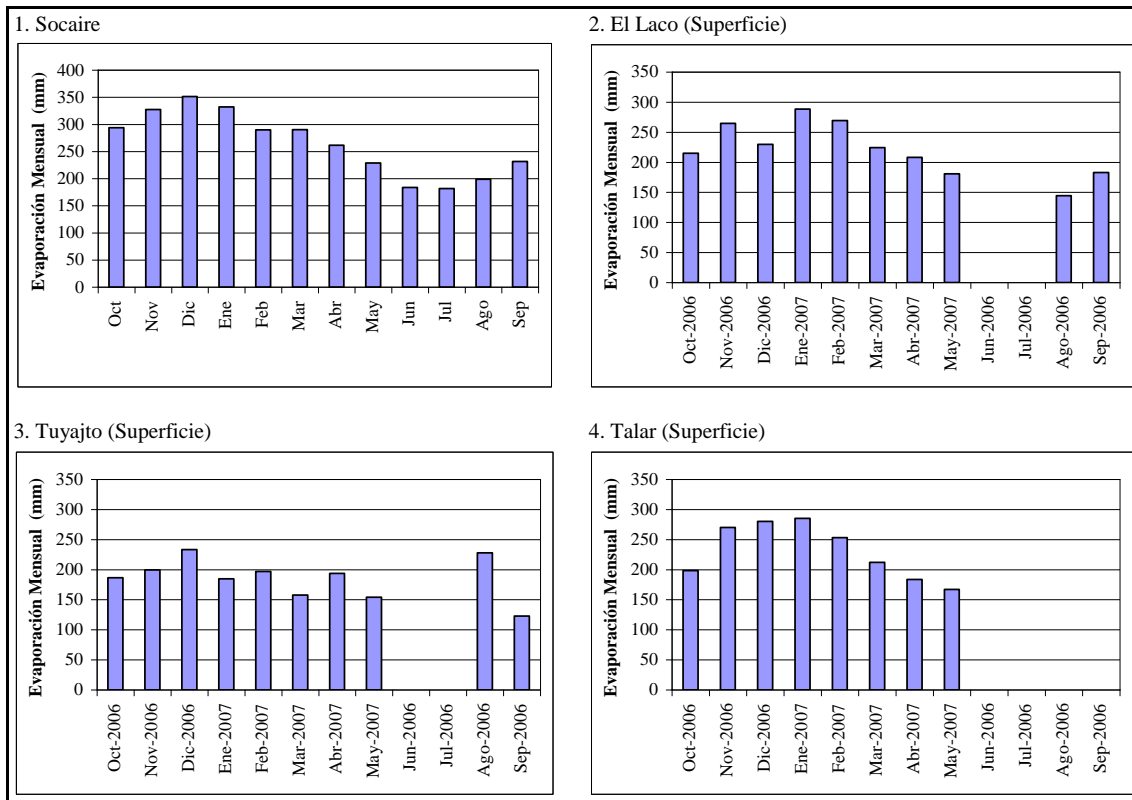


Figura 6.5 Evaporación media mensual en las estaciones seleccionadas del sistema Piloto de la II Región.

7 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

7.1 GENERALIDADES

Las unidades hidrogeológicas se definen en base al potencial de la roca y de los depósitos para almacenar y transmitir agua. Estas se definen tomando como base a las unidades geológicas de sub-superficie, e integrando además los antecedentes obtenidos a partir de las prospecciones geofísicas realizadas, y los antecedentes hidrológicos. En estudios anteriores es común que se describa el acuífero principal de la zona de estudio como: una única y potente unidad hidrogeológica compuesta por depósitos volcánicos neógenos, que transmiten agua por porosidad secundaria (fracturamiento) y que preferentemente almacena agua en horizontes erosionados (EIA Pampa Colorada, 2007; EMSA, 2007). Sin embargo, para el caso de las unidades ignimbríticas reconocidas en la sub-superficie del sector de las cuencas piloto, una misma unidad puede presentar distintos grados de soldamiento, porosidad y fracturamiento, razón por la cual no se encuentra una relación directa entre permeabilidad y litología.

Las unidades hidrogeológicas se definen al integrar toda la información disponible incluyendo los antecedentes litológicos, piezométricos, geofísicos, e hidrológicos recopilados y analizados. Se puede estimar la permeabilidad de cada unidad geológica y definir entonces las permeabilidades de las unidades hidrogeológicas definidas. Se sugiere que la saturación, la porosidad y la salinidad de los fluidos son los factores predominantes en las respuestas geoeléctricas, y es probable que las zonas más favorables para la extracción de agua sean aquellas que muestran resistividades intermedias, lo que estaría indicando una alta saturación, una salinidad relativamente baja y un bajo contenido de arcilla, por ende, una mejor permeabilidad. Sin embargo, es importante tener en cuenta que las zonas de resistividad intermedia también podrían corresponder a formaciones con bajo rendimiento de agua y alta salinidad, lo que tendría que corroborarse posteriormente con los análisis geoquímicos. La permeabilidad y el almacenamiento en esta zona están controlados por la porosidad primaria, porosidad secundaria y por el desarrollo de horizontes meteorizados/erosionados en los contactos entre las diferentes unidades volcánicas.

El análisis realizado en el presente estudio ha permitido definir 4 unidades hidrogeológicas en base a las permeabilidades asociadas a cada unidad geológica reconocida en el sistema de cuencas piloto. Cada unidad tiene

asignada una permeabilidad cualitativa: baja, media-baja, media-alta, alta. A continuación se describen las unidades acuíferas definidas y las unidades geológicas que las componen.

7.2 DEFINICIÓN DE UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

La permeabilidad de las rocas no fracturadas es en general, muy baja y, por tanto, es de esperar que su capacidad para drenar el agua sea muy baja. Sin embargo, si la roca es discontinua como resultado de la existencia de diversos tipos de familias de juntas, su permeabilidad puede ser considerablemente mayor dado que actuarán como canales preferentes de flujo. Se han asignado rangos aproximados para los valores de permeabilidad de las diferentes unidades hidrogeológicas definidas, en base a las estimaciones que han realizado Morris y Johnson (1967) y Domenico y Schwartz (1998) para las conductividades hidráulicas (K) que los autores han estimado para las diferentes litologías que componen a las diferentes unidades acuíferas.

Permeabilidad Baja (K = 10^{-9} – 10^{-5} m/d)

Se asocia a esta permeabilidad a las lavas y pórfidos ubicados en los márgenes de las cuencas, los que permiten cierto grado de infiltración de la recarga en zonas topográficamente altas, pero que a la vez restringen parcialmente el flujo de agua subterránea entre las cuencas hidrográficas. También se otorga este rango a las lavas que intercalan en profundidad a los depósitos ignimbríticos.

Permeabilidad Media – Baja (K = 10^{-4} – 10^{-3} m/d)

Esta permeabilidad caracteriza a las ignimbritas más superficiales, y poco fracturadas, del Plioceno superior y Cuaternario, y se correlacionan con las ignimbritas Tuyajto y Patao. También incorpora a las secciones de las ignimbritas más antiguas que reportan valores altos de resistividad. Se incorpora a esta unidad a las unidades de brechas y tobas identificadas en profundidad.

Permeabilidad Media – Alta (K = 10^{-2} – 10^{-1} m/d)

Esta unidad hidrogeológica describe a la unidad acuífera principal, compuesta por las ignimbritas que presentan algún grado de fracturamiento. Se correlaciona las ignimbritas Atana y riodacítica en el norte, y con todas las ignimbritas identificadas al sur, a excepción de la ignimbrita Patao.

Permeabilidad Alta ($K = 10^{-1} - 10$ m/d)

Se correlaciona con los depósitos sedimentarios profundos, que están limitados a capas de poco espesor. También se reconocen acuíferos sedimentarios de alta permeabilidad y baja potencia, en las áreas cercanas a los salares y lagunas salinas.

Las perforaciones y las prospecciones geofísicas, arrojan como resultado, un acuífero principal de permeabilidad media - alta, compuesto por rocas volcánicas, principalmente tobas. Su permeabilidad es casi netamente secundaria, asociada a un fuerte control estructural por parte de las rocas volcánicas que lo componen.

Dado que el basamento hidrogeológico no fue identificado por las perforaciones, así como tampoco por la exploración geofísica, se asume que los acuíferos locales tienen al menos 400 m de espesor en el sector norte, basado en la perforación del pozo PNDC-1 de 500 m de profundidad, y de al menos 300 m de espesor en el sector sur, basado en la perforación del pozo PADC-5 de 380 m de espesor.

Un acuífero de alta permeabilidad, aunque de menor importancia que el anterior en términos de potencia, se correlaciona con los depósitos sedimentarios profundos, que están limitados a capas de poco espesor entre algunos estratos volcánicos depositados durante periodos erosivos de baja actividad magmática en superficie. Se infiere un almacenamiento preferencial del agua debido al carácter sedimentario del acuífero.

También se identifican acuíferos sedimentarios de alta permeabilidad y baja potencia, en las áreas cercanas a los salares y lagunas salinas. Los depósitos aluviales se encuentran saturados únicamente en los márgenes de la Laguna Tuyajto y los salares Aguas Calientes 2 y El Laco, debido a la intersección entre el nivel freático con la superficie del terreno en los sectores de menor cota.

Las rocas volcánicas que componen los altos topográficos, y que actúan de divisoria de aguas de las cuencas endorreicas, se les asocia una permeabilidad baja, como es el caso de las lavas, y media - baja en el caso de las ignimbritas. Esta característica permite cierto grado de infiltración que aporta a la recarga, pero es de menor importancia, así como lo son los flujos entre cuencas por estas zonas, debido a las altas tasas de evaporación reportadas para la Puna de Atacama.

Para reconocer la distribución espacial y la geometría de las diferentes unidades hidrogeológicas definidas, se presentan perfiles hidrogeológicos que agrupan y grafican las diferentes unidades de roca reconocidas en las cuencas piloto, según el grado de permeabilidad que se les ha asociado (Figura 7.1 y Figura 7.2). Los perfiles muestran además las cotas de la napa y la salinidad del acuífero, destacando la presencia de salmueras y aguas muy salinas en profundidad.

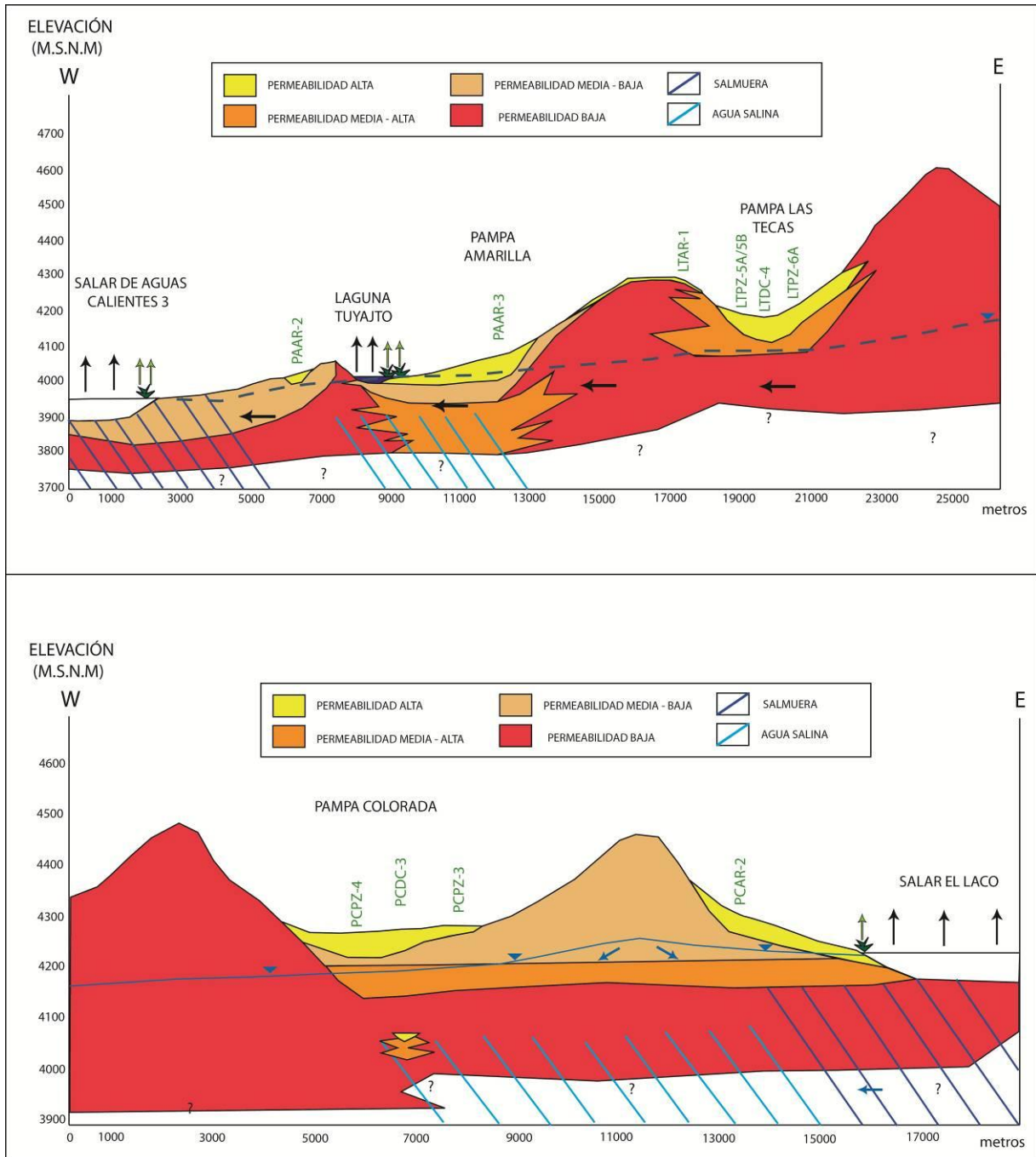


Figura 7.1 Perfil hidrogeológico del sector sur del sistema de cuencas piloto.

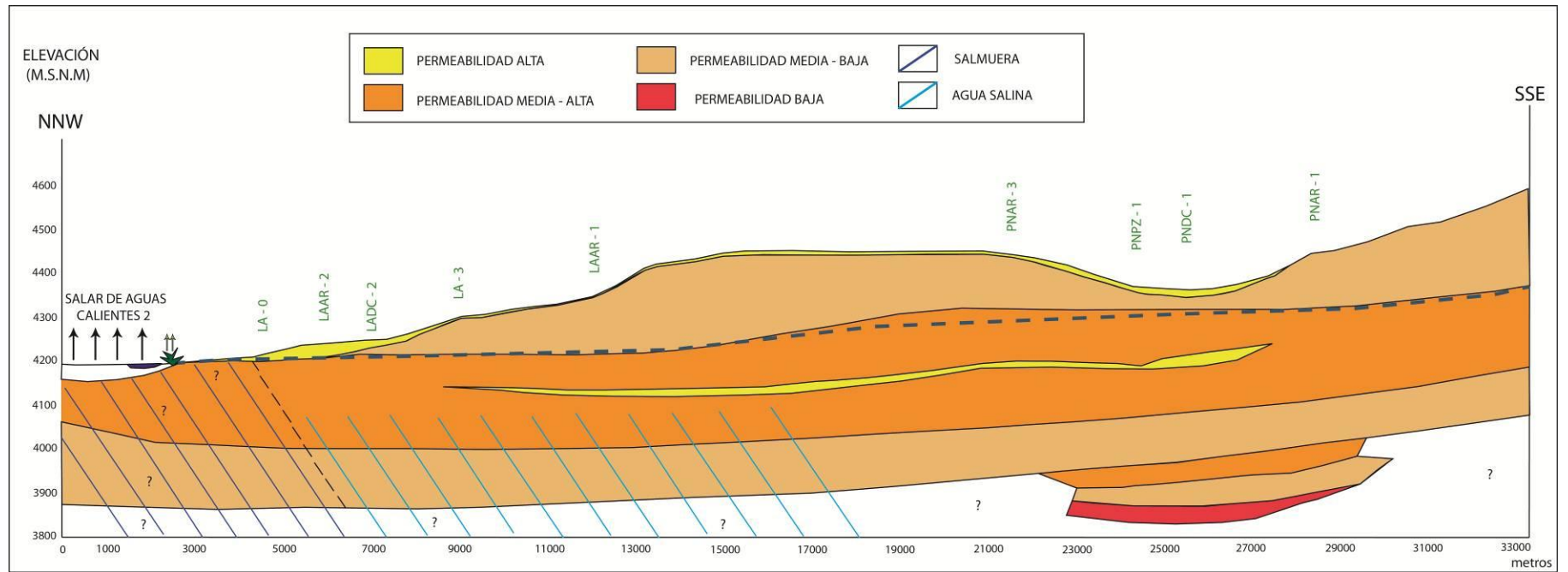


Figura 7.2 Perfil hidrogeológico del sector norte del sistema de cuencas piloto.

8 MARCO HIDROQUÍMICO

8.1 GENERALIDADES

La composición química del agua viene dada por el contenido relativo de sus especies disueltas. Esta composición consiste en el quimismo inicial de la gota de agua que precipita, en conjunto con el enriquecimiento en sales y minerales que se incorporan a través de procesos naturales de interacción agua-roca, tales como disolución o reacciones meteóricas, mezcla de aguas, y todo lo que pueda ocurrir durante el recorrido que va entre el punto de caída y el punto de extracción de la muestra de agua. Se debe tener en cuenta además la modificación por acción de contaminantes, tanto atmosféricos como terrestres, antropológicos y biológicos. Los sistemas acuíferos se encuentran condicionados por la constante interacción entre una fase sólida formada por rocas y minerales, una fase gaseosa, y una líquida. Producto de esta relación, las aguas subterráneas 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 determinar la posible conexión subterránea entre cuencas independientes, entre otros.

Las rocas ígneas se forman en el interior de la Tierra bajo condiciones de alta presión y alta temperatura. Estas pueden quedar expuestas en superficie, sometidas a condiciones atmosféricas de mucha menor presión y temperatura, es decir, en desequilibrio termodinámico. La meteorización es consecuencia de la acción conjunta del agua con los gases disueltos, en especial el CO₂, que producen reacciones químicas que las alteran. Se forman nuevos minerales termodinámicamente estables. En la descomposición de una roca ígnea, pueden formarse tres tipos de materiales: sales solubles que se transportan en el agua como solutos; minerales hidratados como arcillas; y residuos resistentes, como cuarzo y clastos de roca.

Más del 99% de las sustancias disueltas en un agua corresponden a las indicadas en la Tabla 8.1 y se encuentran en concentraciones mayores a 1 mg/L. No se toma en cuenta el NO₃⁻ ya que generalmente se debe a contaminación orgánica. Los iones disueltos que constituyen casi la totalidad de los disueltos en el agua se denominan elementos mayoritarios.

Solo un 1% de las iones disueltos, y que se encuentran en concentraciones entre 0.1 – 1 mg/L, corresponde a los elementos minoritarios. Los más frecuentes de encontrar en aguas subterráneas son bromuro, yoduro, sílice, litio, estroncio, fosfato, nitrito, hierro, manganeso, aluminio, amonio, sulfuro, fluoruro.

Tabla 8.1 Elementos mayoritarios

Aniones	Cationes	No iones
Cl ⁻ - cloruro	Na ⁺ (K ⁺) - sodio/potasio	SiO ₂ - sílice
SO ₄ ⁼ - sulfato	Mg ⁺⁺ - magnesio	CO ₂ - dióxido de carbono
HCO ₃ ⁻ - bicarbonato	Ca ⁺⁺ - calcio	O ₂ - oxígeno

Los elementos traza son los que se encuentran en cantidades muy inferiores, menores a 0.1 mg/L, y que requieren de técnicas muy resolutivas para su determinación. Estos son los metales pesados, entre otros.

La composición química del agua no es equivalente a la concentración química. La composición de un agua viene dada por el contenido relativo de sus especies disueltas, mientras que la concentración nos indica la cantidad que tenemos de cada una de ellas.

Las aguas de circulación regional tienden a ir aumentando su mineralización hasta irse saturando en los diferentes iones. De este modo, la composición de un agua puede llegar a ser muy distinta a la de la roca por la cual circula dados los índices de saturación de cada especie disuelta. Por ejemplo, el ión cloruro no llega a saturar normalmente, por lo que en rocas con contenidos bajos de ese elemento, y ricas en otras sales solubles, pueden dar origen a aguas predominantemente cloruradas si ha transcurrido tiempo suficiente, mientras los otros aniones permanecen constantes por estar saturados.

El aumento de la salinidad y los cambios de composición del agua puede deberse a los siguientes factores: mayor tiempo de residencia en el medio; evaporación de las aguas; cambios en la piezometría o cursos de agua superficial, o eventos de precipitación que producen redisolución; contaminación antrópica; en el altiplano chileno, es común la contaminación natural debido a salmueras residuales.

El análisis isotópico se presenta como una alternativa que permite determinar el origen de las aguas, así como también las conexiones hidráulicas entre acuíferos y su vulnerabilidad ambiental. Para el análisis isotópico, se analiza la relación entre las concentraciones de los isótopos de ^2H y ^{18}O , que son los isótopos que más abundan en la naturaleza.

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

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

El objetivo del presente capítulo es caracterizar geoquímicamente las aguas de las cuencas piloto para establecer un contexto hidrológico del comportamiento de las aguas superficiales y subterráneas, determinando así las muestras más afectadas por los procesos de evaporación, los flujos existentes entre las cuencas y los flujos más superficiales. Esto debe ser concordante con el modelo definido a partir de los antecedentes geológicos, geofísicos, e hidrogeológicos.

Se presenta un marco hidroquímico e isotópico actualizado. Se recopilaron, filtraron y analizaron los datos hidroquímicos e isotópicos disponibles en estudios anteriores. Se realizó una caracterización físico-química de las aguas superficiales y subterráneas de las cuencas piloto, además de una caracterización isotópica de las aguas, basada en las concentraciones de ^2H y ^{18}O . El análisis químico e isotópico realizado a las muestras de agua superficial y subterránea, ha contribuido a mejorar del modelo hidrogeoquímico que describe al sistema de cuencas piloto.

8.2 METODOLOGIA

Se realizó una exhaustiva revisión de antecedentes y se recopilaron datos para un total de 251 muestras. Los datos recopilados se obtienen a partir de publicaciones de instituciones tales como la Dirección General de Aguas (DGA), Institut de Recherche pour le Developpement (IRD), Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), revistas científicas (Risacher et al, 1999, 2003), mineras (EIA Proyecto Pampa Colorada, 2007; EMSA, 2007).

Se construyó una base de datos que contiene antecedentes de parámetros físico-químicos, tales como conductividad, temperatura y pH; antecedentes hidroquímicos de elementos mayoritarios y minoritarios; antecedentes para los isotopos ^2H y ^{18}O . Los parámetros físico-químicos pueden haber sido medidos en terreno o posteriormente en el laboratorio.

Los datos hidroquímicos obtenidos a partir de la revisión de antecedentes fueron filtrados de manera de trabajar únicamente con los que presentan un registro completo para los elementos mayoritarios. Los datos se vuelven a filtrar mediante el método del balance iónico, el cual consiste básicamente en seleccionar datos que dentro de un margen de error aceptable, mantengan siempre un equilibrio entre las cargas eléctricas de sus especies disueltas.

Se realizó una campaña de terreno para recolectar 23 muestras de agua superficial y subterránea, las que posteriormente fueron enviadas al laboratorio para ser analizadas. De esta manera se pudo obtener nuevos datos hidroquímicos e isotópicos, los que fueron incorporados de manera de ampliar la base datos existentes.

Con el objetivo de uniformar la información recopilada, se le asignó un código correlativo a cada muestra recopilada.

El análisis a los antecedentes hidroquímicos e isotópicos se realizó mediante el uso del programa EasyKing que distribuye gratuitamente la Universidad Politécnica de Cataluña, y que procesa los datos ingresados de manera que estos sean representados gráficamente. Los datos que han sido previamente organizados en tablas compuestas por filas y columnas deben ser presentados de manera atractiva, para proporcionar al lector una mayor rapidez en la comprensión. Además, los gráficos deben tener la capacidad de actuar como una herramienta de análisis, que permita integrar la

información, revelar modelos, y mostrar las posibles interrelaciones e interdependencias entre las variables, a través del uso de una variedad de simbologías, formas, colores, números, textos, y superposición de capas de información. Se puede incorporar además sistemas de referencia, de manera de mostrar datos y análisis de datos georeferenciados, que permitan conocer su ubicación.

Se utilizaron gráficos cartesianos, diagramas de bloque, diagramas de Piper, diagramas de Stiff, y mapas de puntos escalados para representar el análisis de los datos. A continuación se describen los diagramas de Piper y de Stiff que son ampliamente utilizados para el análisis de elementos mayoritarios, y que permiten una representación gráfica que permite interpretar de manera directa aspectos relacionados a la composición y concentración química del agua.

8.2.1 Diagramas de Piper

Los diagramas de Piper proporcionan una visión de la composición de las aguas, sin tener en cuenta su grado de salinización o concentración, y permiten realizar una caracterización global de los distintos tipos de aguas existentes en un área. Gráficamente, este tipo de diagramas permite la presentación de muchos parámetros en una combinación de dos diagramas triangulares (para aniones y cationes por separados) y un diagrama en forma de rombo que muestra la relación entre los dos grupos de elementos anteriores. Cada muestra está proyectada con un punto en cada uno de los diagramas (Figura 8.1).

8.2.2 Diagramas de Stiff

Los diagramas de Stiff, además de indicar las composiciones de las aguas, permiten visualizar además la concentración de las muestras de agua. Son muy útiles para su representación espacial en un mapa y para entender las variaciones composicionales y los aumentos de concentraciones a lo largo de los sentidos de flujo, o atravesando sistemas hídricos particulares (salares, campos geotermales, formaciones geológicas particulares, etc).

Estos diagramas son polígonos que sirven para identificar fácilmente el tipo de agua que se tiene en un aprovechamiento dado. Estos diagramas se encuentran divididos mediante una línea vertical, quedando los aniones

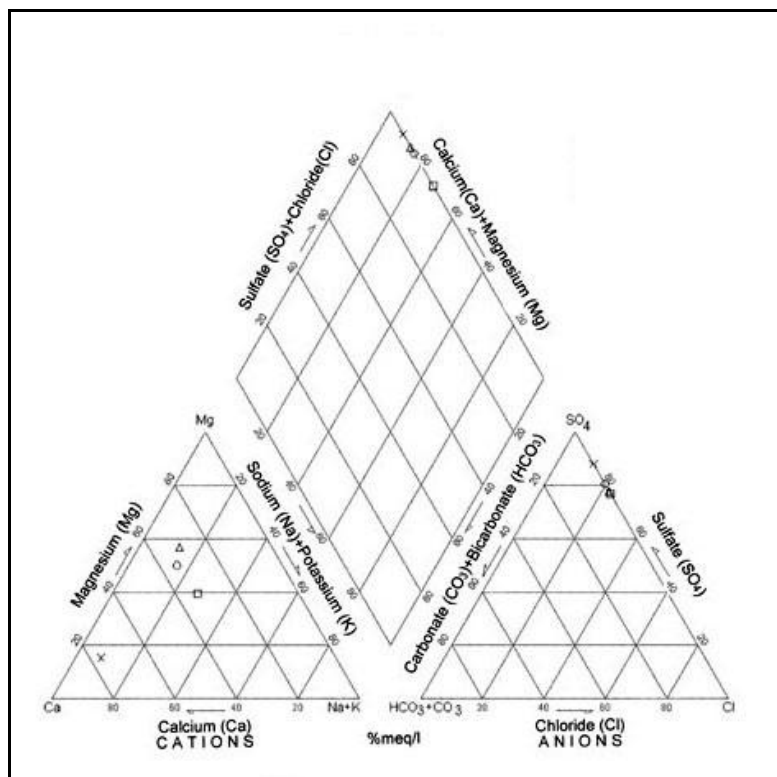


Figura 8.1 Ejemplo de diagrama de Piper.

(iones con cargas negativas) del lado izquierdo y los cationes (iones positivos) del lado derecho (Figura 8.2). Todas las concentraciones de los iones se encuentran expresadas en miliequivalentes por litro (meq/l) y la escala gráfica corresponde al ancho de las líneas horizontales, es decir, cuanto más ancho es un diagrama, mayor es la concentración.

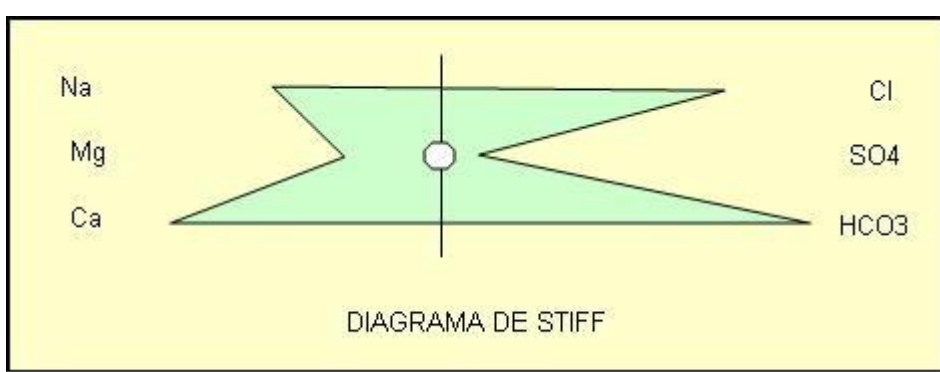


Figura 8.2 Diagrama de Stiff, a la izquierda el polígono grafica a los aniones, y a la derecha, los cationes.

Para simplificar y mejorar la representación gráfica de los diagramas de Stiff, se han escogido las muestras representativas de cada cuenca. Para los grupos de muestras que presentaron composición, concentración y posición similar, se ha escogido una sola muestra representativa para ser graficada, de manera de no saturar el mapa con diagramas.

Cada diagrama de Stiff se colorea según la composición química del agua que se está muestreando. Dado que las concentraciones de las muestras de agua pueden variar exponencialmente dependiendo del tipo de muestra o el lugar de la cuenca que se está analizando, se han utilizado diferentes escalas gráficas para los diagramas, para permitir una mejor representación en el mapa. La reducción (o amplificación) de las escalas gráficas de los diagramas de Stiff se realiza de manera de mantener una relación directa entre el tamaño de los diagramas y sus concentraciones. Debido a que existen diferencias exponenciales en los valores de las concentraciones, se debe en algunas ocasiones, amplificar o reducir los valores de concentración, de manera de lograr una única representación gráfica para todos los diagramas en un mismo mapa.

También existe una relación entre la intensidad del color utilizado para colorear cada diagrama de Stiff y la concentración. Una mayor intensidad del color indica que la concentración de sólidos en la muestra es mayor, y viceversa.

Los diagramas de Stiff de las muestras escogidas se dibujan sobre mapas geológicos para facilitar la interpretación. Los elementos mayoritarios en las aguas proceden principalmente de procesos de alteración de las rocas del medio y de la redisolución de sales. Estos procesos, sumados a la evaporación, llevan a un enriquecimiento de los elementos en las aguas, de modo que el agua se satura de algunos de éstos favoreciendo la precipitación de minerales. Los parámetros que miden la concentración de sales disueltas, son indicadores de si la muestra ha sido tomada cerca de la zona de recarga, o si lleva un buen tramo recorrido. En general, los diagramas de Stiff permiten visualizar la dirección de flujo del agua, a medida que la proporción de los elementos aumenta o disminuye.

8.3 DATOS DISPONIBLES Y TRATAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Se realizó una recopilación de antecedentes y se recopilaron datos para un total de 251 muestras, de las cuales 127 corresponden a fuentes

superficiales (vertientes, afloramientos, escurrimientos, vegas, lagunas), 120 a fuentes subterráneas (a partir de diferentes profundidades), 3 son muestras de nieve y 1 de lluvia.

Aunque usualmente vertiente y afloramiento se usan como sinónimos, aquí se ha hecho una distinción, considerando las muestras de tipo vertiente como aquellas que se han tomado desde afloramientos puntuales, donde el agua aflora directamente desde la roca, y no ha sufrido mezcla con otras aguas ni exposición a condiciones ambientales superficiales. Las muestras de afloramiento corresponden a las que se han retirado desde afloramientos difusos, donde no es posible reconocer el punto inicial del afloramiento, y que posiblemente han sufrido mezcla y exposición por un tiempo no determinado a las condiciones ambientales locales. Las muestras tipo vega corresponden a muestras de agua que se han retirado a partir de sectores donde abunda la vegetación hidrófila característica del Altiplano (vega o bofedal). Las muestras tipo escurrimiento corresponden a cualquier muestra tomada de cursos superficiales que transportan agua hacia los salares y/o lagunas. Finalmente, las muestras tipo laguna son aquellas extraídas de las zonas terminales, correspondiendo generalmente a muestras de lagunas en los salares.

Para garantizar trabajar con datos hidroquímicos de elementos mayoritarios confiables y de buena calidad, se aplicó un filtro que disminuyó considerablemente la cantidad de datos que calificaron para el análisis hidrogeoquímico posterior.

El primer filtro consistió en seleccionar las muestras que presentaban datos para cada uno de los siguientes parámetros: Cl⁻, SO₄⁻², HCO₃⁻, NO₃⁻, Na⁻, K, Mg⁻², Ca⁻² y NO₃⁻.

El segundo filtro consistió aplicar el método de balance iónico, el cual requiere que la suma de miliequivalentes de aniones debe ser igual a la suma de miliequivalentes 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:

$$error(\%) = 200 \times \frac{\sum cationes - \sum aniones}{\sum cationes + \sum aniones}$$

De esta forma, y aceptando un margen de error del 10% en valor absoluto, se eliminaron aquellos análisis que no cumplían con el criterio. Aplicados los filtros, la base de datos se reduce a 99 datos, de los cuales 46 corresponden a muestras superficiales y 53 a muestras subterráneas.

La cantidad de muestras utilizadas para cada cuenca se detalla en la Tabla 8.2 Esta tabla indica una distribución heterogénea de las muestras que califican para ser analizadas, siendo la cuenca Laguna Tuyajto la que concentra a la mayor cantidad de datos, y la cuenca Salar El Laco la que concentra menos.

Tabla 8.2 Tipo de muestras para las cuencas piloto

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

La Figura 8.3 da cuenta de la importancia de aplicar siempre un filtrado de muestras basado en el balance iónico. Se muestra que los datos que escapan de la nube que representa la tendencia química de las todas las aguas (izquierda), son en general los que presentan un error de balance mayor al 10% (derecha).

Del total de las 251 muestras que componen la base de datos hidroquímica para las cuencas piloto de la Puna de Atacama, 239 muestras, equivalentes al 95% del total de muestras, cuentan con al menos un dato de análisis químico de elemento minoritario.

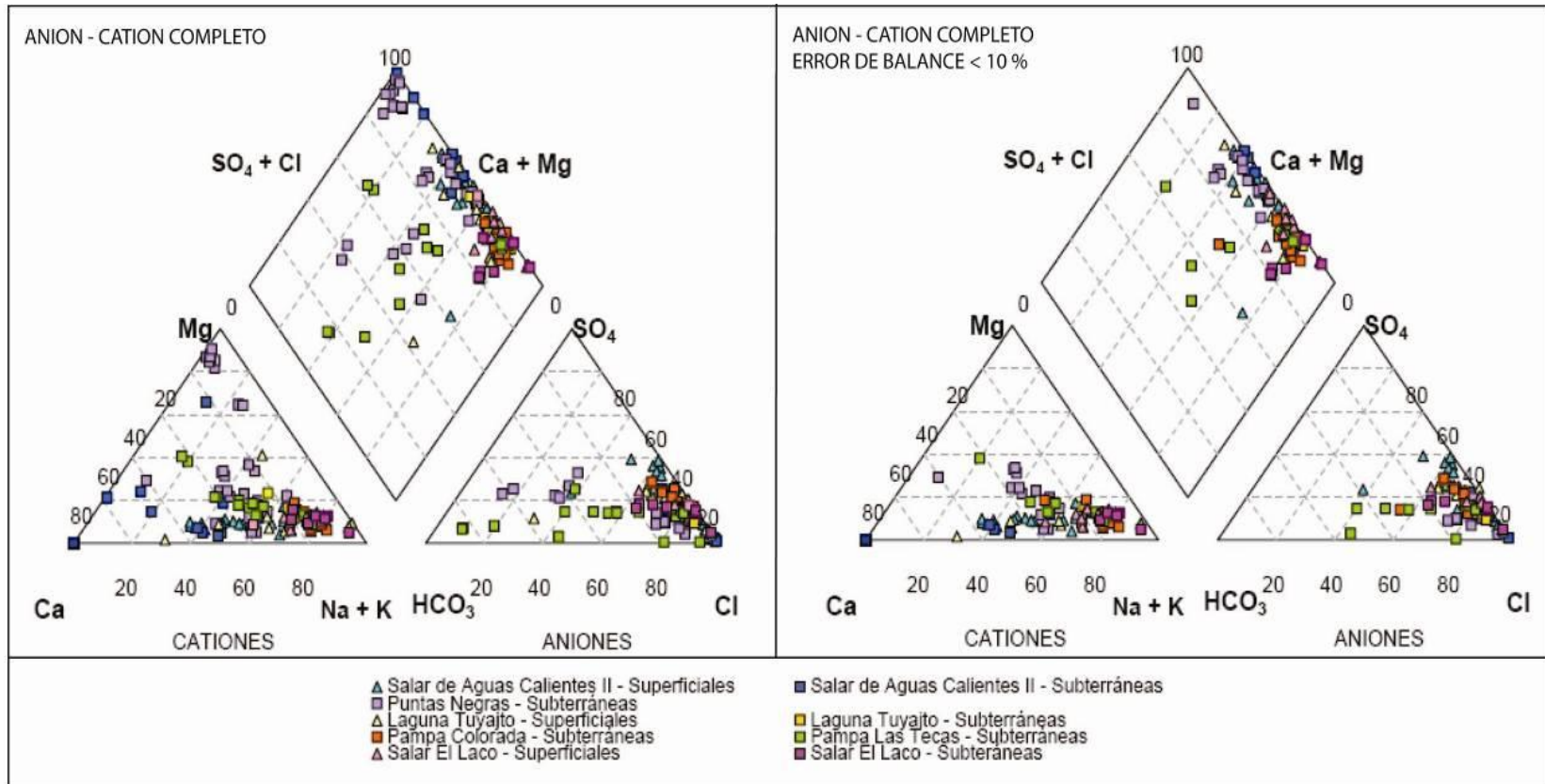


Figura 8.3 Diagramas de Piper que comparan muestras con registro anión/catión completo (a la izq.) versus registro anión/catión completo más error de balance.

La información isotópica recopilada corresponde al análisis de los isótopos estables ^2H y ^{18}O , normalmente los más utilizados para estudios de hidrogeoquímica. Del total de 251 muestras, 110 contienen análisis de ^2H y el ^{18}O .

8.4 CAMPAÑA DE RECOLECCIÓN DE MUESTRAS DE AGUA

8.4.1 Generalidades

Se realizó una campaña de terreno con el objetivo de retirar muestras de agua superficial y subterránea, de manera de aportar con nuevos datos hidroquímicos e isotópicos, y ampliar la base de datos existente para las cuencas de la Puna de Atacama en la II Región de Chile. La campaña de terreno tuvo una duración de 7 días y se realizó, entre el 25 y el 31 de octubre del año 2008. El campamento base se estableció en el control fronterizo Avanzada El Laco, al interior de las dependencias del Servicio Agrícola y Ganadero (SAG).

Se muestrearon 23 puntos de agua, distribuidos en las cuencas: Laguna Lejía, Salar de Aguas Calientes 2, Puntas Negras, Salar de El Laco, Pampa Colorada, Laguna Tuyajto y Salar de Aguas Calientes 3. Las muestras de agua superficial se obtienen a partir de afloramientos de agua tales como lagunas, ojos de salar, esteros, manantiales y vertientes. Las muestras de agua subterránea se obtienen a partir de pozos existentes, y abarcan un rango de profundidad comprendido entre los 55 m b.n.s. y los 140 m b.n.s. La Tabla 8.3 indica el tipo de punto muestreado para cada cuenca.

Tabla 8.3 Cantidad de muestras recolectadas por cuenca

Cuenca	Muestras Superficiales	Muestras Subterráneas
Salar de Aguas Calientes 2	5	2
Puntas Negras	-	3
Salar de El Laco	2	-
Pampa Colorada	-	2
Pampa las Tecas	-	-
Laguna Tuyajto	3	-
Salar de Aguas Calientes 3	4	1
Laguna Lejía	1	-

8.4.2 Metodología de muestreo

Para garantizar la calidad de los resultados del análisis a las muestras retiradas en terreno, se elaboró una metodología de muestreo basado en protocolos y estándares internacionales (ANEXO B y C).

Las muestras de agua subterránea extraídas desde los pozos existentes, fueron recolectadas mediante la utilización de un bailer modelo Solinst 425. Sus principales características y el instructivo de funcionamiento se presentan en el ANEXO D.

En forma adicional a los análisis efectuados en laboratorio, se realizaron mediciones de parámetros físicos y químicos del agua "in situ". En particular se determinó la temperatura, pH y conductividad de las muestras recolectadas. Los valores de estos parámetros fueron registrados durante el procedimiento de toma de muestras. Para las mediciones de parámetros, se utilizó una sonda multi-parámetrica TPS modelo WP-81 que permite cuantificar pH, temperatura y conductividad. Se utilizó además un conductivímetro HACH modelo Sension 5, capaz de monitorear conductividad y temperatura en forma simultánea.

Para el caso de las 6 muestras de agua subterránea extraídas a partir de pozos, hubo que medir el nivel estático de manera de conocer la cota a la cual se encuentra el acuífero y a la cual se extrae la muestra. La medición de niveles estáticos en los pozos se realizó utilizando un pozómetro marca Solinst de 150 metros de longitud.

Durante la campaña de muestreo, hubo que determinar además la ubicación y cota de todos los puntos muestreados. La información se registró en coordenadas UTM, Datum Provisional Sudamericano 56 (PSAD56), Huso 19 S. La ubicación de los puntos de muestreo se realiza utilizando un GPS marca Garmin.

8.4.3 Análisis hidroquímico

El Laboratorio de Análisis de Aguas y Riles de DICTUC S.A. efectuó el análisis químico de elementos a las muestras colectadas en las cuencas piloto de la II Región de Chile (ANEXO E). De éstas, 14 corresponden a afloramientos de

agua superficial (vertientes, ríos y lagunas), mientras que los 9 restantes son de agua subterránea obtenida a través de pozos existentes. Los parámetros definidos para ser analizados se especifican en la Tabla 8.4.

Tabla 8.4 Parámetros analizados por Laboratorio de Análisis de Aguas y Riles de DICTUC S.A

pH	Nitratos disueltos	Carbonatos disueltos	Potasio disuelto	Aluminio total	Litio total
Conductividad específica	Sulfatos disueltos	Sodio disuelto	Magnesio disuelto	Hierro total	Zinc total
Cloruros disueltos	Bicarbonatos disueltos	Calcio disuelto	Sílice total	Boro total	Manganeso total

8.4.4 Análisis isotópico

Se realizaron análisis isotópicos a las 23 muestras recolectadas durante la campaña de terreno. El análisis estuvo a cargo del laboratorio de isótopos ambientales de la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN).

La información isotópica requerida fue de Deuterio (^2H) y Oxígeno 18 (^{18}O) (ANEXO F). Durante el proceso de muestreo se adoptaron todas las medidas necesarias para un manejo adecuado de las muestras tanto en terreno, traslado y recepción en laboratorio, ajustándose a los procedimientos establecidos por la CCHEN.

8.4.5 Resultados de Muestreo

Los resultados obtenidos en la II Región comprenden la información de 23 puntos distribuidos en un total de 7 cuencas endorreicas. Los puntos muestreados son representativos de aguas superficiales (lagunas, ríos y vertientes) y subterráneas provenientes de pozos de monitoreo existentes en la zona de estudio.

La Tabla 8.5 presenta la ubicación y altitud de los 23 puntos muestreados en la Puna de Atacama.

Tabla 8.5 Posición geográfica (PSAD 56) y altitud de puntos de muestreo

Nº	ID	Coordenadas UTM		Altitud
		Norte	Este	m s.n.m.
1	TUY.F031	7.351.843	644.733	4.056
2	TUY.F032	7.354.166	645.296	4.052
3	LAC.F010	7.357.745	662.787	4.243
4	AC3.F030	7.354.760	632.049	3.953
5	AC3.F031	7.353.770	636.407	3.958
6	AC3.F032	7.353.677	636.463	3.948
7	AC2.F025	7.397.163	644.699	4.212
8	AC2.F026	7.397.292	644.952	4.208
9	AC2.F027	7.397.164	644.782	4.210
10	AC2.F028	7.398.491	642.914	4.208
11	AC2.F029	7.407.690	641.053	4.317
12	LEJ.F005	7.400.166	633.356	4.343
13	AC2.T007	7.395.562	645.244	4.234
14	AC2.T008	7.395.562	645.244	4.234
15	PTN.T015	7.380.945	658.400	4.383
16	PTN.T016	7.379.366	658.091	4.361
17	PTN.T017	7.379.366	658.091	4.361
18	LAC.F011	7.364.661	661.289	4.252
19	COL.T008	7.358.029	652.249	4.277
20	COL.T009	7.358.029	652.249	4.277
21	TUY.F033	7.350.324	643.814	4.060
22	AC3.T003	7.351.692	641.384	4.038
23	AC3.F033	7.351.406	638.488	3.979

Para facilitar la comprensión, la zona de estudio ha sido dividida en dos sistemas; el primero de ellos ubicado al norte formado por las cuencas de Lejía, A. Calientes 2 y Puntas Negras. El segundo sistema ubicado al sur, abarca las cuencas de El Laco, Pampa Colorada, Puntas Negras, Tuyajto y A. Calientes 3.

En la Figura 8.4 y Figura 8.5 se presenta la ubicación de los puntos de agua muestreados para análisis hidroquímico y la situación general actual de ambos sistemas. De la misma manera, se presentan la ubicación de los puntos de agua muestreados para análisis isotópico en la Figura 8.6 y Figura 8.7. La Figura 8.8 muestra el catastro de pozos y niveles de la napa, medidos durante la campaña de terreno llevada a cabo.

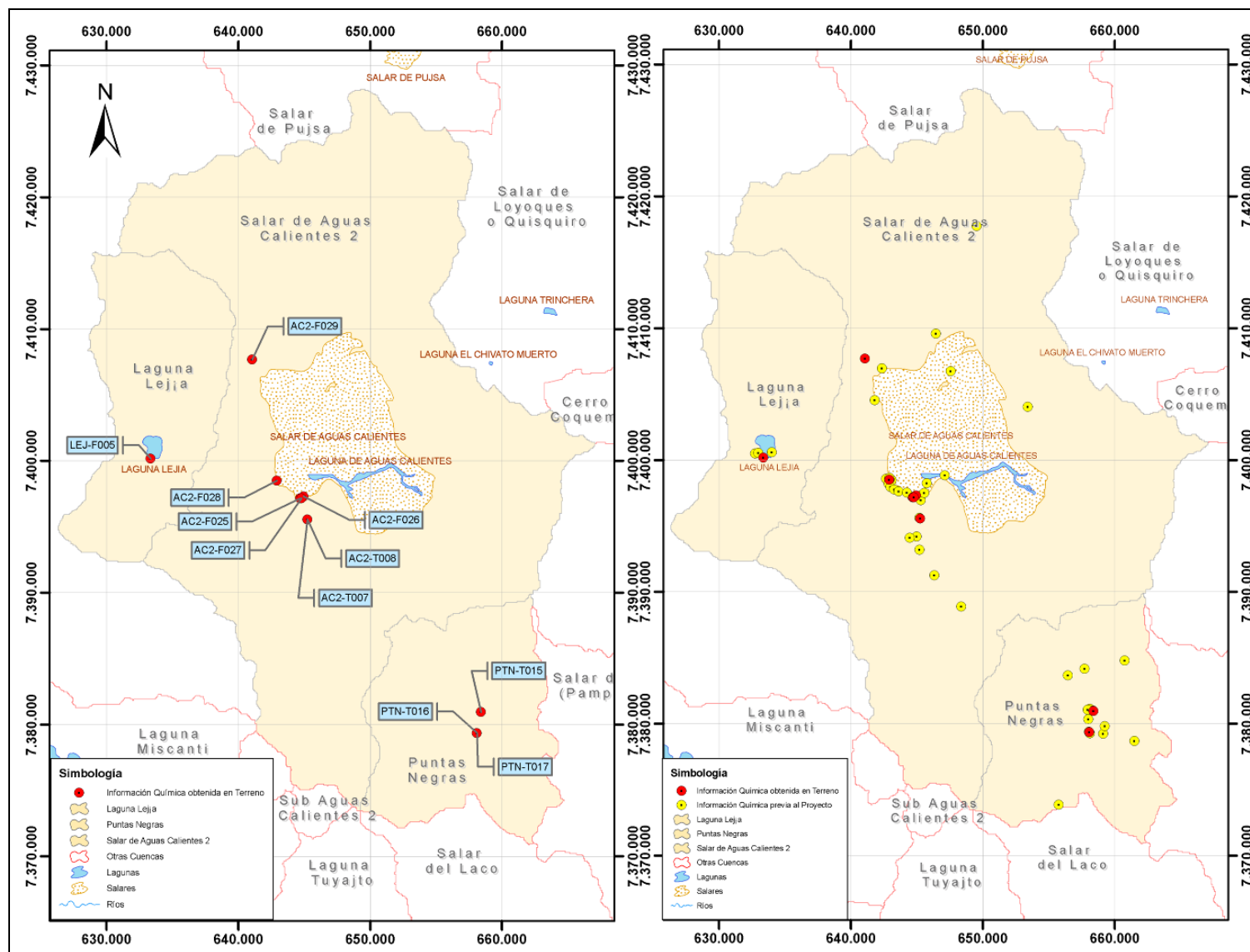


Figura 8.4 Sistema norte: a la izq, puntos de muestreo hidroquímico en sistema norte; a la der, todos los puntos catastrados.

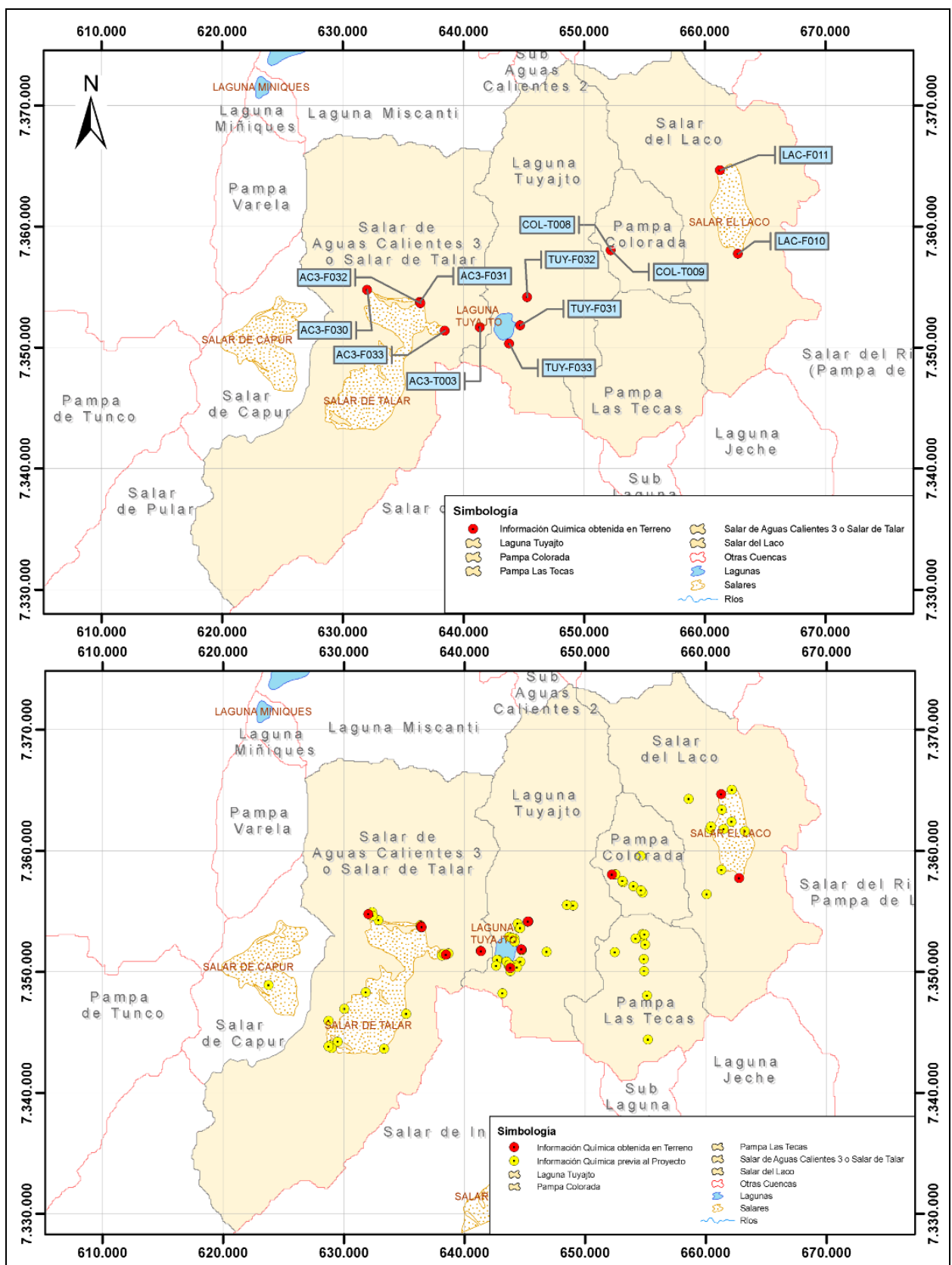


Figura 8.5 Sistema sur: arriba, puntos de muestreo hidroquímico en sistema norte; abajo, todos los puntos catastrados.

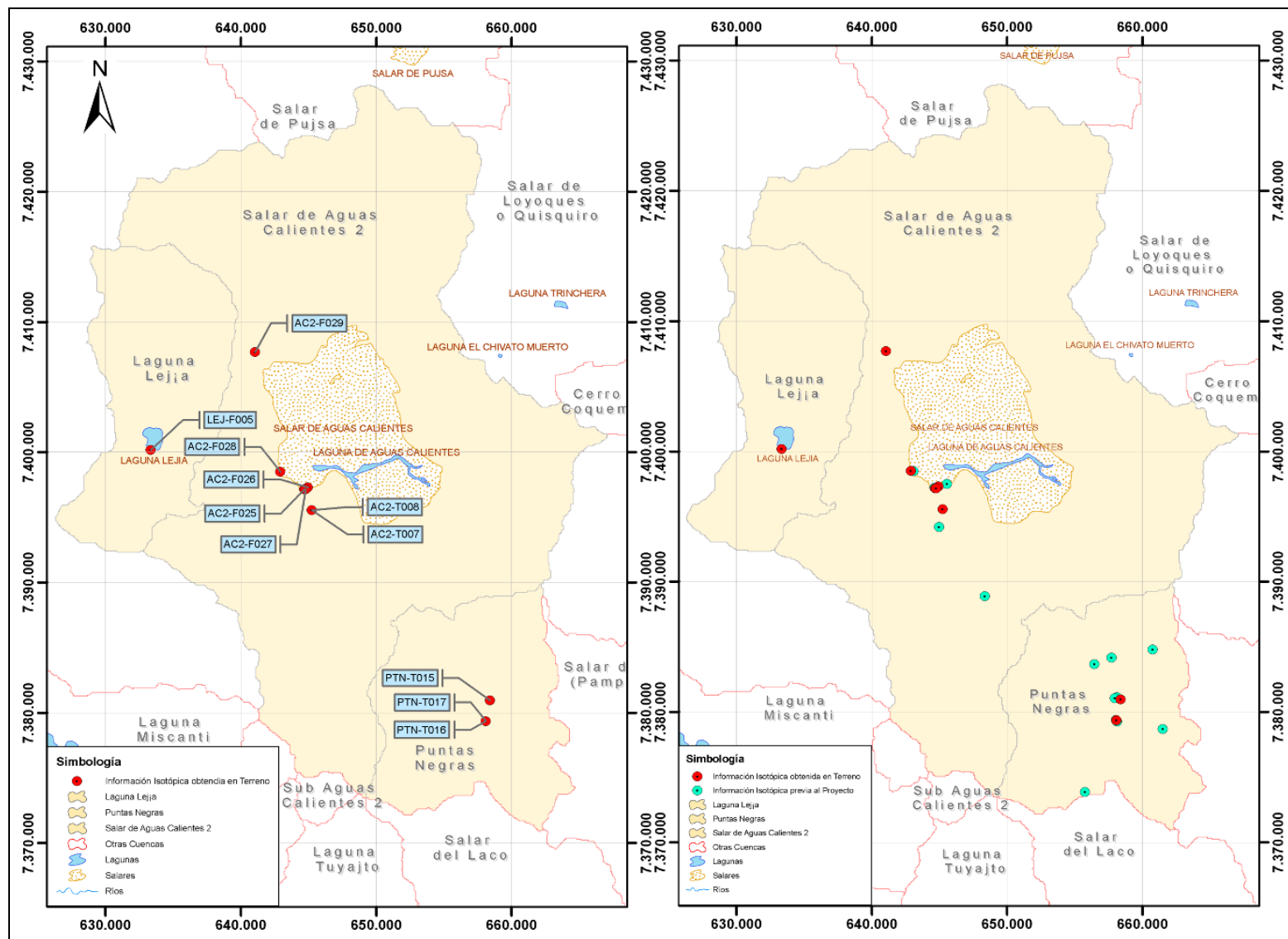


Figura 8.6 Sistema norte: a la izq, puntos de muestreo isotópica en sistema norte; a la der, todos los puntos catastrados.

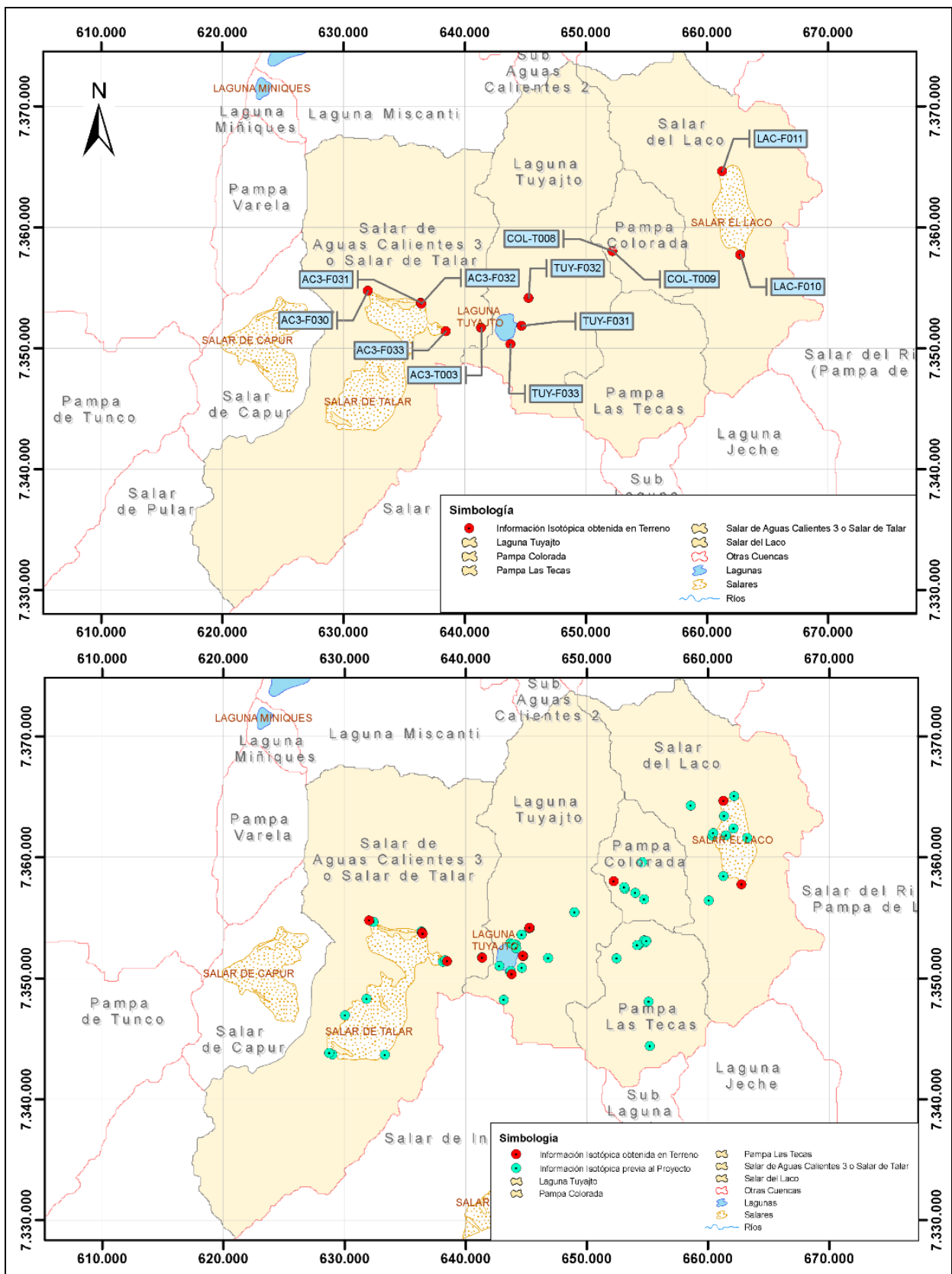


Figura 8.7 Sistema sur: arriba, puntos de muestreo isotópico en sistema norte; abajo, todos los puntos catastrados.

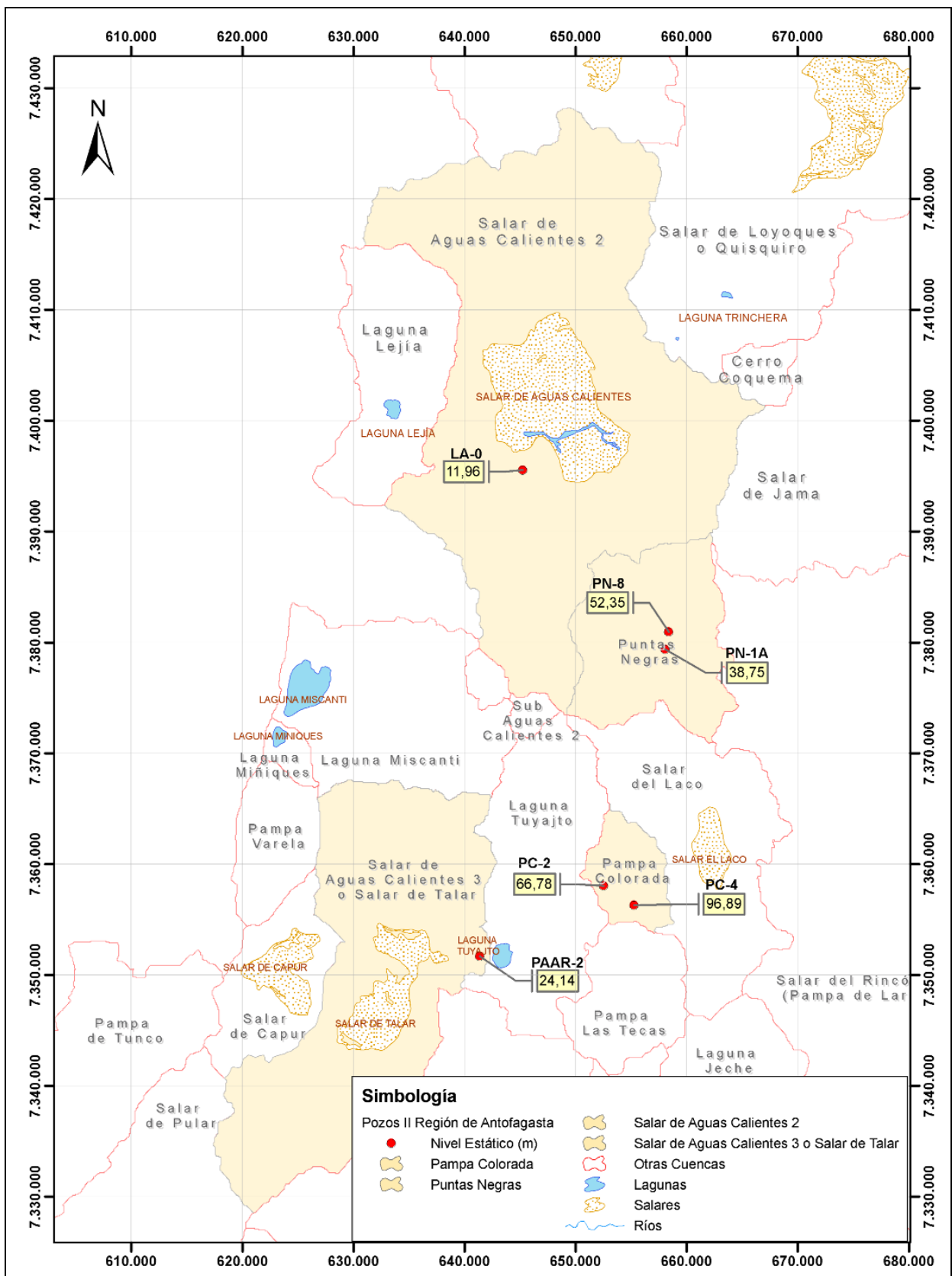


Figura 8.8 Niveles estáticos medidos en pozos de cuencas piloto.

8.5 ANÁLISIS HIDROQUÍMICO

8.5.1 Análisis de Parámetros Físico-Químicos

8.5.1.1 Conductividad

Para el análisis de este parámetro, se han considerado las medidas en laboratorio (ANEXO G). Se debe tener en cuenta el efecto del viento que puede hacer invertir las direcciones de flujo de los canales y escorrentías que inicialmente fluyen en dirección al salar, lo que tiene como efecto una mezcla y consecuente salinización de las aguas proximales a las zonas de vertiente y afloramiento.

La conductividad medida en las muestras de agua superficial de la cuenca Salar de Aguas Calientes 2 varía entre los 3.000 y 25.600 uS/cm, y los valores más altos de conductividad corresponden con las muestras extraídas desde lagunas o afloramientos insertos en el salar. La conductividad medida en las muestras de agua subterránea varía entre 3.300 y 50.200 uS/cm, donde en general las muestras más profundas reportan mayor conductividad.

La conductividad medida en muestras subterráneas de la cuenca Puntas Negras varían en general, dentro del rango de los 1.700 – 12.400 uS/cm. La excepción es para los pozos PNAR-2 y PNAR-4, ubicados al extremo noreste de la cuenca, las que reportan conductividades muy bajas, entre 100 y 600 uS/cm. Esto nos indica que la recarga proviene principalmente desde este sector de la cuenca.

La conductividad medida en las muestras de agua superficial de la cuenca Laguna Tuyajto varía entre los 2.110 y 281.600 uS/cm, siendo los valores menores de muestras de vertientes y vegas, y los mayores de muestras de agua de la laguna. Los valores muy altos de conductividad en comparación con las demás cuencas, se podría deber a la redisolución de depósitos evaporíticos más antiguos. La conductividad medida en las muestras de agua subterránea varía entre los 7.410 y 15.000 uS/cm, y las muestras de mayor profundidad son las que reportan mayor conductividad.

Las muestras de agua subterránea de la cuenca Pampa Colorada varían su conductividad entre los 3.830 y 22.900 uS/cm, notándose valores más bajos de conductividad par las muestras más superficiales.

La conductividad medida en las muestras de agua subterránea de la cuenca Pampa Las Tecas varía entre los 400 y 11.500 uS/cm. Los valores más bajos de conductividad se detectan en los pozos LTAR-2, PT-1 y PT-5, indicando que la recarga se realiza principalmente en el sector noroeste de la cuenca.

La conductividad medida en las muestras de agua superficial de la cuenca Salar El Laco varía entre los 962 y 98.700 uS/cm, y los mayores valores de conductividad corresponden a las muestras extraídas de las partes interiores del salar. Para las muestras subterráneas, los valores de conductividad varían entre los 460 y 183.200 uS/cm.

8.5.1.2 Temperatura

En general, la temperatura del agua subterránea es poco variable. Sin embargo, pequeñas variaciones de temperatura en un acuífero influyen en la solubilidad de las sustancias y su conductividad, por lo que podrían incidir en variaciones composicionales considerables. Pueden generarse anomalías locales producto del ascenso de aguas geotermales por fracturas, las que ascienden a altas velocidades y con poca pérdida de temperatura en la trayectoria.

Se analizaron los valores de temperatura que fueron medidos en terreno (ANEXO G). Se debe considerar que existen factores que pueden generar un error en la medición, como lo son el tiempo de exposición a condiciones atmosféricas, la mezcla de aguas por efecto del viento, la profundidad de extracción de la muestra en el caso de aquellas colectadas en cursos superficiales y lagunas, entre otras. Para el caso de muestras de agua subterráneas, factores como el tiempo que toma retirar la muestra o funcionamiento de la herramienta con que se trabaja, pueden influir en la medida tomada.

Las muestras de agua superficial del Salar de Aguas Calientes 2 varían entre los -1,5 y 25,6 °C, pero en general se mantienen entre los 10 y 25 °C. Se trata en general de aguas bastante cálidas, donde las más frías corresponden a muestras de laguna. Las muestras de agua subterránea correspondientes a la cuenca del Salar de Aguas Calientes 2 varía entre los 12,1 y 21,8 °C, y en general se identifica un aumento de temperatura con el aumento de la profundidad.

Las aguas subterráneas de la cuenca Puntas Negras varían sus temperaturas entre los 12,1 y 36,4 °C, lo que evidencia temperaturas altas para las aguas circundantes, las que fueron identificadas en los pozos PN-1A y PNPZ-2, que se encuentran hacia el sector sur-oeste del campo de pozos. Las altas temperaturas de las aguas profundas de la cuenca se deben a la actividad geotermal asociada al volcanismo cuaternario en el cordón Puntas Negras, que se emplaza hacia el sur-oeste de la cuenca.

Las muestras correspondientes a vertientes, afloramientos y vegas tomadas en la cuenca Laguna Tuyajto, varían su rango de temperatura entre los 15 y 33,2 °C, y las muestras de escorrentía y laguna varían sus temperaturas entre los 1 y 17,5 °C. En comparación con las dos cuencas del sector norte del sistema piloto, las vertientes que alimentan a la laguna Tuyajto presentan temperaturas más altas. El rango de temperaturas para las muestras de agua subterránea correspondientes a la cuenca Laguna Tuyajto varía entre los 15 y 32,3 °C, y se reconoce un aumento de la temperatura proporcional al aumento de la profundidad de extracción de la muestra.

En la cuenca Pampa Colorada, se han extraído muestras de agua subterránea que representan diferentes profundidades del acuífero, donde se identifica una relación directa entre la profundidad y la temperatura. El rango de temperaturas varía entre los 20 y 38,7 °C. Las altas temperaturas de las aguas subterráneas de la cuenca se deben a la actividad geotermal asociada al volcanismo cuaternario, específicamente en el cordón de Puntas Negras que se emplaza hacia el nor-oeste de la cuenca.

En la cuenca Pampa Las Tepas, las muestras de agua subterránea temperaturas varían entre un rango de 12,3 y 22,2 °C, lo que evidencia temperaturas inferiores a las reportadas en las muestras subterráneas de la mayoría de las cuencas piloto, indicando una menor influencia geotermal. Se identifica un aumento de la temperatura del agua con la profundidad.

Las temperaturas medidas para las muestras de agua superficial de la cuenca salar El Laco varía ampliamente entre los -3,8 y 18,5 °C. Cabe destacar que dos de las muestras con temperaturas más altas (LAC.F001 con 12,0 °C y LAC.F002 con 16.5 °C) corresponden a muestras de afloramiento y laguna, respectivamente, y ambas fueron extraídas del sector central del salar, donde aflora la laguna central. Las aguas subterráneas de la cuenca Salar El Laco tienen temperaturas variables entre los 5,5 y 15,8 °C, y son las más bajas de todas las muestras subterráneas analizadas.

8.5.1.3 pH

El pH mide la acidez del agua. Corresponde al logaritmo negativo de los iones de hidrógeno llamado potencial hidrógeno (pH), que varía típicamente entre el rango de 0 a 14 en disolución acuosa. Son ácidas las disoluciones con pH menor a 7, y básicas las que tienen pH mayor a 7, considerándose neutro el valor de pH 7.

En general, el pH del agua se mantiene entre el rango de 6.5 y 8.5 (ANEXO G), y excepcionalmente podría expandirse entre 3 y 11. Es fácilmente alterable, por lo que debe ser medido en el momento de tomar la muestra.

Las muestras de agua superficial del Salar de Aguas Calientes 2 presentan un amplio rango de pH que varía entre 5,0 – 9,7. Las muestras que se obtienen del sector norte son más ácidas y en general varían su pH entre 5,0 – 6,5, mientras que las muestras provenientes del sector sur-oeste son más básicas con rangos de pH que en general varían entre 7,0 – 9,0. Esto se debe probablemente a las diferencias litológicas que existen entre el norte y sur de la cuenca.

Las muestras de agua subterránea de la cuenca de Puntas Negras presentan características físico-químicas similares. El rango de pH varía entre 6,1 – 9,4, aunque la mayoría de los valores de pH son de 7,5.

Las muestras de agua superficial de la Laguna Tuyajto, cubren un amplio rango que varía entre los 4,7 – 8,9, aunque la mayoría de los valores se mantiene entre los 7,0 – 8,0. Las muestras de agua subterránea de la cuenca Laguna Tuyajto presentan valores de pH muy constantes que varía en general entre los 7,6 – 7,7.

Las muestras de agua subterránea de la cuenca Pampa Colorada se mantienen en el rango 6,2 – 7,9.

Las muestras de aguas subterráneas de la cuenca Pampa Las Tepas están en el rango de 6,2 – 8,3.

Las muestras de agua superficial y subterránea de la cuenca salar El Laco mantienen un pH constante, variando dentro de un rango de 6,9 – 9,6, pero casi todos los valores varían entre los 7,5 – 8,5.

A continuación, se grafican los valores obtenidos de pH, temperatura y conductividad en diagramas de caja representadas en la Figura 8.10, las que permiten visualizar la simetría de la distribución.

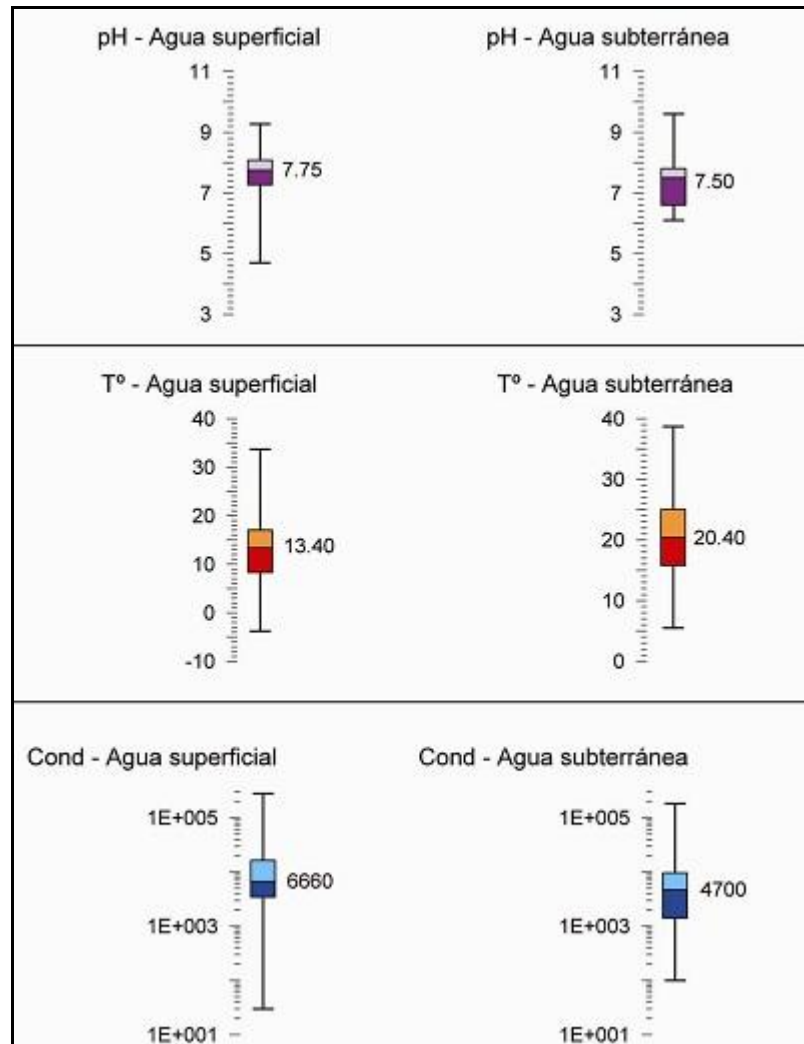


Figura 8.10 Diagramas de Caja de pH, conductividad y temperatura

8.5.2 Análisis de Elementos Mayoritarios del total de datos

La Figura 8.11 corresponde a un diagrama de Piper que grafica el total de muestras superficiales y subterráneas de muestras (ANEXO G). Cada color representa a una cuenca piloto diferente, y cada forma de los distintivos representa a un tipo de muestra de agua, entre pozo, vertiente, afloramiento, vega/bofedal, escurrimiento, y laguna.

Las muestras superficiales son en general de composición clorurada-sódica, con proporciones variables de calcio y sulfato. Las muestras de agua de la cuenca Salar de Aguas Calientes 2 son las que contienen mayores proporciones de estos dos elementos. Las muestras subterráneas son también en general, de composición clorurada-sódica.

Las muestras de agua subterránea de la cuenca Salar de Aguas Calientes 2 tienen un mayor contenido cálcico. Las muestras de agua subterránea de las cuencas Puntas Negras y Pampa Las Tecas contienen contenidos mayores de calcio y magnesio. Varias muestras correspondientes a la cuenca Pampa Las Tecas, contienen mayores contenidos de bicarbonatos.

Para construir los diagramas de Stiff, se han seleccionado las muestras representativas de cada cuenca, de manera de simplificar y mejorar la representación gráfica. Para los grupos de muestras que presentaron composición, concentración y ubicación similar, se ha escogido una única muestra representativa para ser graficada, de manera de no saturar el mapa con diagramas.

La Figura 8.12 indica cuáles son las muestras que se han seleccionado para este fin. La Figura 8.13 grafica los diagramas de Stiff los que se han ubicado referenciados sobre el mapa litológico de las cuencas piloto, de manera de facilitar la interpretación. La Figura 8.14 presenta la simbología de la Figura 8.13.

Los diagramas de Stiff también indican que las mayoría de las muestras de agua graficadas, son en general de composición clorurada-sódica, siendo las cuencas Salar de Aguas Calientes 2, Laguna Tuyajto y Pampa Las Tecas, las únicas que presentan excepciones.

Las aguas se caracterizan por un aumento paulatino en la concentración de sales disueltas, a medida que se desciende desde las zonas de recarga hacia los depocentros, donde posteriormente son sometidas a evaporación. Se reconoce una estratificación de las aguas, lo que permite definir la presencia de dos tipos de flujos: uno superficial con bajas concentraciones en elementos mayoritarios, y otro más profundo, con concentraciones altas.

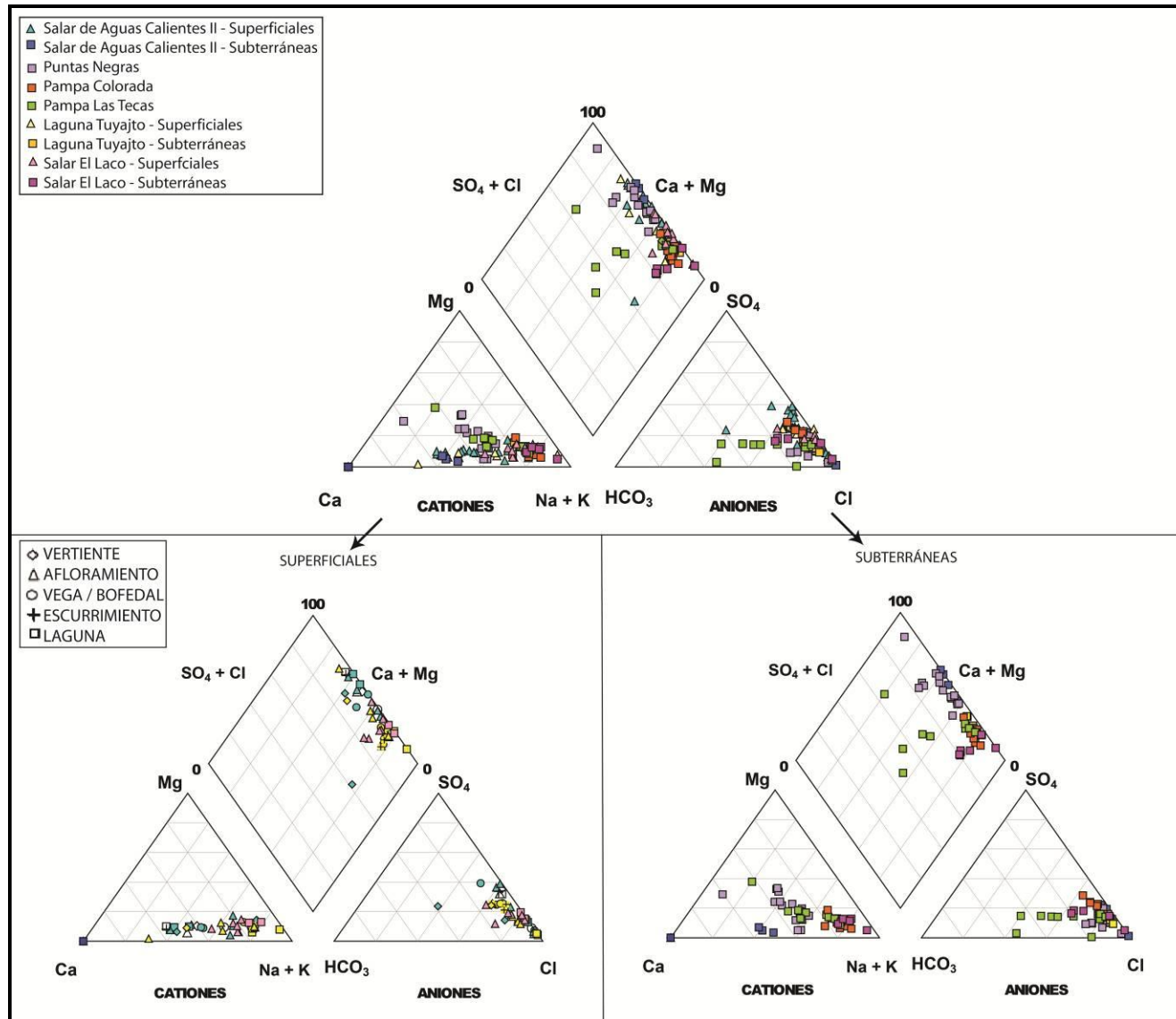


Figura 8.11 Diagramas de Piper para el total de muestras de las cuencas piloto (arriba), total de muestras superficiales (abajo izq.), y total de muestras subterráneas (abajo der.)

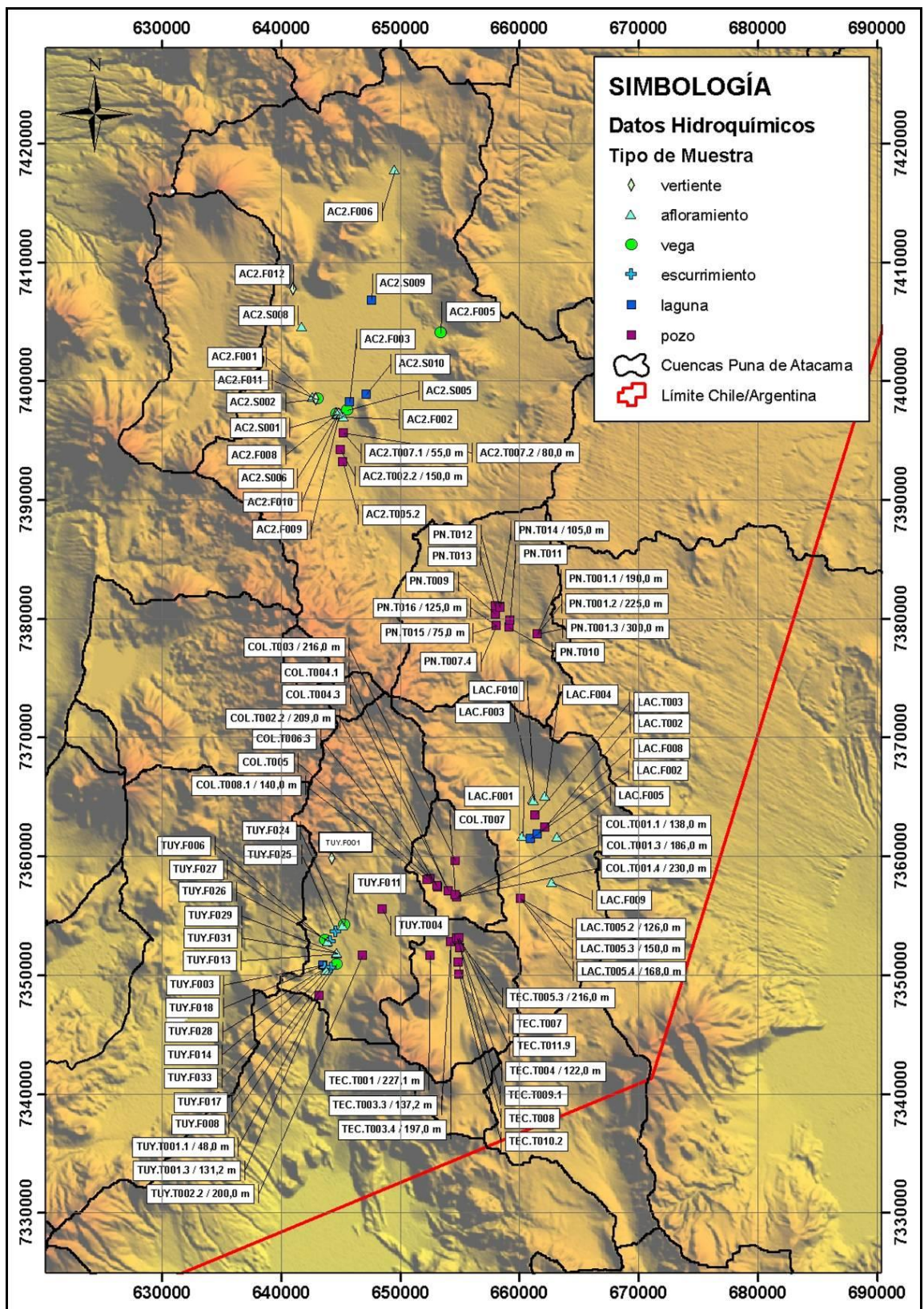


Figura 8.12 Muestras hidroquímicas que se han utilizado para el análisis químico de elementos mayoritarios mediante diagramas de Stiff.

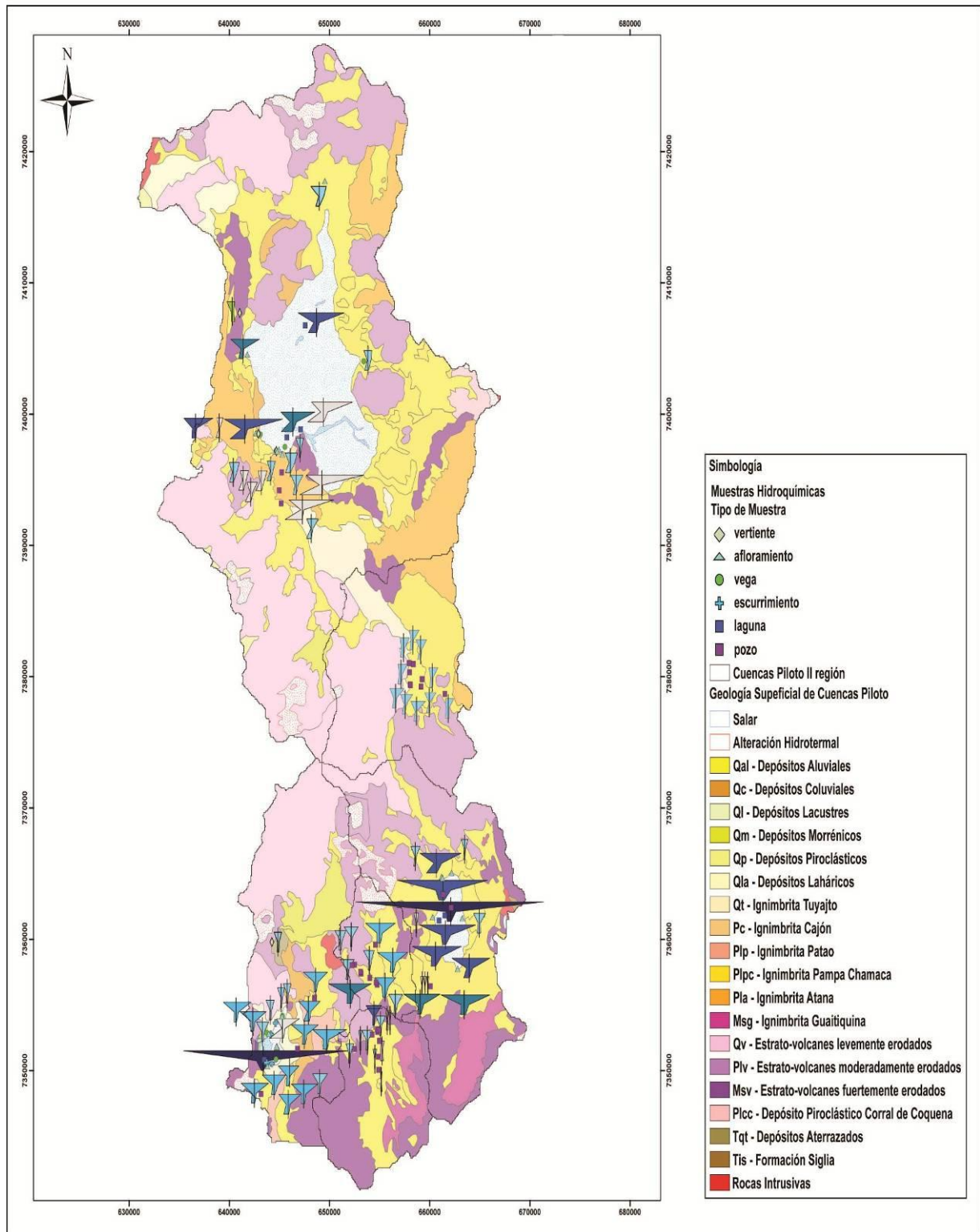


Figura 8.13 Diagramas de Stiff de las cuencas piloto de la II Región de Chile graficados sobre mapa litológico de las cuencas.



Figura 8.14 Simbología de Geología Superficial y Diagramas de Stiff de las cuencas piloto de la II Región de Chile. Los valores en paréntesis de las composiciones de agua, indican si los valores graficados han sido amplificados (X) o simpleficados (:).

8.5.3 Análisis Elementos Mayoritarios cuenca Salar de Aguas Calientes 2

Las aguas superficiales de la cuenca Salar de Aguas Calientes 2 son cloruradas-sódicas y cloruradas-cálcicas, algunas presentan contenidos intermedios de SO₄.

Las muestras más cálcicas corresponden a las aguas superficiales que caracterizan al sector suroeste del salar, en Pampa Amarilla. Las muestras de laguna son las menos sulfatadas (Figura 8.15).

Las aguas subterráneas de esta cuenca son cloruradas-cálcicas. Estas muestran una estratificación de las aguas, dado que las de mayor profundidad están altamente concentradas, y enriquecidas en calcio. Un lente de agua subterránea salobre (< 5.000 mg/L) fluye hacia el salar de Aguas Calientes 2 sobre agua subterránea salina (hasta 60.000 mg/L) (Figura 8.16).

La única muestra que tiene una composición química diferente es la AC2.F012 de composición bicarbonatada-sódica. Corresponde a una vertiente que aflora a partir de rocas pertenecientes a la ignimbrita Atana en el sector del Cordón Alto Toro Blanco, y es una de las principales alimentadoras del salar en ese sector. La vertiente se encuentra alejada del salar por lo que no se ve influenciada por mezcla de aguas o redisolución, y su composición refleja el quimismo de las aguas de recarga local, todavía dulces y sin grandes concentraciones de elementos disueltos.

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

Las aguas subterráneas salinas de mayor profundidad, y las muestras que corresponden a vertientes y afloramientos, son de composición clorurada-cálcica, y presentan mayores proporciones de sulfato.

Siguiendo la dirección de flujo de las aguas subterráneas, desde sur a norte, se refleja el aporte cálcico de estas aguas de flujo regional, en las muestras de la laguna que aflora en el extremo suroeste del salar.

Las rocas que afloran en superficie corresponden a las ignimbritas Tuyajto, Cajón, Pampa Chamaca y Atana. Según los análisis geoquímicos realizados en la Carta Geológica de Chile, Hoja Río Zapaleri, la Ignimbrita Atana contiene relativamente altos porcentajes de contenido en Ca, al igual que las rocas pertenecientes a los conjuntos de volcanes II y III (Gardeweg y Ramírez, 1984). El sulfato podría tener origen hidrotermal asociado a volcanismo reciente en el Cordón de Puntas Negras.

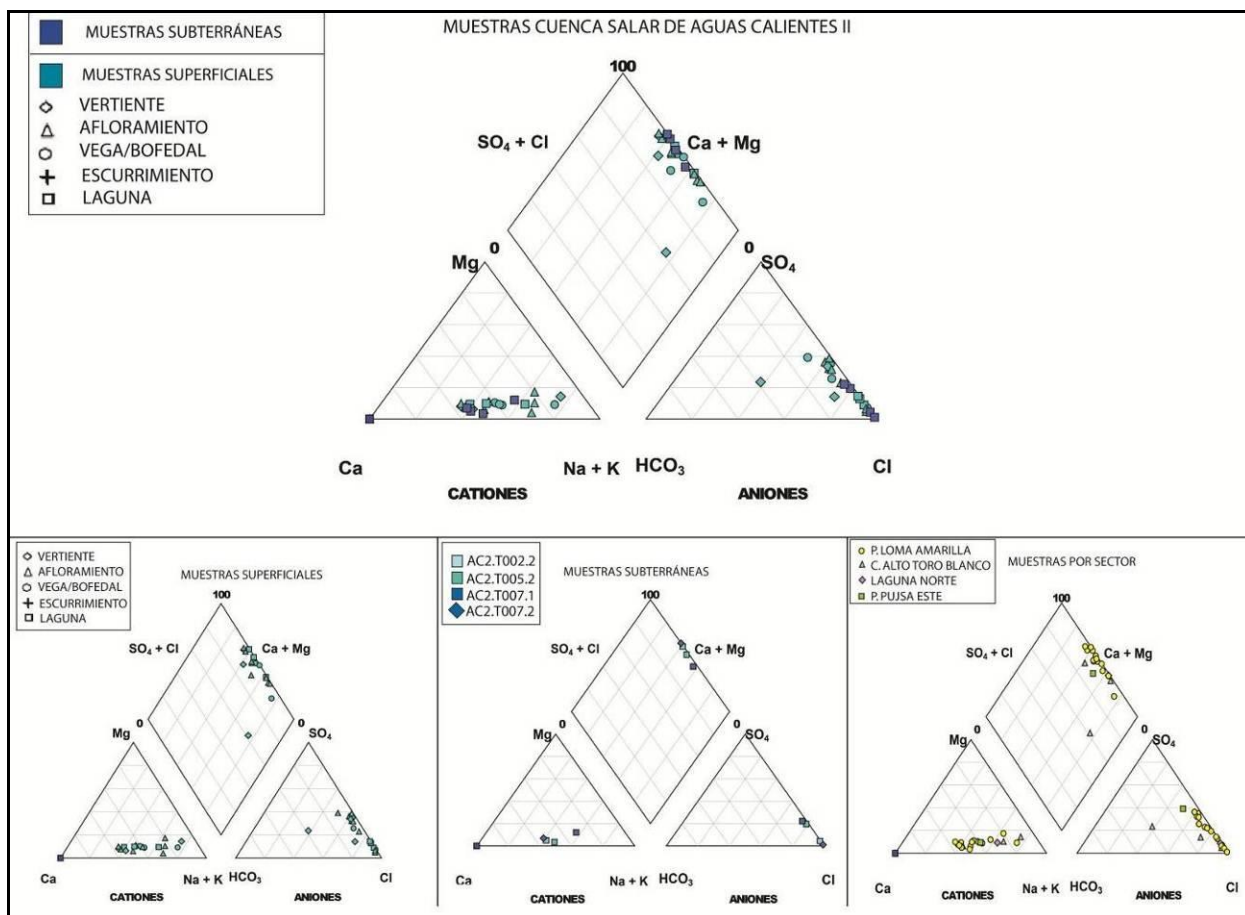


Figura 8.15 Diagramas de Piper para el total de muestras de las cuenca Salar de Aguas Calientes 2 (arriba), muestras superficiales (abajo izquierda), muestras por sector (abajo medio) y muestras subterráneas (abajo derecha).

8.5.4 Análisis Elementos Mayoritarios cuenca Puntas Negras

Las aguas subterráneas de la cuenca de Puntas Negras son cloruradas-sódicas, con relativamente altas proporciones de contenido en calcio y magnesio (Figura 8.17).

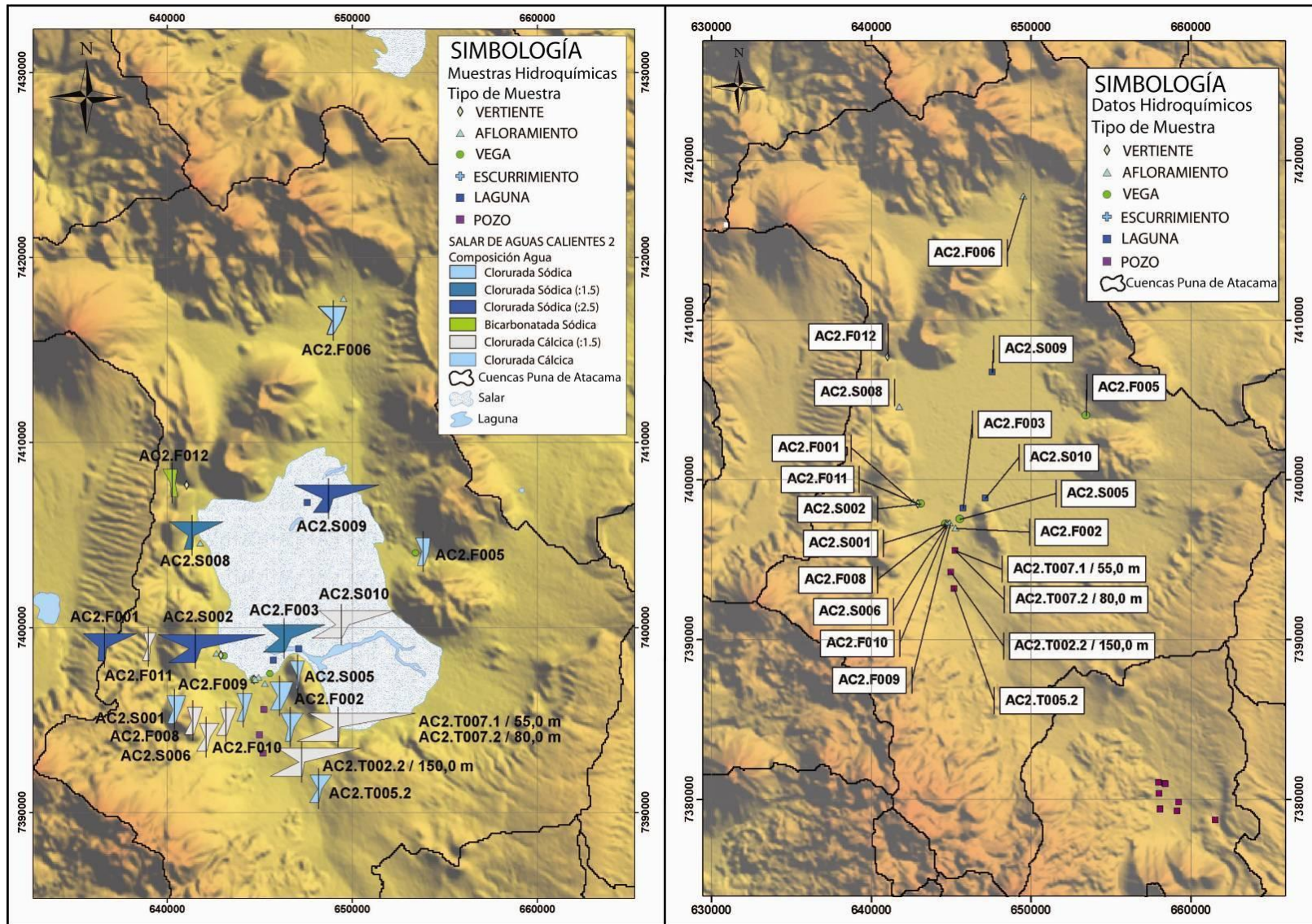


Figura 8.16 Diagramas de Stiff (izquierda), ubicación y tipo de muestras (derecha), correspondientes a la cuenca Salar de Aguas Calientes 2.

La mayoría de las muestras analizadas no cuentan con el dato de profundidad de extracción, razón por la cual no se puede incorporar esta variable al análisis.

Las muestras son poco concentradas independiente de la profundidad a la cual han sido muestreadas (Figura 8.18).

El aporte cálcico y magnésico proviene de la composición química de las ignimbritas que afloran hacia el norte de la cuenca.

Las muestras que provienen del sur de la cuenca son en general más concentradas, indicando un mayor aporte proveniente de los depósitos volcánicos del Conjunto de Volcanes II, que afloran en este sector de la cuenca, y una menor mezcla con aguas de recarga.

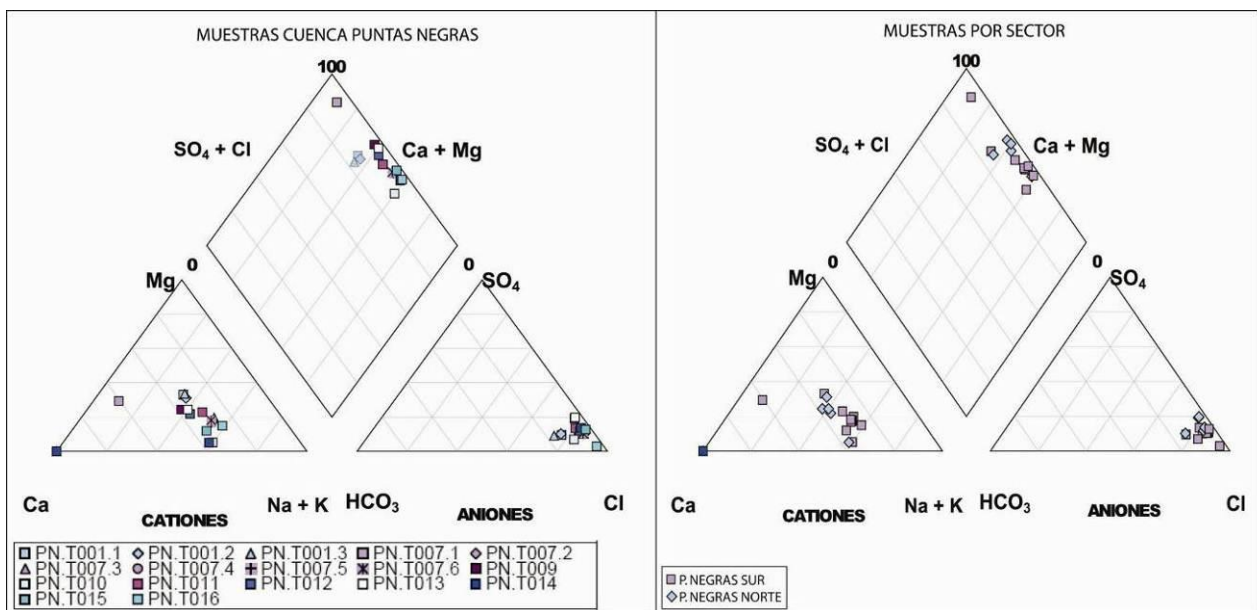


Figura 8.17 Diagramas de Piper para el total de muestras subterráneas de la cuenca Puntas Negras manteniendo igual color y diferente distintivo para indicar las diferentes profundidades de un mismo pozo (izquierda), y las muestras diferenciadas según su ubicación geográfica (derecha).

8.5.5 Análisis Elementos Mayoritarios cuenca Laguna Tuyajto

La composición química de la mayoría de las muestras de agua de la cuenca Laguna Tuyajto, es clorurada-sódica. La excepción es para la muestra TUY.F031, que es clorurada-cálcica y fue extraída

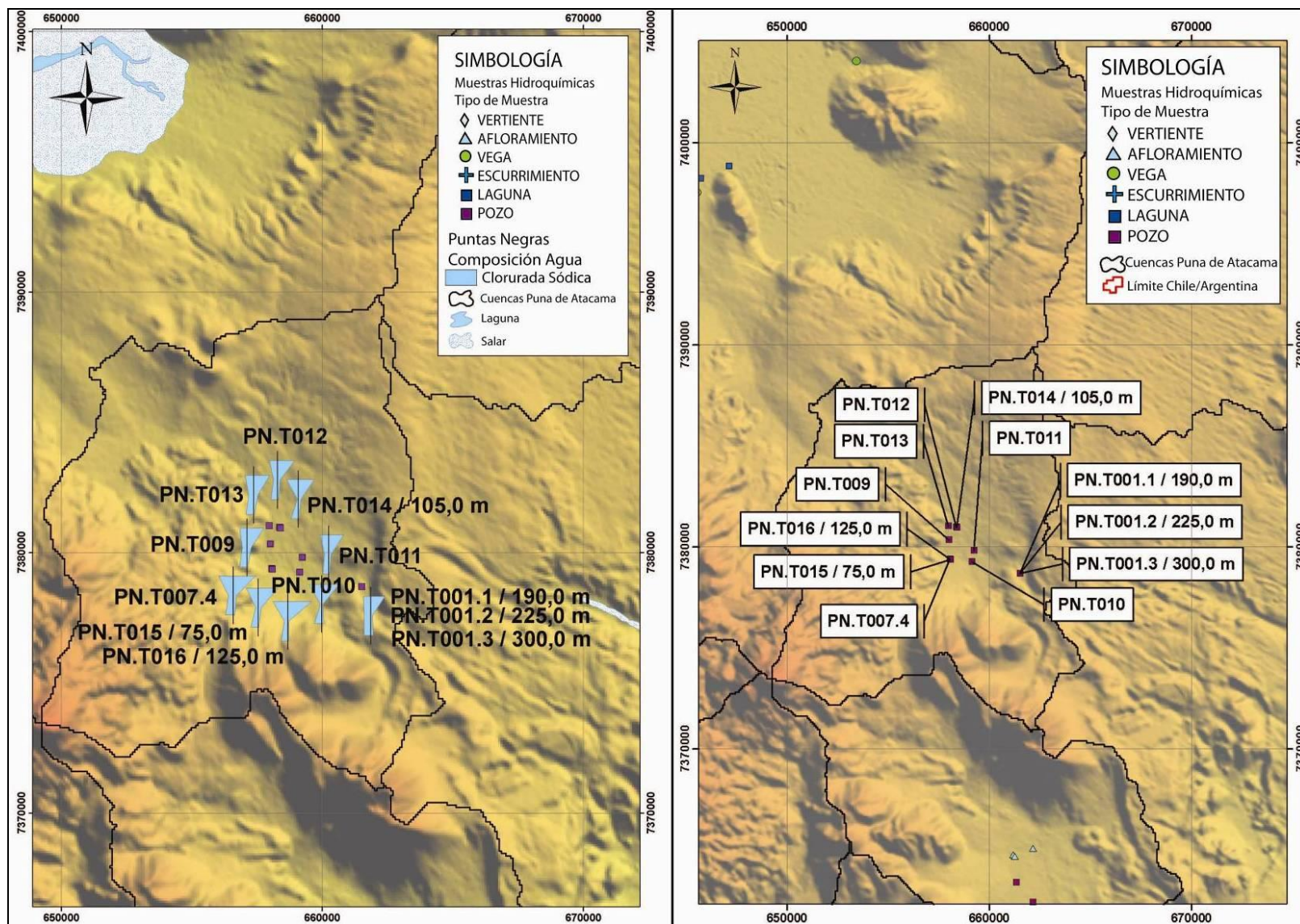


Figura 8.18 Diagramas de Stiff (izquierda), ubicación y tipo de muestras (derecha), correspondientes a la cuenca Puntas Negras.

a partir de un afloramiento de agua ubicado al este de la laguna, que no está contaminada de la cuña salina (Figura 8.19).

Las aguas superficiales de la cuenca Laguna Tuyajto tienen una composición clorurada-sódica y algunas muestras presentan altos contenidos en calcio.

En general las muestras obtenidas a partir de vertientes y afloramientos son de composición más cálcica, mientras que las de escurrimientos y laguna son de composición más sódica.

Las aguas superficiales del norte de la cuenca presentan concentraciones menores que las ubicadas más al sur, indicando que la dirección del flujo de recarga proviene desde el cordón Chalviri en el norte, en dirección a la depresión.

Las muestras de la Laguna Tuyajto son altamente concentradas, razón por la cual se ha debido realizar una representación a escala de los diagramas de Stiff, los que se presentan a 1/5 de su tamaño real (Figura 8.20). Esto indica una lixiviación de antiguas evaporitas que aumentan considerablemente la salinidad del agua. Las líneas de costa y depósitos lacustres que se identifican en el mapa geológico, hacia el este de la laguna, respaldan esta hipótesis.

El agua subterránea es de composición clorurada-sódica.

Las muestras extraídas en sectores cercanas a la laguna Tuyajto presentan altas concentraciones lo que se debe a una migración salina desde la laguna hacia las aguas subterráneas.

Se identifican altas concentraciones para las muestras de agua subterránea extraídas hacia el extremo este de la cuenca, alejados de la laguna (Figura 8.20). La composición marcadamente clorurada-sódica, y las altas concentraciones de las aguas subterráneas hacia el margen este de la cuenca, insinúan una conexión entre esta cuenca y sus vecinas, Pampa Colorada y Pampa Las Tecas.

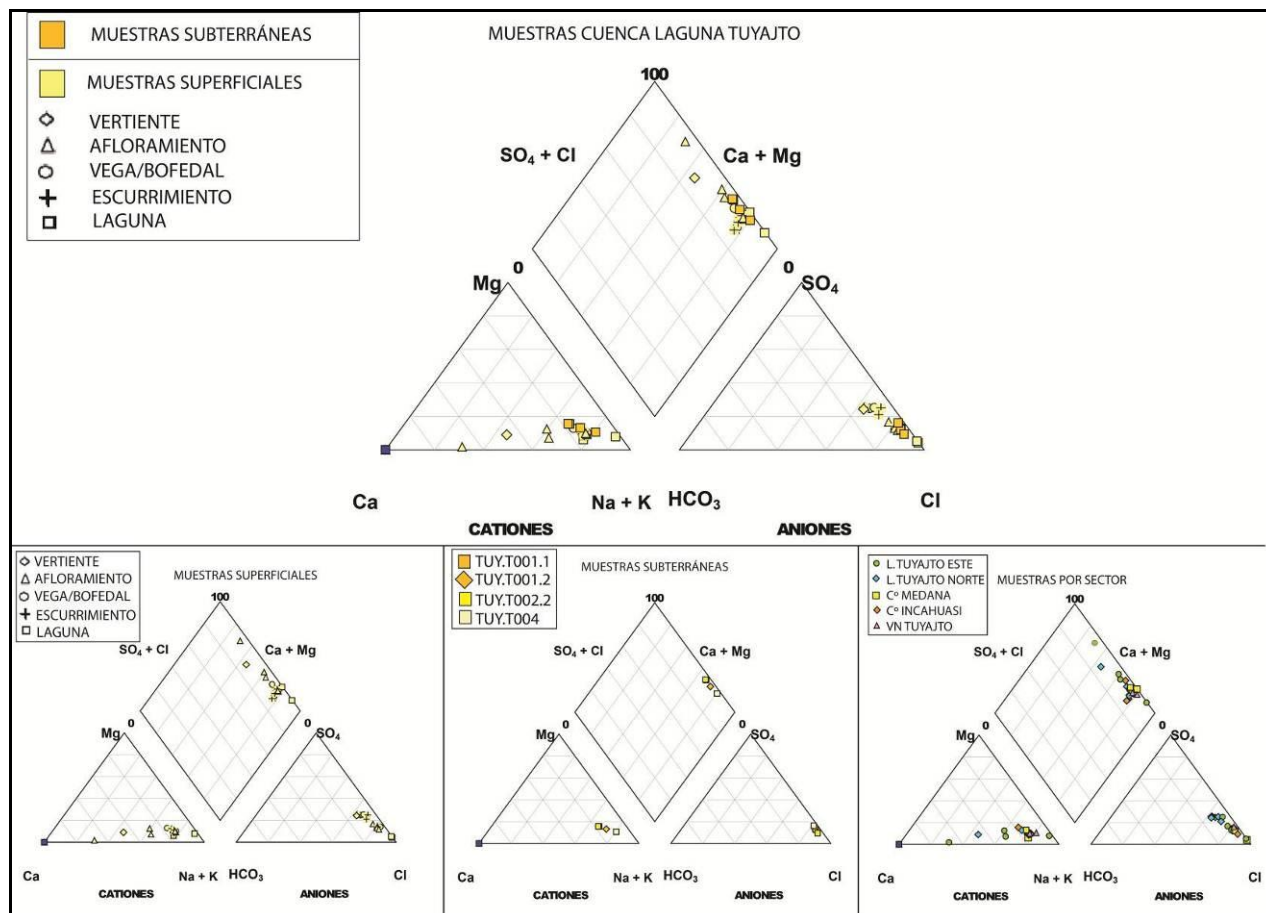


Figura 8.19 Diagramas de Piper para el total de muestras de las cuenca Laguna Tuyajto (arriba), muestras superficiales (abajo izquierda), muestras por sector (abajo medio) y muestras subterráneas (abajo derecha).

8.5.6 Análisis Elementos Mayoritarios cuenca Pampa Colorada

La composición química de las todas las aguas que caracterizan a la cuenca Pampa Colorada es clorurada-sódica. Se observa que todas las muestras tienen composición similar, independiente de la ubicación geográfica del pozo o de la profundidad de extracción de la muestra (Figura 8.21).

Las aguas subterráneas de la cuenca muestran una estratificación en la concentración química (Figura 8.22). Las muestras que representan profundidades superiores a los 150 m, presentan concentraciones mayores que las más cercanas a la superficie. Cabe destacar que para profundidades similares,

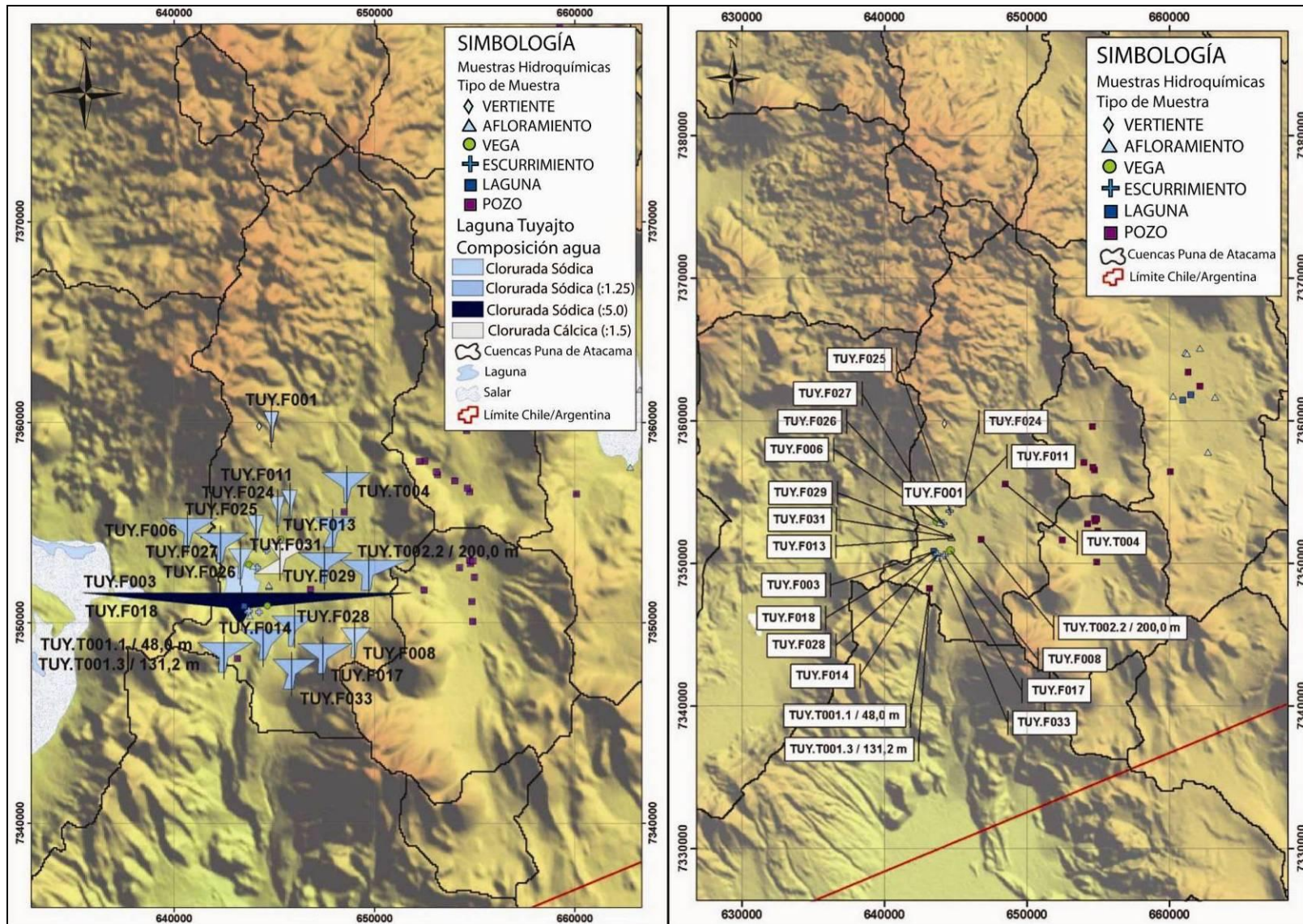


Figura 8.20 Diagramas de Stiff (izquierda), ubicación y tipo de muestras (derecha), correspondientes a la cuenca Laguna Tuyajto

las muestras que representan al sector este de la cuenca son más concentradas que las que representan al sector oeste.

Las aguas subterráneas de la cuenca presentan concentraciones salinas muy altas en relación al tamaño pequeño de la cuenca. Esto podría indicar la existencia de flujos regionales con aportes salinos subterráneos que provienen de la cuenca Salar El Laco.

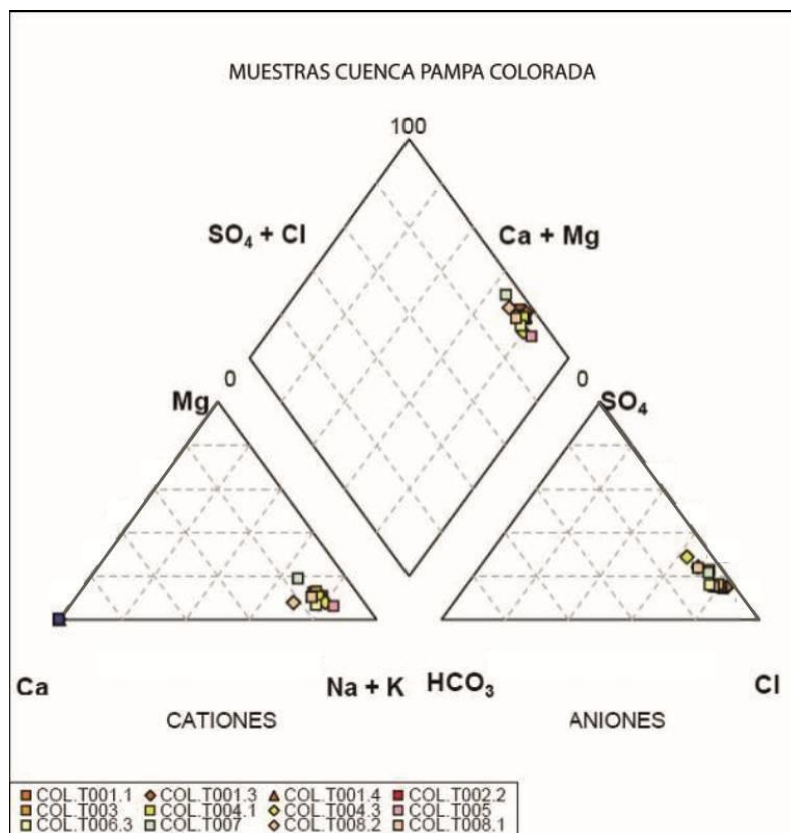


Figura 8.21 Diagrama de Piper para el total de muestras subterráneas de la cuenca Pampa Colorada manteniendo igual color y diferente distintivo para indicar las diferentes profundidades de un mismo pozo.

8.5.7 Análisis Elementos Mayoritarios cuenca Pampa Las Tecas

La composición química de las aguas subterráneas de la cuenca Pampa Las Tecas clasifica en su mayoría como cloruradas-sódicas, pero tienen proporciones considerables de calcio y bicarbonato (Figura 8.23).

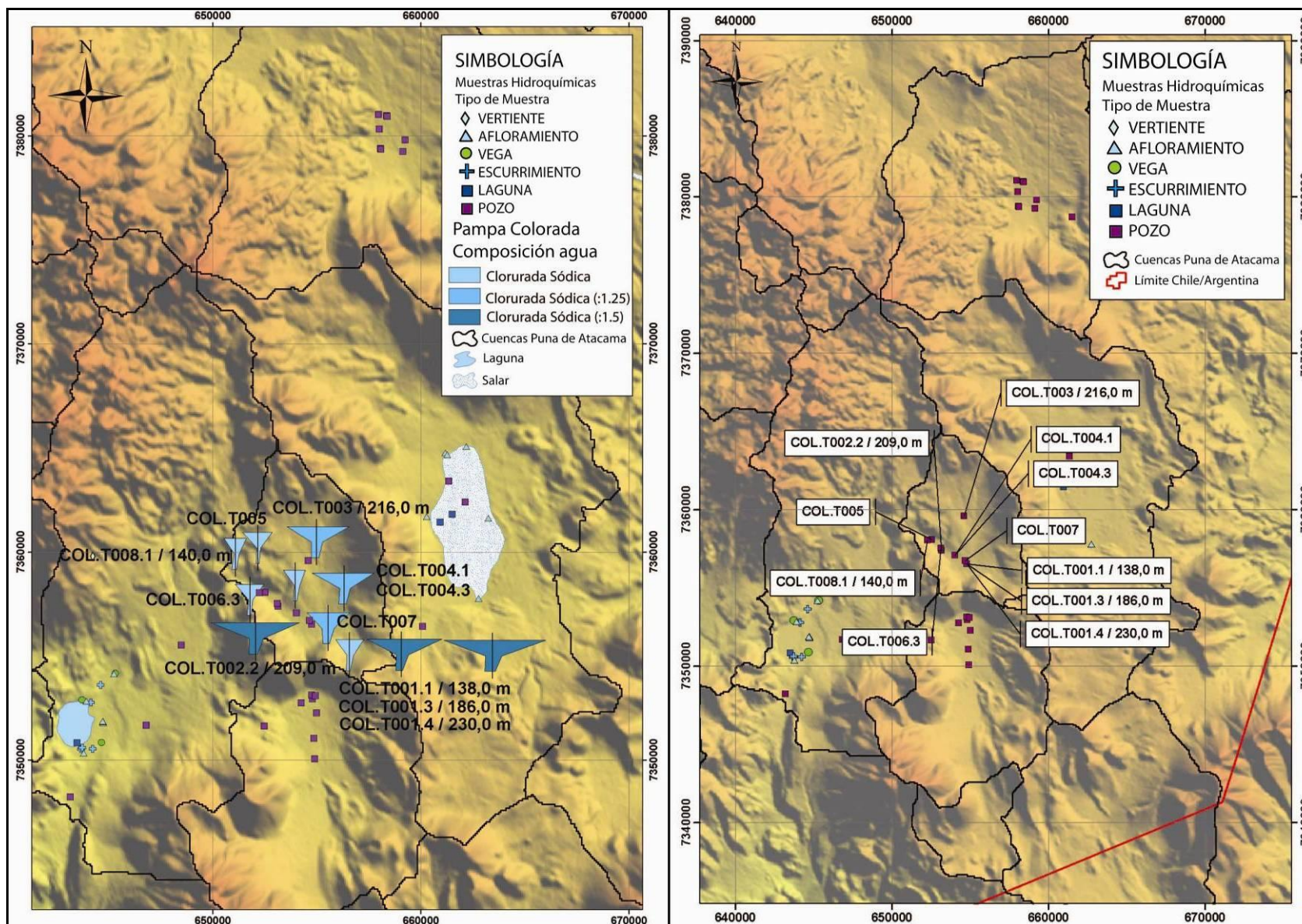


Figura 8.22 Diagramas de Stiff (izquierda), ubicación y tipo de muestras (derecha), correspondientes a la cuenca Pampa Colorada

Las excepciones son para la muestra TEC.T10.2 de composición bicarbonatada-sódica, y la muestra TEC.T009.2, de composición clorurada-magnésica, ambas con concentraciones bajas (Figura 8.24).

El aporte magnésico de la muestra TEC.T009.2 tiene su origen en las rocas pertenecientes al Conjunto de Volcanes I que son muy ricas en magnesio (Gardeweg y Ramírez, 1984).

Se observa una estratificación de las aguas, las que aumentan su concentración con la profundidad (Figura 8.24).

Las aguas subterráneas de la cuenca presentan muy bajas concentraciones salinas, lo que se relaciona a una recarga local y rápida de las aguas que infiltran, que corrobora a esta cuenca como una zona de recarga con circulación de aguas hacia la cuenca Laguna Tuyajto.

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

8.5.8 Análisis Elementos Mayoritarios cuenca Salar El Laco

La composición química de las aguas que caracterizan la cuenca Salar El Laco es clorurada-sódica (Figura 8.25), con proporciones variables de calcio, siendo las muestras de afloramiento las más concentradas en este catión.

Las muestras de laguna están altamente concentradas razón por la cual se ha debido realizar una representación a escala de los diagramas de Stiff, los que se presentan a 1/5 de su tamaño real (Figura 8.26).

Las muestras de agua subterránea extraídas a partir del pozo PCAR-2 son las que presentan mayor proporción de calcio, y son de baja concentración, independiente de la profundidad de extracción.

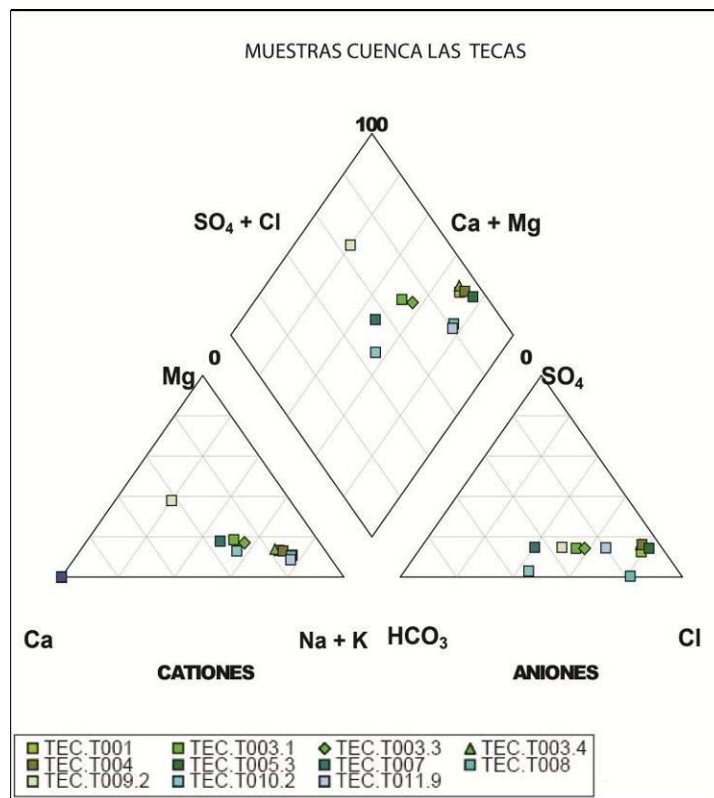


Figura 8.23 Diagrama de Piper para el total de muestras subterráneas de la cuenca Pampa Las Tecas manteniendo igual color y diferente distintivo para indicar las diferentes profundidades de un mismo pozo.

Si se comparan las concentraciones de los afloramientos de agua de las diferentes cuencas evaporíticas, se observa que las de la cuenca Salar El Laco son bastante menores que las de las cuencas Salar de Aguas Calientes 2 y Laguna Tuyajto, lo que sugiere un escaso o nulo aporte proveniente de flujos regionales subterráneos.

Las muestras de afloramientos del sector norte de la cuenca se relacionan a trayectorias intermedias del flujo de las aguas de recarga, con aporte cálcico que proviene de las rocas volcánicas pertenecientes a los conjuntos de volcanes II y III, y que limitan al norte de la cuenca.

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

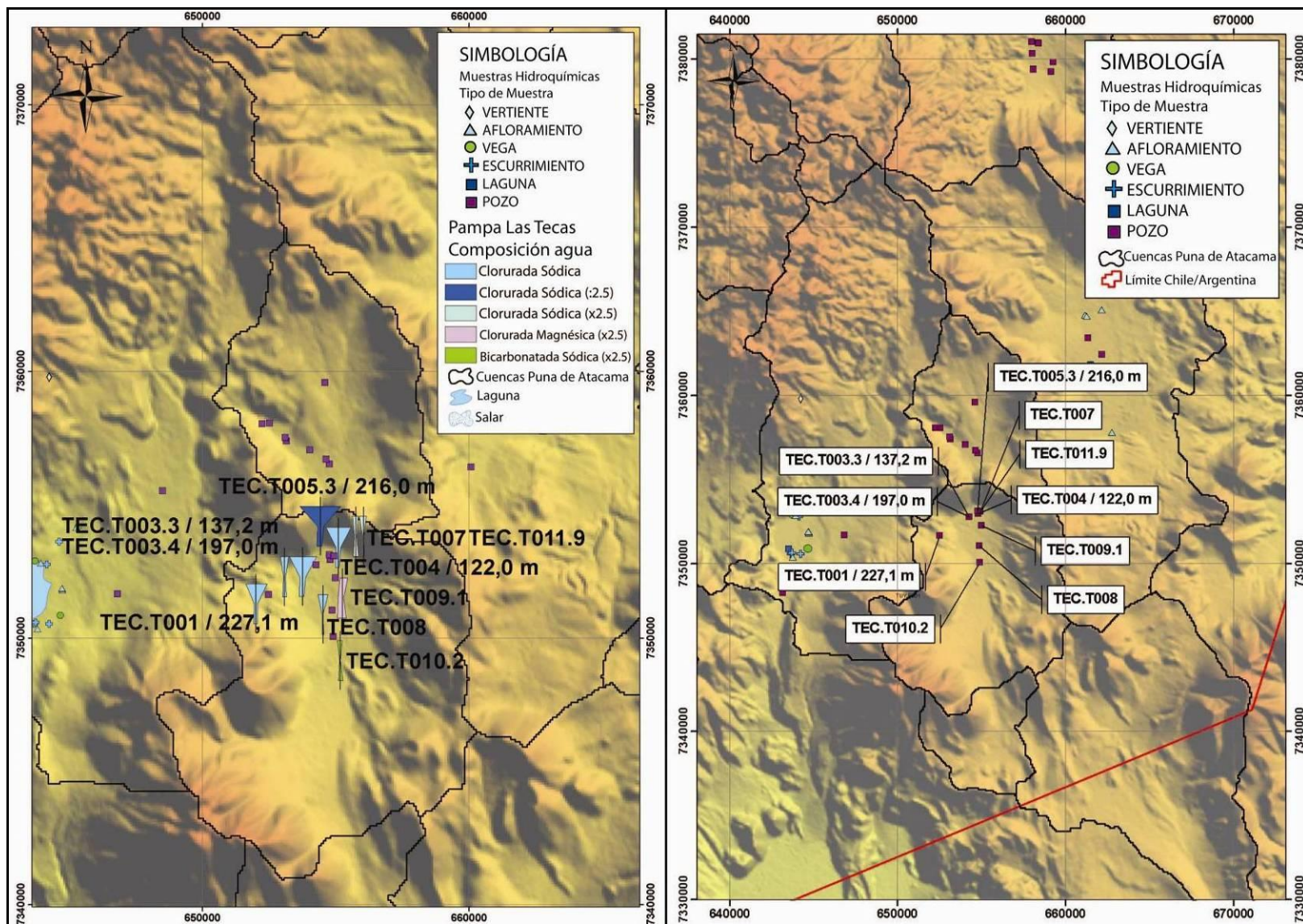


Figura 8.24 Diagramas de Stiff (izquierda), ubicación y tipo de muestras (derecha), correspondientes a la cuenca Pampa Las Tecas

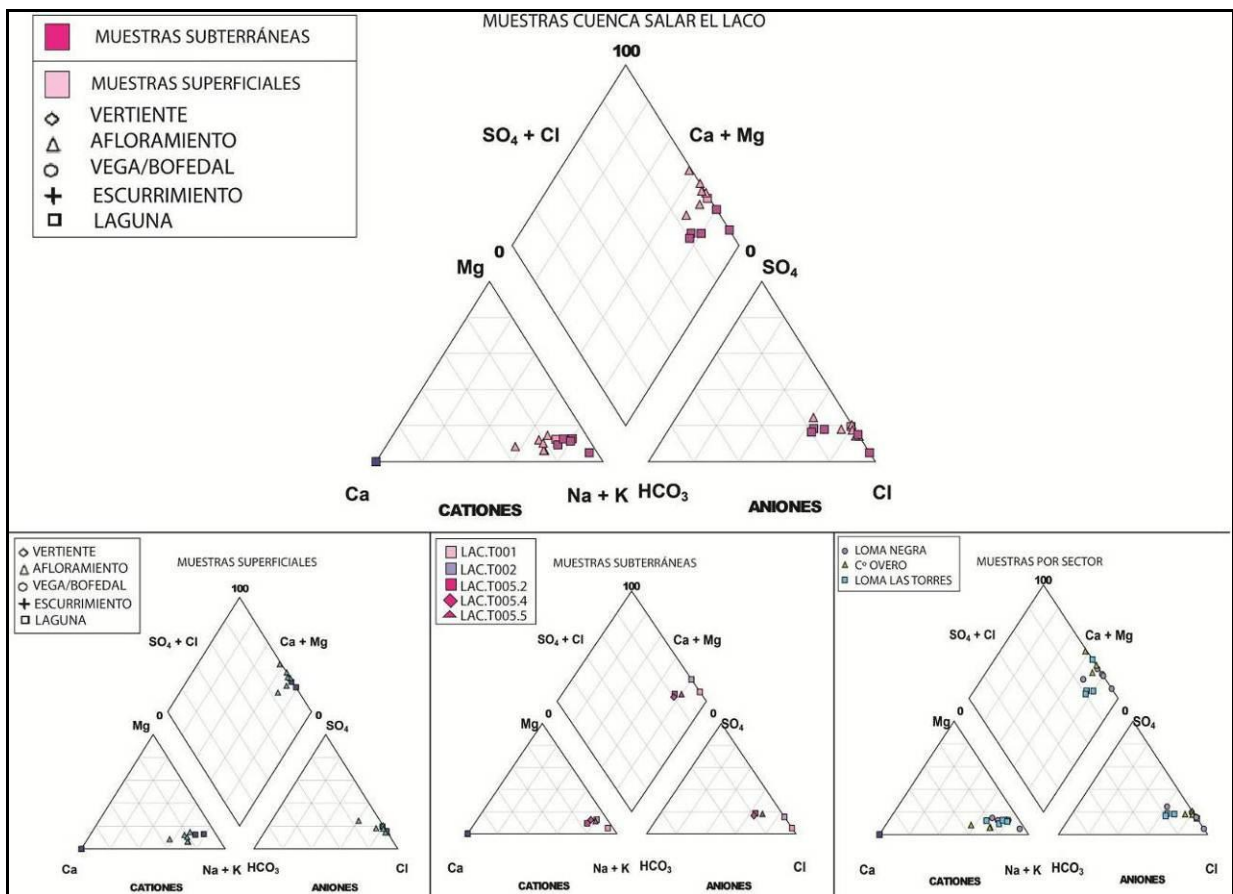


Figura 8.25 Diagramas de Piper para el total de muestras de las cuenca Salar El Laco (arriba), muestras superficiales (abajo izquierda), muestras por sector (abajo medio) y muestras subterráneas (abajo derecha)

8.5.9 Análisis Elementos Minoritarios

Dado el carácter endorreico de las cuencas altiplánicas, es posible registrar concentraciones mayores de elementos minoritarios y traza a las habituales para otras cuencas. Esto se debe principalmente al incremento paulatino en la concentración de sólidos disueltos, por efecto de la evaporación y la restringida circulación de las aguas. Un análisis preliminar de la base de datos permite identificar una anomalía en valores altos de arsénico, litio y boro, relativo a las concentraciones que habitualmente se reconocen en la naturaleza.

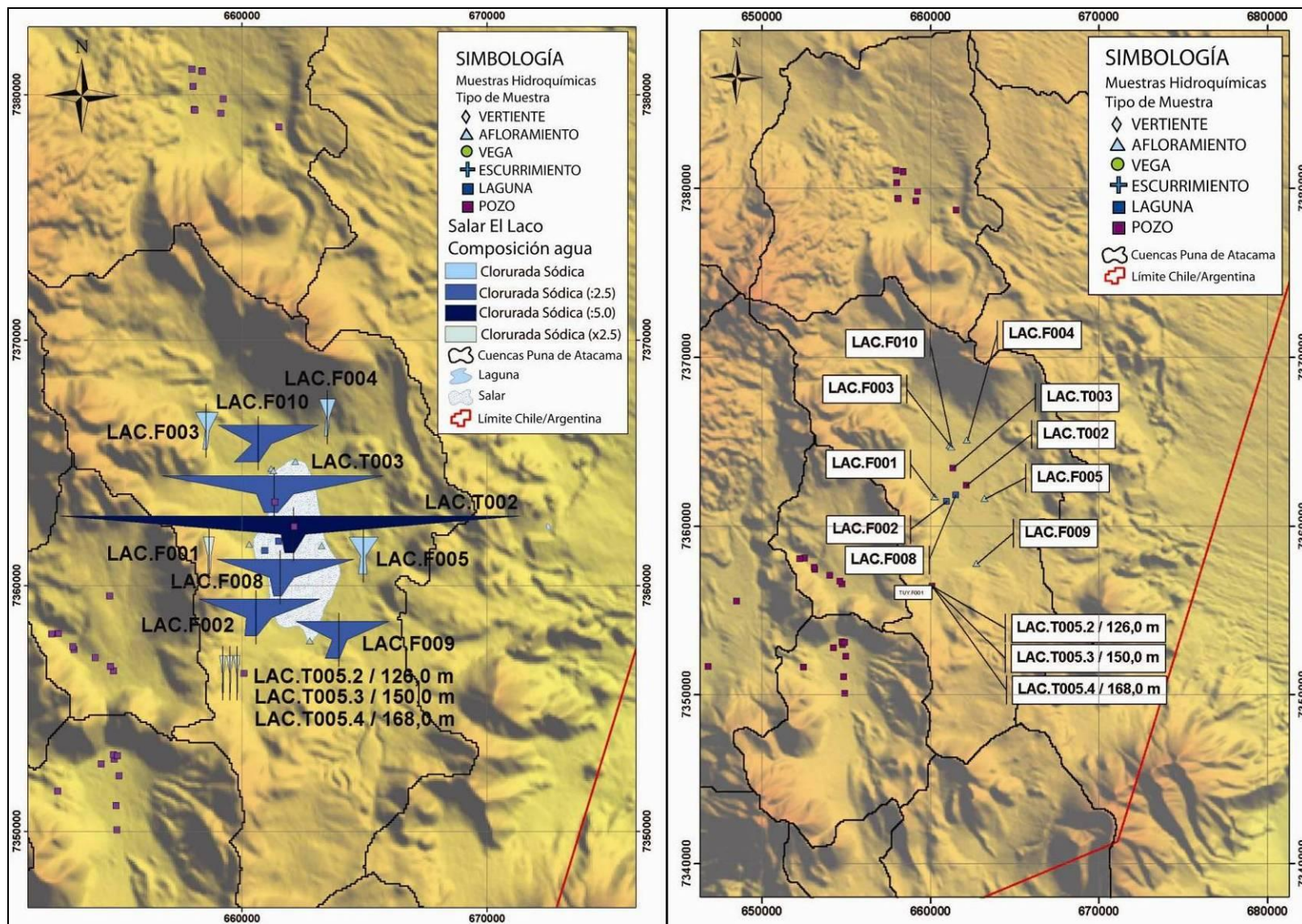


Figura 8.26 Diagramas de Stiff (izquierda), ubicación y tipo de muestras (derecha), correspondientes a la cuenca Salar El Lago

La Figura 8.27, Figura 8.28, y Figura 8.29 grafican las concentraciones de los elementos minoritarios con respecto a la conductividad medida en laboratorio. Los gráficos del arsénico, boro y litio indican una relación bastante lineal entre el aumento de concentración y la conductividad, con ciertas diferencias que se detallan a continuación.

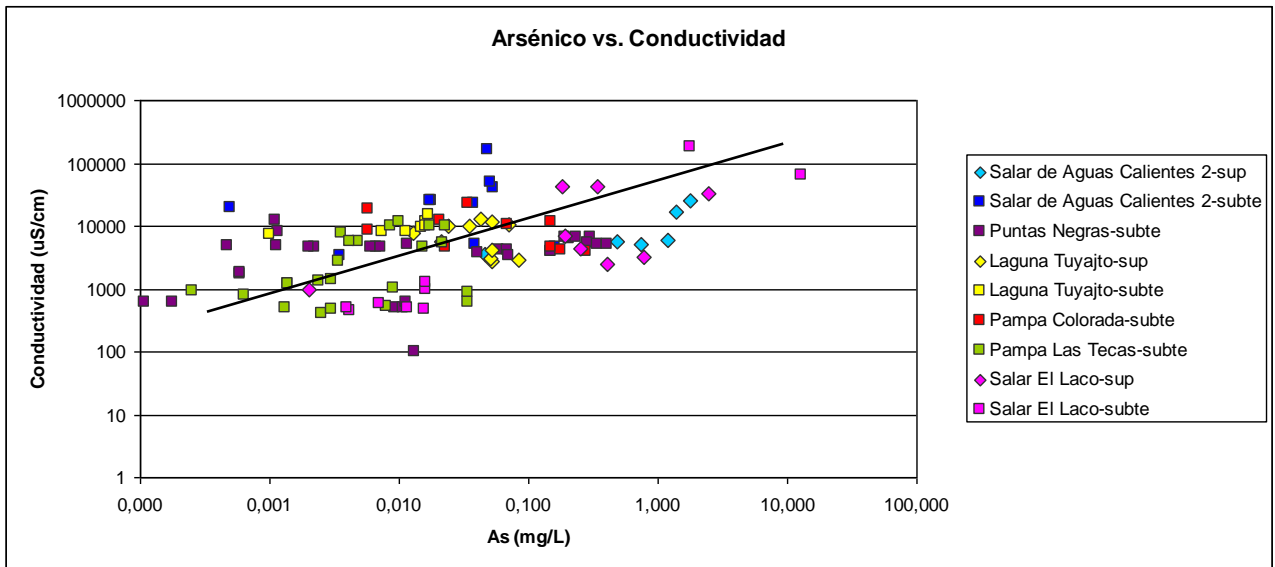


Figura 8.27 Diagrama arsénico v/s conductividad eléctrica del agua.

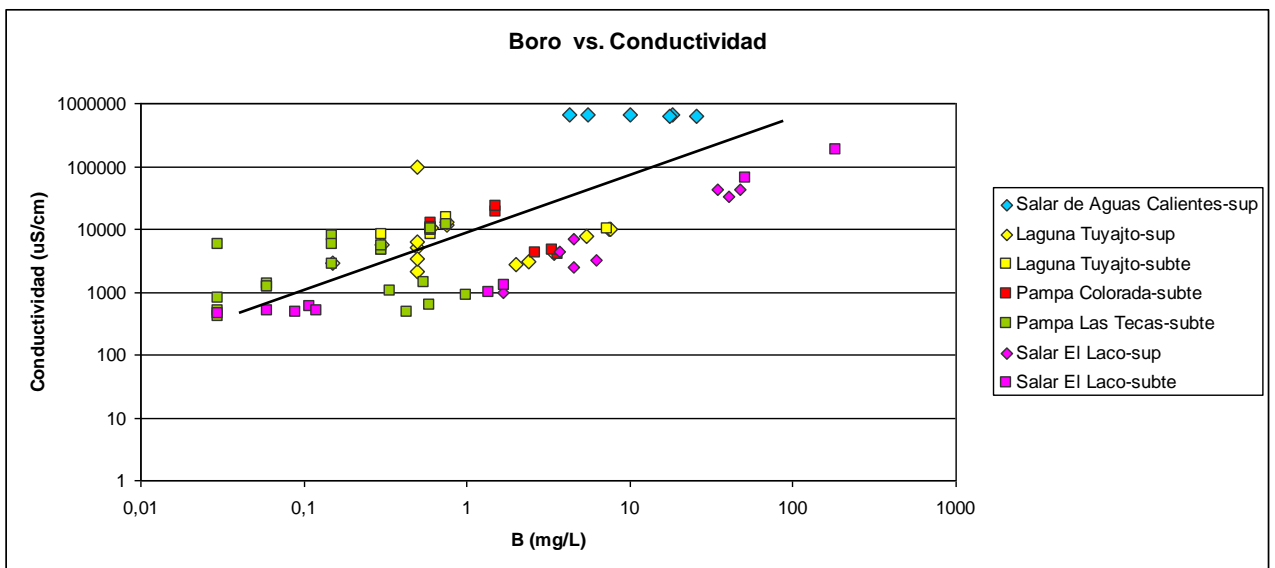


Figura 8.28 Diagrama boro v/s conductividad eléctrica del agua.

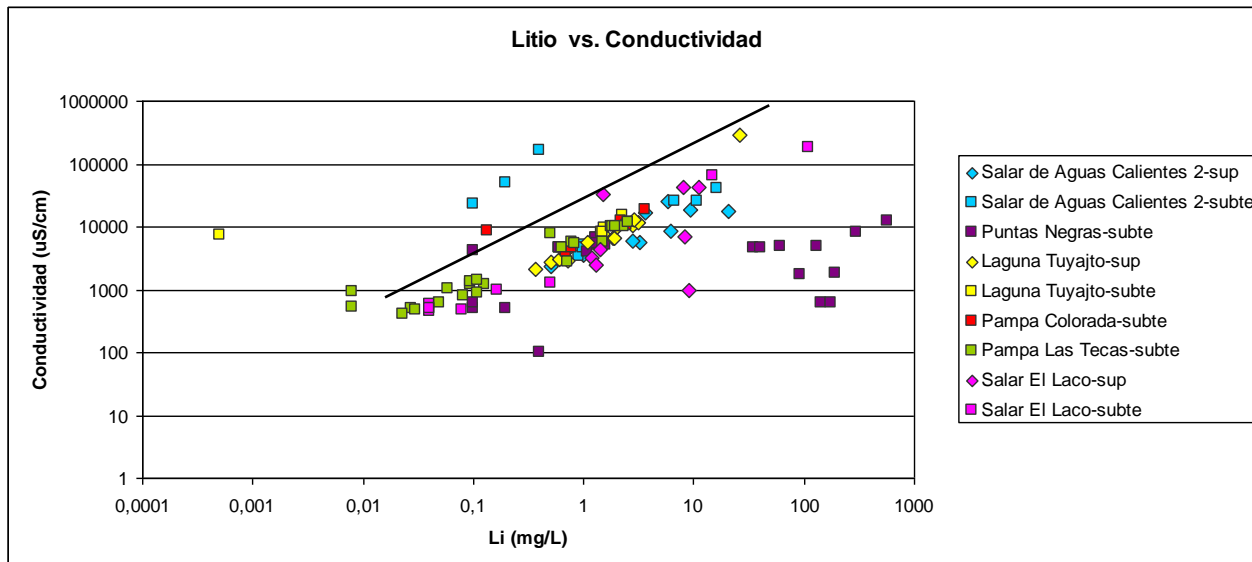


Figura 8.29 Diagrama litio v/s conductividad eléctrica del agua.

El arsénico arroja un comportamiento más disperso, donde el incremento de este elemento con la salinidad de las aguas no resulta claramente lineal.

No hay datos para el Boro para muestras subterráneas de las cuencas Salar de Aguas Calientes 2 y Puntas Negras. Se grafica un incremento lineal de la concentración del Boro con la conductividad, pero pueden distinguirse vagamente dos grupos. Un grupo representa a las muestras menos concentradas y se les asocia una recta de mayor pendiente, mientras que el otro grupo representa a las más salinas, que disminuyen su proporción entre concentración de boro y conductividad. El aumento del litio en cambio, está muy relacionado con el aumento general del total de sólidos disueltos en el agua, a excepción de algunos puntos con concentraciones anómalas mayores de las esperadas para las muestras subterráneas de la cuenca Puntas Negras. Las concentraciones de litio en Puntas Negras tienen un origen asociado a la disolución de rocas volcánicas ricas en este elemento, ubicadas en el sector suroeste de la cuenca, en el sector del cordón Punta Negras.

8.5.10 Concentraciones de Elementos Minoritarios en sistema de cuencas piloto

A continuación se presenta un análisis basado en los mapas de puntos escalados que se han construido (Figura 8.30, Figura 8.31, Figura 8.32) y que permiten reconocer los sectores de las cuencas que presentan mayores concentraciones. La intensidad del color y el tamaño de los símbolos mostrado son proporcionales a la concentración del elemento graficado.

Arsénico

Se detectan altas concentraciones de arsénico (>2 mg/L) para aguas superficiales ubicadas al oeste del salar de Aguas Calientes 2, al oeste de la laguna Tuyajto y al norte del salar El Laco. Las concentraciones de arsénico en muestras de agua subterránea son constantes, y en general inferiores a 0,5 mg/L. La única excepción de una muestra subterránea que presenta una alta concentración fue extraída en la cuenca Salar El Laco, y corresponde a una muestra de puntera (Figura 8.30).

Boro

Se identifican concentraciones altas en Boro (>60 mg/L) para las aguas superficiales ubicadas al oeste del salar de Aguas Calientes 2 y oeste del salar El Laco. La base de datos no registra datos subterráneos de Boro para las cuencas del norte del sistema de cuencas piloto, y sólo se observan valores anómalos en el salar El Laco, para las muestras subterráneas que corresponden a punteras (Figura 8.31).

Existen diversos estudios que evidencian las altas concentraciones de boro que se reportan para las rocas ignimbríticas neógenas y pleistocénicas y andesitas cenozoicas, que pertenecen a Los Andes centrales, y que se emplazan en la Puna de Atacama (Kasemann et al, 2003; Schmitt et al, 2001). Los afloramientos ignimbríticos prevalecen en las cuencas Salar de Aguas Calientes 2 y Salar El Laco, lo que explica las mayores concentraciones de boro para las muestras de salmuera en estas cuencas.

Litio

Se identifican muy altas concentraciones de litio (>120 mg/L) en aguas superficiales de la cuenca Laguna Tuyajto, y en una muestra de laguna ubicada en el norte del salar de Aguas Calientes 2. Las muestras de vertientes y afloramientos presentan concentraciones más bajas que los de afloramientos difusos, escurrimientos y laguna. La mayoría de las muestras de agua subterránea presentan concentraciones inferiores a 5 mg/L (Figura 8.32). Las muestras de agua superficial asociadas a los salares, son las que presentan las mayores concentraciones de arsénico, boro y litio, y tiene que ver con un incremento paulatino en la concentración de sólidos disueltos, por efecto de la evaporación.

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

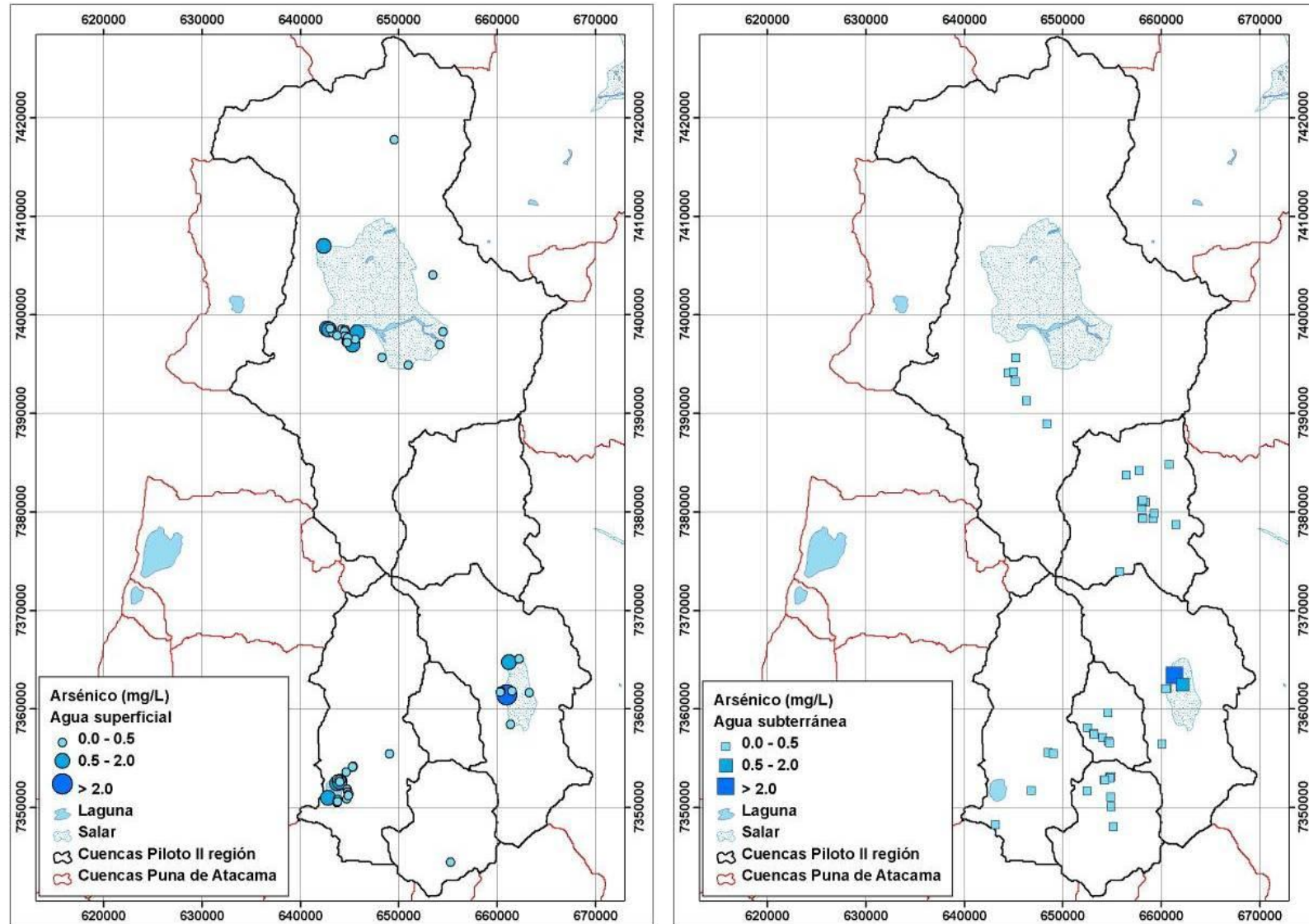


Figura 8.30 Concentraciones de arsénico superficial (izquierda) y subterráneo (derecha) en el sistema de cuencas piloto de la II Región de Chile

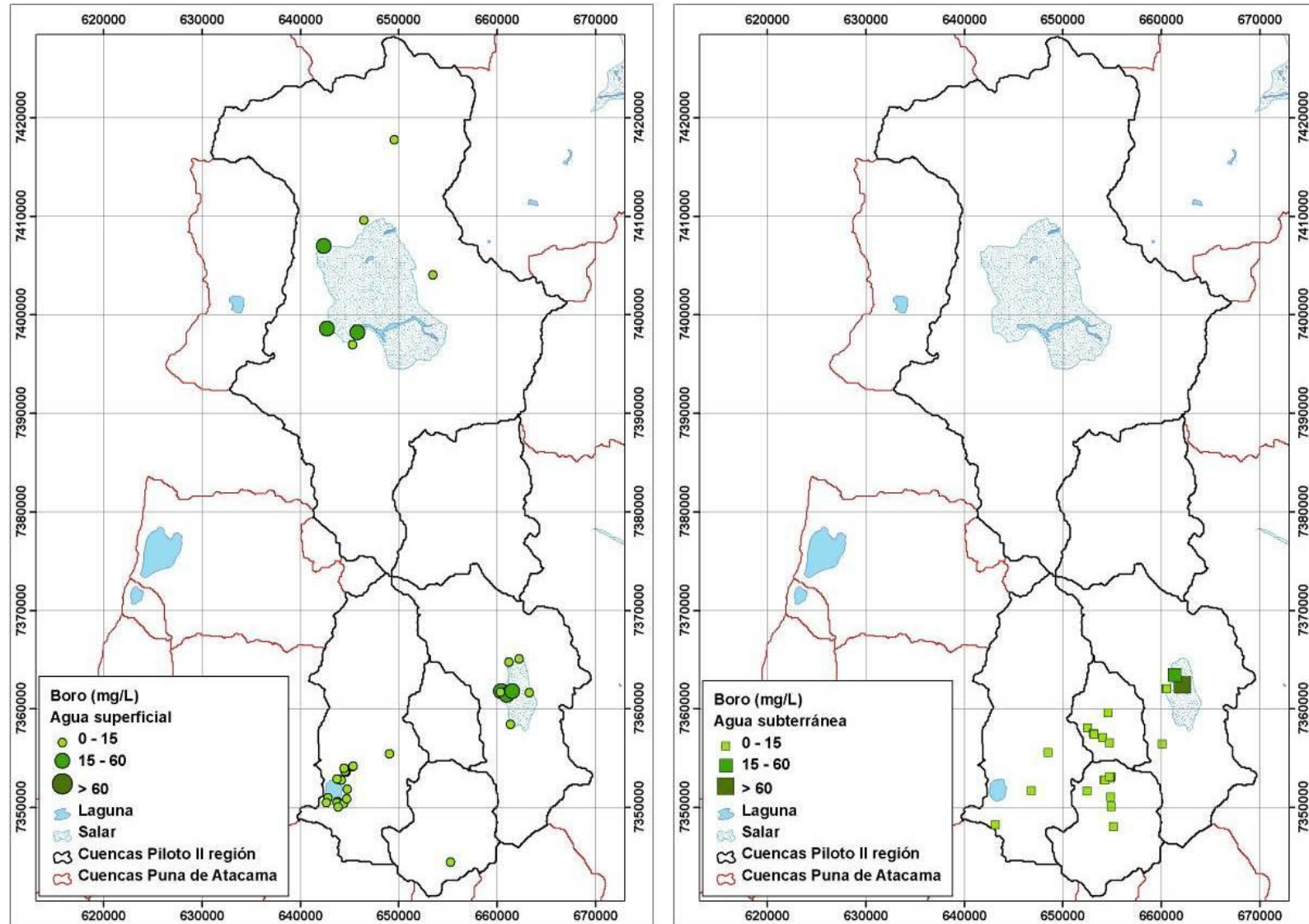


Figura 8.31 Concentraciones de boro superficial (izq.) y subterráneo (der.) en el sistema de cuencas piloto de la II Región de Chile

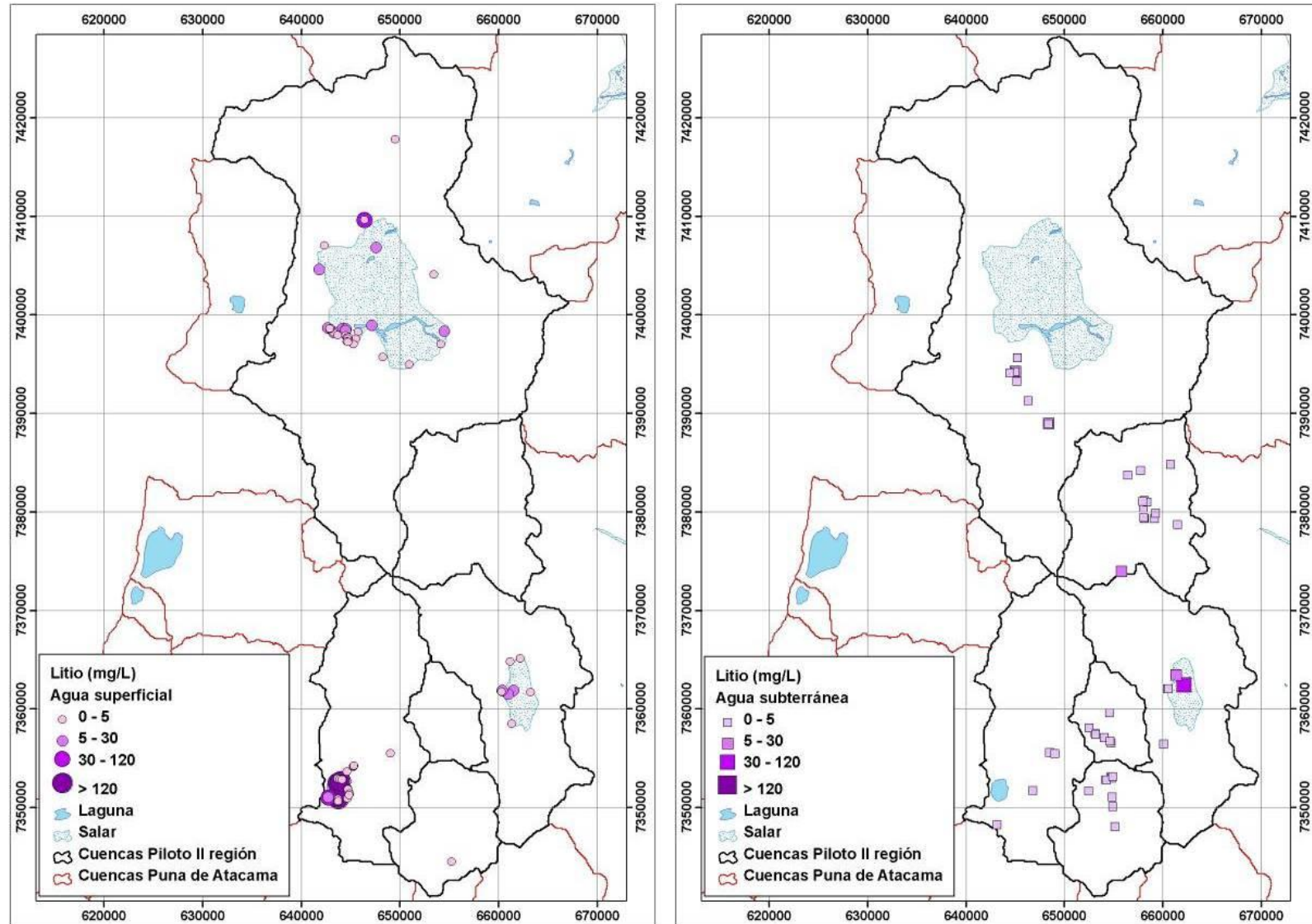


Figura 8.32 Concentraciones de litio superficial (izquierda) y subterráneo (derecha) en el sistema de cuencas piloto de la II Región de Chile

9 MARCO ISOTÓPICO

9.1 GENERALIDADES

Los isótopos son átomos variantes de un elemento químico, que tienen el mismo número atómico (numero de protones) pero tienen distinta masa atómica (difieren en el numero de neutrones de su núcleo); tienen origen natural o artificial. La utilidad de los isótopos ambientales en los estudios hidrogeológicos está asociada al fraccionamiento isotópico, una acción por la cual los distintos isótopos estables de un elemento se pueden separar unos de otros por una serie de procesos físico-químicos, térmicos o bio-geoquímicos. Cuando ellos reaccionan formando compuestos, las moléculas que resultan pueden ser distintas unas de otras debido a los isótopos particulares que ellas contienen.

El hidrógeno posee tres isótopos; ^1H , ^2H o D (deuterio), ^3H (tritio), de los cuales los dos primeros son estables mientras que el tritio es inestable, por lo que es útil en materias de datación. El oxígeno también posee tres isótopos; ^{16}O , ^{17}O , ^{18}O , todos de carácter estable. Los isótopos mayoritarios de estos dos elementos (H y O) son el ^1H y el ^{16}O , de manera que la especie molecular más abundante del agua es la que corresponde a la fórmula $^1\text{H}_2^{16}\text{O}$. Pero, además de esta especie molecular ligera, existen otras más pesadas, ya que la molécula del agua puede incorporar átomos de D, ^{17}O y ^{18}O .

En todos los procesos de evaporación y condensación del agua a lo largo del ciclo hidrológico, los isótopos de H se fraccionan en proporción a los isótopos de O. El isótopo pesado de D es un 100% más pesado que el ^1H . El ^{18}O es 12,5% veces más pesado que el ^{16}O . Su contenido depende de varios factores y procesos como la historia del agua, las condiciones de las precipitaciones, los factores geográficos (distancia al océano, altitud, latitud), los factores climáticos (temperatura, grado de condensación de la masa nubosa), los procesos de precipitación, evaporación, procesos geotermales, metamórfico y la actividad humana.

Los contenidos de los isótopos estables pesados, oxígeno 18 (^{18}O) y deuterio (^2H o D) son los más utilizados como trazadores del origen de las aguas subterráneas dado que sus contenidos se consideran conservativos una vez que el agua ha entrado en el acuífero, es decir, sus contenidos no se ven

afectados por las interacciones del agua con la matriz del acuífero. Las características conservadoras de los isótopos estables (^{18}O y ^2H o D) permiten deducir el origen del agua y, por consiguiente, la reconstrucción de su historia química.

9.2 PATRÓN DE REFERENCIA V-SMOW

La relación entre las concentraciones de los isótopos se expresa en por mil (0/00) o desviación en por mil (0/00) respecto a un patrón. El patrón de referencia original, el SMOW (Standard Mean Ocean Water), fue inicialmente preparado sólo para el hidrógeno. Pasado un tiempo este patrón se agotó por lo que ha sido sustituido por el V-SMOW (Vienna-Standard Mean Ocean Water) reproducido por el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), el cual representa el valor medio de dicha relación en el agua de mar.

Como los cambios debido al funcionamiento son muy pequeños, la abundancia de isótopos puede ser evaluada como una desviación positiva o negativa de las proporciones de isótopos con respecto a un estándar. Para una muestra de agua cualquiera, su desviación isotópica (δ) con respecto al V-SMOW viene dada por la expresión siguiente:

$$\delta = \frac{R_{(muestra)} - R_{(V-SMOW)}}{R_{(V-SMOW)}} \times 1000$$

El coeficiente δ se expresa en por mil (0/00) y representa la desviación desde el estándar. R es la proporción isotópica particular (por ej. $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) para la muestra y el estándar.

Si el valor de δ es positivo, esto implica que en la muestra hay mayor concentración del isótopo pesado correspondiente (D ó ^{18}O) que en el SMOW. Si el valor de δ es negativo, la muestra presentará una menor concentración del isótopo pesado correspondiente que el patrón.

Un valor de $\delta^{18}\text{O} = -20$, por ejemplo, significa que la muestra se ha empobrecido un 20/00 en ^{18}O con respecto al estándar.

9.3 RELACIÓN δD - $\delta^{18}O$ Y RECTA METEÓRICA LOCAL

Las cantidades de $\delta^{18}O$ y δD de cualquier muestra de agua de lluvia se relacionan por una línea llamada recta meteórica mundial, cuya ecuación es la siguiente:

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

Existen procesos que modifican los puntos de la línea, sobre todo la evaporación y la influencia geotermal, que hacen cambiar el contenido isotópico del agua, lo que da lugar a una nueva recta de distinta pendiente. A esta línea recta se le denomina Línea Mundial de las Aguas Meteóricas (LMAM) (Figura 9.1) y fue definida primeramente por Craig (1961). El término 10 se denomina exceso de 2H , y se usa frecuentemente como índice de evaporación del agua. Las precipitaciones generadas a partir de una nube formada por la evaporación del agua del mar se sitúan a lo largo de la LMAM.

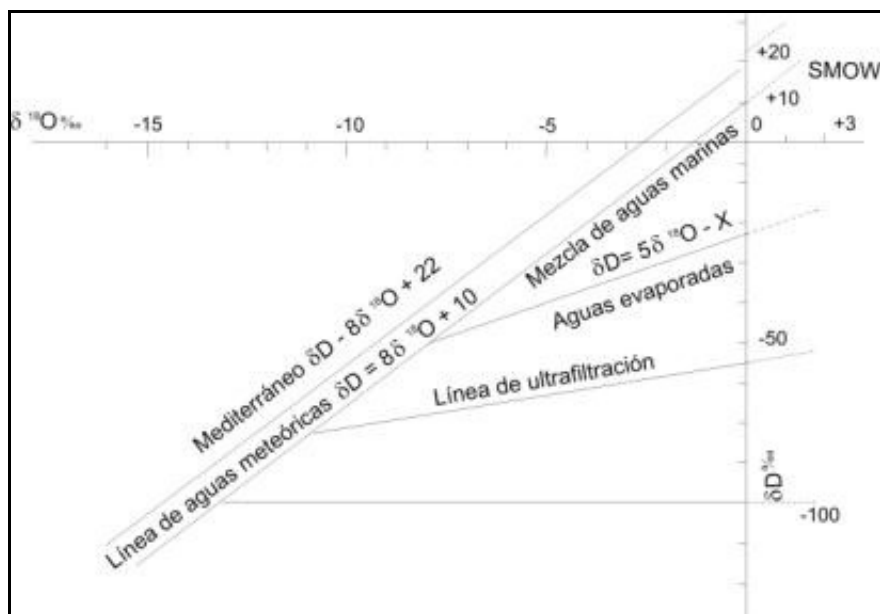


Figura 9.1 Línea Meteórica Mundial (Craig, 1961).

La mayor parte de las precipitaciones y aguas meteóricas de nuestro planeta tienen valores δ que se ajustan razonablemente a la LMAM y por esto las composiciones isotópicas de las aguas pueden compararse con las composiciones de la recta meteórica local o mundial, que se genera a partir de las composiciones de las precipitaciones.

A modo de explicación, las aguas que han experimentado evaporación tienen valores del exceso de ^2H más bajos de 10, situándose a la derecha y por debajo de la Línea Mundial de las Aguas Meteorológicas.

Uno de los factores más importantes que afecta la composición isotópica del agua es el llamado efecto altitud (latitud). Está relacionado con la temperatura atmosférica y hace que las precipitaciones que tienen lugar en cotas más altas presenten menores concentraciones de isótopos pesados, es decir, aguas isotópicamente más ligeras con valores de δ más negativos. Los gradientes de composición isotópica de las precipitaciones en función de la altitud varían de unos lugares a otros, pero los valores más frecuentes oscilan alrededor de $-0,25\text{‰}$ por 100 m de altitud para $\delta^{18}\text{O}$ y $-2,5\text{‰}$ por 100 m para δD .

9.4 ANÁLISIS ISOTÓPICO

Para la presentación y análisis de isótopos estables, se utilizan todas las muestras recopiladas en la base de datos que contengan valores de Deuterio (^2H) y Oxígeno-18 (^{18}O) (ANEXO G). Se recopilaron datos isotópicos para 110 muestras de aguas superficiales y subterráneas de la cuenca. La ubicación de los puntos de muestreo se observa en la Figura 8.6 y Figura 8.7.

Para el análisis de los datos se trabaja con la relación $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$, utilizando como referencia la recta meteórica mundial (MWL) de Craig (1961) y la recta meteórica sin exceso de Deuterio. Normalmente, la mayoría de las muestras debieran ubicarse entre la MWL y la MWL sin exceso de Deuterio.

Los resultados se grafican en la Figura 9.2 y se observa que existe una gran dispersión de los puntos, con muestras próximas a la línea meteórica, y otras alejadas. La mayoría de las muestras se ubican entre estas dos rectas, y las excepciones son para la mayoría de las muestras correspondientes a las cuencas Pampa Las Tepas y salar El Laco. Cabe destacar que los rangos que controlan a los valores de $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ son muy acotados, por lo que los puntos graficados se representan en una nube que no permite aproximar las tendencias de las muestras de las diferentes cuencas, con rectas características. Una figura adicional (Figura 9.3) permite una mejor visualización de los datos, mostrando mayor detalle de la zona que concentra las muestras.

La mayoría de los valores de $\delta^{18}\text{O}$ oscilan entre -9,5 y -11,2‰, y los de $\delta^2\text{H}$ se mantienen entre los -78 y -84‰.

En las muestras superficiales que corresponden a ríos, esteros y lagunas, es muy probable que producto de la evaporación, la tendencia sea a disminuir la relación $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$, observándose un cambio en la pendiente. Las muestras superficiales, identificadas con rombos en la Figura 9.3 en general siguen esta tendencia.

En el caso de los análisis de muestras de pozos y manantiales, estas debieran alinearse paralelamente a estas rectas, pues su recarga proviene de las precipitaciones que se han infiltrado, sin embargo esto no ocurre, y las aguas en general no se distribuyen paralelamente a la MWL. Una explicación podría ser por efecto de la evaporación del agua en la zona no saturada, y que pudiera ocurrir en las zonas de recarga. Por otra parte Aravena et al., (1999), y Clark y Fritz (1997) señalan que la sublimación de la nieve en zonas áridas genera un enriquecimiento isotópico similar.

Los datos indican la presencia de dos grupos de aguas: un grupo que exhibe un desplazamiento reducido respecto de la MWL, con empobrecimiento isotópico de $\delta^2\text{H} < -8$, y otro grupo que exhibe un empobrecimiento de $\delta^2\text{H}$ de hasta -7. El primer grupo se interpreta como aguas con una significativa recarga local y un reducido fraccionamiento debido a la evaporación. En contraste, el segundo grupo se alinea a lo largo de una recta que intercepta la MWL en un punto más empobrecido desde el punto de vista isotópico. Las aguas de este grupo se interpretan como recargadas a mayor altura que las del primer grupo.

La recarga local representada por las muestras del primer grupo se produce principalmente en los sectores centrales y de menor altura de las cuencas. Las muestras de este grupo representan a la mayoría de las muestras, se encuentran presentes en todas las cuencas, en general, en los pozos de las cuencas.

Las muestras subterráneas que corresponden a las cuencas Laguna Tuyajto, Salar El Laco, y en menor grado, Salar de Aguas Calientes 2, se alinean sub-paralelas a las rectas, siguiendo un comportamiento esperado.

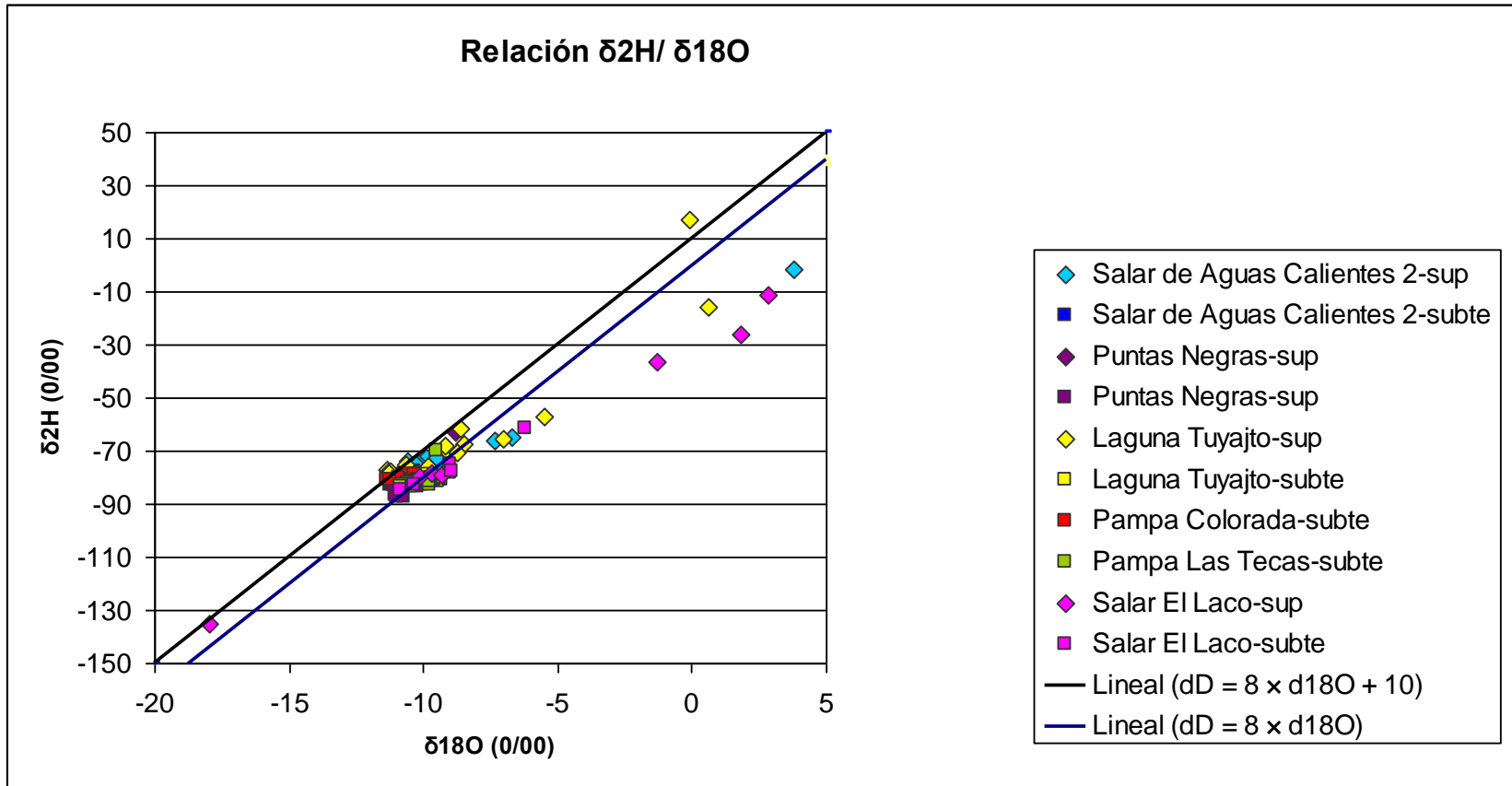


Figura 9.2 Relación $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$ en muestras hídricas de las cuencas piloto de la II Región de Chile

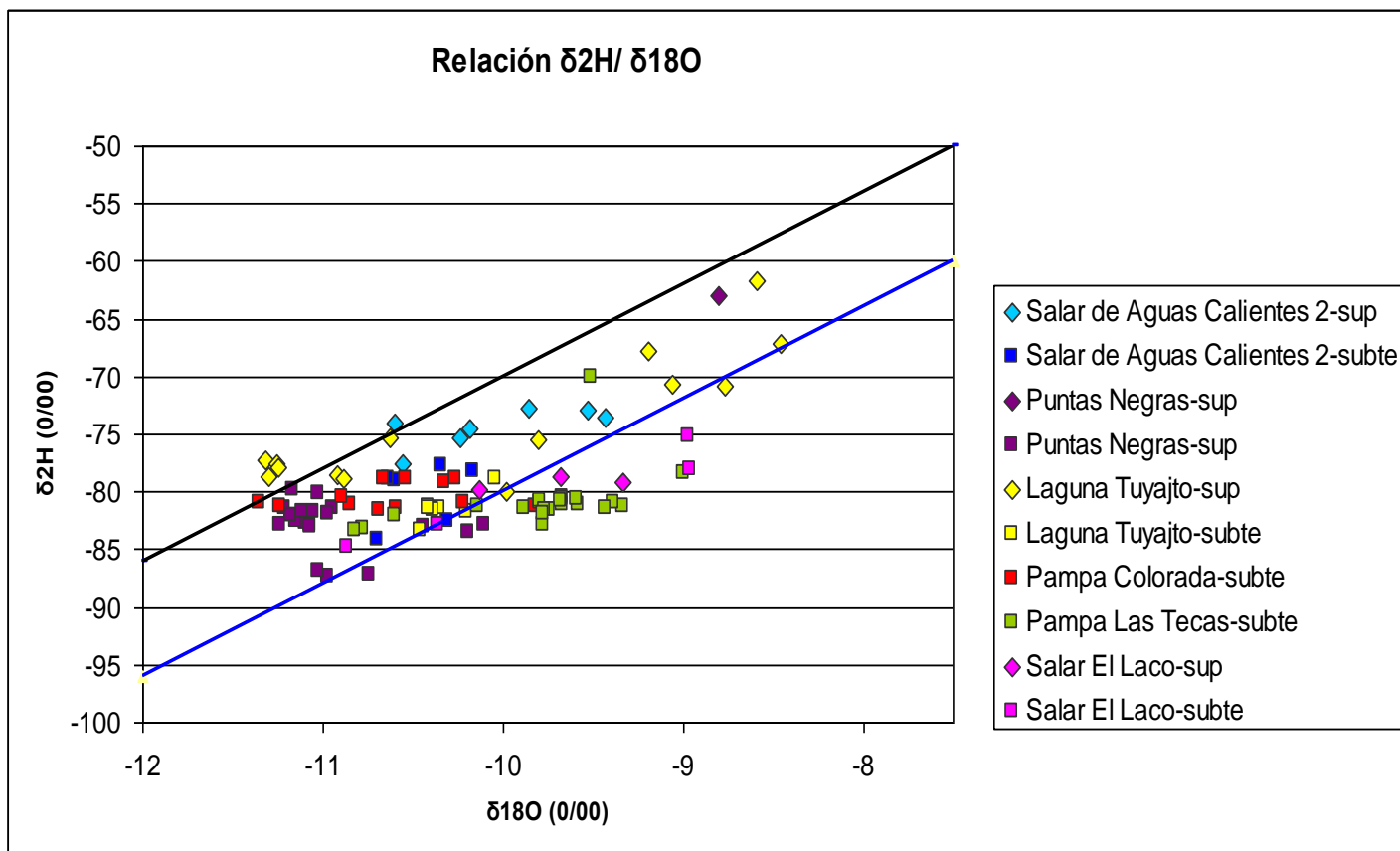


Figura 9.3 Relación para un rango acotado de $\delta^2\text{H}/\delta^{18}\text{O}$ en muestras hídricas de las cuencas piloto de la II Región de Chile

Los datos de las aguas subterráneas en general se encuentran desplazados de la línea de agua meteórica en la dirección de un enriquecimiento en ^{18}O . A valores constante de D, entre -85 y -82 ‰, las muestras subterráneas se enriquecen progresivamente en isótopos pesados de ^{18}O , partiendo con Puntas Negras, y continuando con Pampa Colorada, Salar de Aguas Calientes 2, Laguna Tuyajto, y finalmente, Las Tepas y El Laco.

Las muestras con composiciones todavía más pesadas que se alejan de la composición de la recarga enriqueciéndose en isótopos pesados de ^2H y ^{18}O corresponden a aguas de lagunas y vertientes que drenan aguas cuya circulación está más expuesta al fenómeno de la evaporación.

10 CONCLUSIÓN: FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DE CUENCAS PILOTO DE LA PUNA DE ATACAMA

El norte de Chile se caracteriza por presentar una sucesión de cuencas intra-volcánicas, que se forman al este de la Cordillera Occidental, donde se desarrolla el volcanismo de arco actual, caracterizado por un clima semi-árido. Los depósitos volcánicos de carácter efusivo, dan lugar a la morfología particular de esta zona, que consiste en un conjunto de pequeñas cuencas hidrológicas morfológicamente aisladas, que acumulan depósitos aluviales y/o salinos del Pleistoceno-Holoceno debido a la intensa aridez del área.

Se ha estudiado el funcionamiento hidráulico de las cuencas Salar de Aguas Calientes 2, Puntas Negras, Laguna Tuyajto, Pampa Colorada, Pampa Las Tepas y Salar El Laco, de la II Región de Chile. Los datos presentados podrán ser usados como línea base de la información disponible, y servirán para desarrollar un modelo hidrológico o hidrogeológico que sirva de prototipo para otras cuencas con similar configuración hidrogeológica, apuntando a un mejor uso de los recursos hídricos en la zona.

La recarga se produce por la infiltración de las precipitaciones, en mayor medida líquidas, y que provienen principalmente del fenómeno denominado invierno boliviano. Estas se infiltran o escurren dependiendo principalmente de las características geológicas y geomorfológicas del terreno, produciéndose la mayor recarga en las zonas de menor altitud de cada cuenca. Las descargas se producen en mayor proporción por evaporación desde lagunas, salares, napas someras y evapo-transpiración a partir de la vegetación que allí existe. El análisis isotópico indica que la infiltración de las aguas de recarga es un proceso que se ve afectado por la evaporación. Las

muestras superficiales que corresponden a ríos, esteros y lagunas si se ven mayormente afectadas por el fenómeno de la evaporación.

El modelo hidrogeológico conceptual generalizado definido para la región, se compone por sub-cuencas hidrográficas aisladas donde el acuífero principal está compuesto por ignimbrita fracturada. Las interconexiones del flujo de aguas subterráneas son restringidas por zonas de baja permeabilidad, ubicadas en los márgenes de las cuencas, y horizontes permeables de potencia menor, ubicados en profundidad en el contacto entre las diferentes unidades volcánicas.

Las zonas acuíferas existentes en estos terrenos están limitadas a la porosidad primaria de las rocas volcánicas, la porosidad secundaria asociada principalmente a procesos de fracturamiento que se han desarrollado en este tipo de formaciones, y las zonas erosionadas y meteorizadas encontradas en profundidad. El agua subterránea puede interceptar la superficie en las áreas de los salares y lagunas.

Se han definido 4 unidades acuíferas en base a las permeabilidades asociadas a cada unidad geológica reconocida en el sistema de cuencas piloto.

Permeabilidad Baja ($K = 10^{-9} - 10^{-5}$ m/d): Lavas y pórfidos ubicados en los márgenes de las cuencas, que permiten cierto grado de infiltración de la recarga en superficie, pero que a la vez restringen parcialmente el flujo de agua subterránea entre las cuencas hidrográficas.

Permeabilidad Media – Baja ($K = 10^{-4} - 10^{-3}$ m/d): Ignimbritas con un bajo grado de fracturamiento.

Permeabilidad Media – Alta ($K = 10^{-2} - 10^{-1}$ m/d): Unidad acuífera principal compuesta por las ignimbritas que presentan un alto grado de fracturamiento.

Permeabilidad Alta ($K = 10^{-1} - 10$ m/d): Depósitos sedimentarios profundos, y en las áreas cercanas a los salares y lagunas salinas.

Los antecedentes litológicos y geofísicos indican que los acuíferos locales tienen al menos 400 m de espesor en el sector norte, y al menos 350 m de espesor en el sector sur.

La uniformidad química en los tipos de agua de las diferentes cuencas sugiere que no existen sistemas de flujo complejos con diferentes tipos de agua y que los acuíferos son en general homogéneos y continuos.

La química de las aguas subterráneas de las cuencas Puntas Negras y Pampa Las Tepas presentan bajas concentraciones en elementos químicos mayoritarios, indicando que estas cuencas son de recarga activa proveniente de precipitaciones. Por otra parte, estas cuencas y la cuenca Pampa Colorada no presentan indicios de aguas superficiales ni salares. Esto indica que la recarga proviene principalmente de estas cuencas, y que su descarga puede involucrar mecanismos de flujo de aguas subterráneas hacia las cuencas vecinas.

La composición marcadamente clorurada-sódica a sulfatada-cálcica, y las altas concentraciones de elementos mayoritarios de las aguas subterráneas ubicadas hacia el margen este de la cuenca Laguna Tuyajto, insinúan una conexión entre esta cuenca y sus vecinas, Pampa Colorada y Pampa Las Tepas.

Las evidencias que se exponen a continuación indican la existencia de continuidad hidráulica y flujo de aguas subterráneas: desde Puntas Negras a Salar de Aguas Calientes 2; desde Pampa Colorada a Pampa Las Tepas y Laguna Tuyajto; y desde Pampa Las Tepas a Laguna Tuyajto.

Las grandes diferencias piezométricas entre las cuencas piloto: Salar de Aguas Calientes 2 4.200 m s.n.m., Pampa Puntas Negras 4.321 m s.n.m., Laguna Tuyajto 4.032 m s.n.m., Pampa Colorada 4.195 m s.n.m., Pampa Las Tepas 4.100 m s.n.m., y Salar El Laco 4.235 m s.n.m., indican que se produce un flujo limitado entre las cuencas a través de zonas de menor permeabilidad y/o a través de zonas discretas de mayor permeabilidad.

El flujo entre las cuencas se produce de manera subterránea a través de depresiones o portezuelos ubicados en los márgenes de las cuencas en los cuales generalmente hay un contacto entre diferentes unidades geológicas, y

donde se puede generar una zona de mayor permeabilidad en comparación con las zonas más elevadas de los márgenes de las cuencas.

Existen variaciones verticales en las concentraciones químicas de las aguas, y se reconoce un aumento en la concentración y la temperatura, con el aumento de la profundidad de muestreo, corroborando lo detectado en la interpretación de los datos geofísicos. El estrato superior responde a flujos locales, de carácter superficial, e influenciados por las recargas estacionarias, puntuales y superficiales. La alta salinidad de las aguas profundas responde a flujos regionales, influenciados por mayores trayectos recorridos y producto de la mineralización de las aguas durante una circulación lenta por el acuífero, que ayudada por la anomalía termal de ciertas cuencas en particular, acelera la disolución de las especies minerales.

Esto ha condicionado los límites de las cuencas hidrogeológicas, las que presentan un desarrollo más amplio que el de las cuencas hidrográficas estudiadas. Se produce un flujo regional subterráneo más profundo entre las cuencas desde las zonas de mayor altura hacia las zonas de aguas a menor altura, dentro de una misma área o incluso hacia cuencas más distantes ubicadas al este y al oeste. Los altos flujos de calor son probablemente la fuerza motriz que mueve las aguas profundas en esta región del arco magmático.

La ausencia de un salar en la cuenca Laguna Tuyajto y el reducido tamaño de la laguna en comparación con el tamaño de la cuenca sugiere la existencia de flujos hacia el oeste.

La cuenca El Laco forma un tercer sistema hidrogeológico separado y semi aislado. Podrían producirse flujos salinos potenciales desde El Laco hacia Pampa Colorada impulsados por los gradientes de densidad.

El modelo conceptual que aquí se presenta puede ser replicado para las cuencas de la Puna de Atacama de la II Región de Chile, aunque podrían haber variaciones mayores en la química de las aguas, lo que debe ser revisado y analizado para cada caso particular.

REFERENCIAS

Aceituno, P., 1996. Elementos del clima en el altiplano sudamericano. *Revista Geofísica*, 44, 37-55.

Allmendinger, W., Jordan, T., Kay, S., Isacks, B., 1997. The evolution of the Altiplano-Puna plateau of the Central Andes. *Annual Review Earth Planet Science*, 25, 139 – 174.

Angermann, D., Klotz, J., Reigber, C., 1999. Space-geodetic estimation of the Nazca- South America euler vector. *Earth and Planetary Science Letters*, 171, 329-334.

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.

Bailey, J., Self, S., Wooller, L., Mougini-Mark, P., 2007. Discrimination of fluvial and eolian features on large ignimbrite sheets around La Pacana Caldera, Chile, using Landsat and SRTM-derived DEM. *Remote Sensing of Environment*. 108, 24-41.

Benoit, I., 1989. Libro Rojo de la Flora Terrestre de Chile. CONAF, Santiago, 157 pp., 1 mapa.

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

Brasse, H., Lezaeta, P., Rath, V., Schwalenberg, K., Soyer, W., Haak, V., 2002. The Bolivian Altiplano conductivity anomaly. *Journal of Geophysical Research*, 107, 10.1029/2001JB000391.

Cahill, T. y Isacks, B.L., 1992. Seismicity and shape of the subducted Nazca plate. *Journal of Geophysical Research*, 97, 17.503–17.529.

Cepeda, A., 1978. Prospección geoquímica de las áreas Salar de Aguas Calientes y Cerro Coquena: prospección y evaluación de elementos polimetálicos, Alta Cordillera, II Región. Instituto de Investigación Geológica, 24 pp., Santiago.

Charrier, R., Pinto, L., Rodríguez, M.P., 2007. Tectonostratigraphic evolution of the Andean Orogen in Chile. En: Moreno, T. y Gibbons, W. (Eds), *The Geology of Chile*. Geological Society of London, 2007, pp.21-114.

Clark, I., y Fritz, P., 1997. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Lewis Publishers, 328 pp.

Coberturas digitales SIG (Sistema de Información Geográfica), 2007. Dirección General de Aguas, Santiago, Chile.

Coira, B., Davidson, C., Mpodozis, C., Ramos, V., 1982. Tectonic and magmatic evolution of the Andes of northern Argentina and Chile. *Earth-Science Reviews*, Special Issue, 18, 303–332.

Coira, B., Kay, S., Viramonte, J., 1993. Upper Cenozoic magmatic evolution of the Argentine Puna - A model for changing subduction geometry. *International Geological Review*, 35, 677–720.

Coira, B., Caffè, P.J., Kay, S.M., Diaz, A., Ramirez, A., 1996. The Vilama volcanic complex—an upper Cenozoic caldera system in the Puna, Jujuy. *Actas del Congreso Geológico Argentino*, 13, 3, 603–620.

Comte, D., Pardo, M., 1991. Reappraisal of great historical earthquakes in the northern Chile and southern Peru seismic gaps. *Natural Hazards*, 4, 23–44.

Craig, H., 1961. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, 133, 1702.

Das, D. K., Jarratt, D., McDonald, D., Heberlein, D., 1998. Environmental baseline data collection at Diablillos property, Salta, Argentina. Rescan Environmental Services and Barrick Exploraciones Argentina S.A., 15 pp.

de Silva, S.L., Self, S., Gardeweg, M., Ramírez, C.F., Francis, P.W., 1988. New observations on La Pacana caldera complex, N. Chile. *EOS, Transactions of the American Geophysical Union* 69(44), 14–88.

de Silva, S.L., Francis, P.W., 1989. Correlation of large volume ignimbrites — two case studies from the Central Andes of northern Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 37(2), 133–149.

de Silva, S.L., 1989a. Altiplano–Puna volcanic complex of the central Andes. *Geology*, 17(1/2), 1.102–1.106.

de Silva, S.L., 1989b. Geochronology and stratigraphy of the ignimbrites from the 21°30'S to 23°30'S portion of the central Andes of northern Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 37(2), 93–131.

Delouis, B., Cisternas, A., Dorbath, L., Rivera, L., Kausel, E., 1996. The Andean subduction zone between 22° and 25°S (northern Chile): precise geometry and state of stress. *Tectonophysics*, 259(1-3), 81-100.

Dirección General de Aguas, 1986. Balance Hidrológico Nacional: II Región. Departamento de Hidrología, Chile.

Dirección General de Aguas, 2012. Evaluación de los Recursos Hídricos Subterráneos del Acuífero del Salar de Atacama. Departamento de Administración de Recursos Hídricos.

Exploraciones, Inversiones y Asesorías Mundo SA (EMSA), 2007. Disponibilidad de Recursos Subterráneos en el Sistema Tuyajto, II Región de Antofagasta. Preparado por Geo-Aguas Consultores para EMSA, Santiago, Chile.

Francis, P., Baker, M., 1978. Sources of two large ignimbrites in the Central Andes, some Landsat evidence. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 4(1-2), 81-87.

Francis, P.W., Sparks, S.J., Hawkesworth, C.J., Thorpe, R.S., Pyle, D.M., Tait, S.R., Montovani, M.S., McDermott, F., 1989. Petrology and geochemistry of volcanic rocks of the Cerro Galan caldera, northwestern Argentina. *Geological Magazine*, 126, 515-547.

Gajardo, R., 1993. *La Vegetación Natural de Chile: Clasificación y Distribución Geográfica*. Ed. Universitaria, 165 pp.

García, F., Torrico, D., Valdivia H., 1960. Reconocimiento geológico en la Alta Cordillera de la provincia de Antofagasta entre el Salar de Incaguasi y Cerro Zapaleri. Empresa Nacional del Petróleo, Iquique, Chile.

García, F., Perez, E., Zeballos, E., 1962. El Ordovícico de Aguada de la Perdiz. *Minerales*, 17(77), 52-61.

Gardeweg, M., Ramírez, C.F., 1985. Hoja Río Zapaleri, II Región de Antofagasta. Carta Geológica de Chile N°66, Servicio Nacional de Geología y Minería, Chile.

Gardeweg, M., Ramírez, C.F., 1987. The La Pacana caldera and the Atana ignimbrite—a major ash-flow and resurgent caldera complex in the Andes of northern Chile. *Bulletin of Volcanology* 49, 547–566.

Gaupp, R., Kött, A., Wörner, G., 1999. Palaeoclimatic implications of Mio-Pliocene sedimentation in the high-latitude intra-arc Lauca basin of northern Chile. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 151, 79–100.

Gephart, J.W., 1994. Topography and subduction geometry in the Central Andes: Clues to the mechanics of a non-collisional orogen. *Journal of Geophysical Research*, 99(B6), 12279–88.

Graeber, F., Asch, G., 1999. Three-dimensional models of P wave velocity and P-to S velocity ratio in the southern central Andes by simultaneous inversion of local earthquake data. *Journal of Geophysical Research* 104, 20.237–20.256.

Gregory-Wodzicki, K.M., 2000. Uplift history of the Central and Northern Andes: a review. *Geological Society of America Bulletin* 112, 1.091–1.105.

Gutscher, M.A., Spakman, W., Bijwaard, H., Engdahl, E.R., 2000. Geodynamics of flat subduction: seismicity and tomographic constraints from the Andean margin. *Tectonics* 19, 814–833.

Hartley, A.J. y Chong, G., 2002. Late Pliocene age for the Atacama Desert: implications for the desertification of western South America. *Geology*, 30(1), 43–46.

Hervé, F., Faundez, V., Calderón M., Massone H.J., Willner, A., 2007. Metamorphic and plutonic basement complexes. En: Moreno, T. y Gibbons, W. (Eds), *The Geology of Chile*. Geological Society of London, 2007, pp.5-20.

Imágenes Satelitales Landsat ETM+, 1999, NASA.

Isacks, B. L., 1988. Uplift of the central Andean plateau and bending of the Bolivian Orocline. *Journal of Geophysical Research*, 93, 3.211 – 3.231.

Jordan, T., Isacks, B., Allmendinger, R., Brewer, J., Ramos V., Ando C., 1983. Andean tectonics related to geometry of the subducted Nazca plate. *Geological Society American Bulletin*, 94, 341-361.

Kampf, S., 1999. El clima del altiplano y los recursos de agua subterránea en el Norte Grande de Chile: una visión comprensiva. Dirección General de Aguas, Chile.

Kasemann, S., Erzinger, J. and Franz, G., 2000. Boron recycling in the continental crust of the central Andes from the Paleozoic to Mesozoic, NW Argentina. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 140, 328-343.

Kay, R.W., Kay, S.M., 1993. Delamination and delamination magmatism. *Tectonophysics*, 219,177–89.

Kay, S.M., Coira, B., Viramonte, J., 1994a. Young mafic back-arc volcanic rocks as indicators of continental lithospheric delamination beneath the Argentine Puna plateau, Central Andes. *Journal of Geophysical Research*, 99(B12), 24323– 39.

Kay, S., Coira, B., Mpodozis, C., 1995. Neogene magmatic evolution and the shape of the subducting oceanic slab beneath the Central Andean arc. UGG 21st General Assembly, p. A440.

Kay, S.M., Mpodozis, C., Coira, B., 1999. Magmatism, tectonism, and mineral deposits of the Central Andes (22°–33°S latitude. En: Skinner, B. (Ed.), *Geology and Ore Deposits of the Central Andes*. Society of Economic Geology Special Publication, 7, 27–59.

Kley, J., 1999. Geologic and geometric constraints on a kinematic model of the bolivian orocline. *Journal of South American Earth Sciences*, 12, 221–235.

Kull, C. y Grosjean, M., 1998. Albedo changes, Milankovitch forcing, and late Quaternary climate changes in the central Andes. *Climate Dynamics*, 14, 871–881.

Lahsen A., 1982. Upper Cenozoic volcanism and tectonism in the Andes of northern Chile. *Earth Science Reviews*, 18, 285 – 302.

Latorre, C., Betancourt, J. L., Rylander, K. A., Quade, J., Matthei, O., 2003. A vegetation history from the arid prepuna of northern Chile (22–23°S) over the last 13,500 years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 194, 223–246.

Lindsay, J. M., 1999. Stratigraphy, age relations and magmatic evolution of large-volume felsic ignimbrites of the La Pacana Caldera, Central Andes, Chile. Scientific technical report STR99/16 Potsdam: Geoforschungszentrum Potsdam 141 pp.

Lindsay, J.M., de Silva, S., Trumbull, R., Emmermann, R., Wemmer, K., 2001a. La Pacana caldera, N. Chile: a re-evaluation of the stratigraphy and volcanology of one of the world's largest resurgent calderas. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 106, 145–173.

Lindsay, J.M., Schmitt, A.K., Trumbull, R.B., de Silva, S.L., Siebel, W., Emmermann, R., 2001b. Magmatic evolution of the La Pacana Caldera

system, Central Andes, Chile: compositional variation of two cogenetic, large-volume felsic ignimbrites and implications for contrasting eruption mechanisms. *Journal of Petrology* 42, 459–486.

Mapa Geológico de Chile, 1:1.000.000: versión digital, 2003. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Digital, No. 4 (CD-ROM, versión 1.0), Santiago, Chile.

Marinovic, N., Díaz, F., Ramírez, C.F., Travisani, V., 1976. Prospección y Evaluación de Elementos Polimetálicos en la Alta Cordillera de la II Región. Etapa I. Reconocimiento Geológico Escala 1 : 250.000. Instituto de Investigación Geológica, Chile.

Marrett, R.A., Allmendinger, R.W., Alonso, R.N., Drake, R.E., 1994. Late Cenozoic tectonic evolution of the Puna Plateau and adjacent foreland, northwestern Argentine Andes. *Journal of South American Earth Sciences* 7, 179–207.

Mason, B. G., Pyle, D. M., Oppenheimer, C., 2004. The size and frequency of the largest explosive eruptions on Earth. *Bulletin of Volcanology*, 66, 735–749.

Matteini, M., Mazzuoli, R., Omarini, R., Cas, R., Maas, R., 2002. The geochemical variations of the upper Cenozoic volcanism along the Calama–Olacapato–El Toro transversal fault system in the central Andes (24°S): petrogenetic and geodynamic implications. *Tectonophysics*, 345, 211–227.

Matteini, M., Mazzuoli, R., Omarini, R., Cas, R., Maas, R., 2002. Geodynamical evolution of the Central Andes at 24°S as inferred by magma composition along the Calama–Olacapato–El Toro transversal volcanic belt. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 118, 205–228.

Minera Escondida Limitada, 2007. Estudio de Impacto Ambiental: Suministro de Agua Pampa Colorada. Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, Chile.

Modelos de Elevación Digital, (DEM), (<http://seamless.usgs.gov>).

Muñoz, N., y Charrier, R., 1996. Uplift of the western border of the Altiplano on a westvergent thrust system, northern Chile. *Journal of South American Earth Sciences*, 9, 171 – 181.

Oncken O., Hindle D., Kley J., Elger K., Victor P., Schemmann K., 2006. Deformation of the Central Andean upper plate system – facts, fiction and constraints for plateau models. *The Andes Book*, 1, 1-28.

Ort, M.H., 1993. Eruptive processes and caldera formation in a nested downsag-collapse caldera: Cerro Panizos, Central Andes mountains. *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 56, 221–252.

Ort, M., Coira, B.L., Mazzoni, M.M., 1996. Generation of a crust-mantle magma mixture: magma sources and contamination at Cerro Panizos, central Andes. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 123, 308–322.

Petrinovic, I.A., 1999. La caldera de colapso del cerro Aguas Calientes, Salta, Argentina, evolución y esquema estructural. En: Colombo, F., Queralt, I., Petrinovic, I.A. (Eds.), *Geología de los Andes centrales meridionales: El Noroeste Argentino*. *Acta Geológica Hispánica*, 34 (2–3), 243–253.

Ramírez, C.F., Gardeweg, M., 1982. Hoja Toconao, II Región de Antofagasta. *Carta Geológica de Chile N°54*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Chile.

Rech, J. A., Quade, J., Betancourt, J. L., 2002. Late Quaternary paleohydrology of the central Atacama Desert (lat 228–248S), Chile. *Geological Society of America Bulletin*, 114, 334–348.

Reutter, K.J., Giese, P., Götze, H.J., Scheuber, E., Schwab, K., Schwarz, G. y Wigger, P., 1988. Structure and crustal development of the central Andes between 21° and 25° S. En: *The Southern Andes*. Bahlburg, H., Breitzkreuz, C., Giese, P., (Eds.), Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, pp. 231-261.

Riller, U., Oncken, O., 2003. Growth of the Central Andean Plateau by tectonic segmentation is controlled by the gradient in crustal shortening. *Journal of Geology*, 111, 367–384.

Risacher, F., Alonso, H., Salazar, C., 1999. Volumen I: Síntesis. *Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II, III Regiones, Chile*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, S.I.T. N° 51, Santiago, Chile. 89 pp.

Risacher, F., Alonso, H., y Salazar, C., 2002. Hydrochemistry of two adjacent acid saline lakes in the Andes of northern Chile. *Chemical Geology*, 187, 39-57

Risacher, F., Alonso, H., Salazar, C., 2003. The origin of brines and salts in Chilean salars: a hydrochemical review. *Earth-Science Reviews*, 63, 249-293.

Scheuber, E., Reutter, K.J., 1992. Magmatic arc tectonics in the Central Andes between 21° - 25° S. *Tectonophysics*, 205, 127-140.

Schilling, F.R., Trumbull, R.B., Brasse, H., Haberland, C., Asch, G., Bruhn, D., Haak, V., Giese, P., Mai, K., Munoz, M., Ramelow, J., Rietbrock, A., Ricaldi, E., Vietor, T., 2006. Partial melting in the central andean crust: a review of geophysical, petrophysical, and petrologic evidence. En: Oncken, O., Chong, G., Franz, G., Giese, P., Götze, H.-J., Ramos, V.A., Strecker, M.R., Wigger, P. (Eds.), *The Andes — Active Subduction Orogeny*. *Frontiers in Earth Science Series*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, pp. 460–474.

Schmitt, A.K., de Silva, S.L., Trumbull, R.B., Emmermann, R., 2001. Magma evolution in the Purico ignimbrite complex, northern Chile: evidence for zoning of a dacitic magma by injection of rhyolitic melts following mafic recharge. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 140, 680–700.

Schmitt, A., Lindsay J., de Silva S., Trumbull R., 2002. U-Pb Zircon chronostratigraphy of early Pliocene ignimbrites from La Pacana, north Chile: implications for the formation of stratified magma chambers. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 120, 43-53.

Schnurr, W.B.W., Trumbull, R.B., Clavero, J., Hahne, K., Siebel, W., Gardeweg, M., 2007. Twenty-five million years of silicic volcanism in the southern central volcanic zone of the Andes: geochemistry and magma genesis of ignimbrites from 25° to 27°S, 67° to 72° W. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 166, 17–46.

Seggiaro, R., 1994. *Petrología, geoquímica y mecanismos de erupción del Complejo Volcánico Coranzulí*. PhD Thesis, Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Nacional de Salta. 137 pp.

Seggiaro, R.E., Hongn, F.D., 1999. Tectonic influence on the Cenozoic volcanism in NW Argentina. *Acta Geologica Hispanica* 34, 227–242 (en Español).

Schnurr W.B.W., Trumbull R.B, Clavero J., Hahne K., Siebel W., Gardeweg M., 2007. Twenty-five million years of silicic volcanism in the southern central volcanic zone of the Andes: Geochemistry and magma genesis of ignimbrites from 25 to 27 °S, 67 to 72 °W, *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 166, 17-46.

Smith R.L. y Bailey R.A., 1968. Resurgent cauldrons. *Geological Society of America, Memoir* 116, 613-622.

Soler, M.M., Caffè, P.J., Coira, B.L., Onoe, A.T., Kay, S.M., 2007. Geology of the Vilama caldera: a new interpretation of a large scale explosive event in the Central Andean plateau during the Upper Miocene. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 164, 27–53.

Somoza, R., 1998. Updated Nazca (Farallon) – South America relative motions during the last 40 My: implications for mountain building in the central Andean region. *Journal of South American Earth Sciences*, 11, 211–215.

Sparks, R.S.J., Self, S., Walker, G.P.L., 1973. Products of ignimbrite eruptions. *Geology*, 1, 115–118.

Trumbull, R.B., Riller, U., Oncken, O., Scheuber, E., Munier, K., Hongn, F., 2006. The time–space distribution of Cenozoic arc volcanism in the Central Andes: a new data compilation and some tectonic considerations. En: Oncken, O., Chong, G., Franz, G., Giese, P., Götze, H.J., Ramos, V.A., Strecker, M.R., Wigger, P., (Eds.), *The Andes – Active Subduction Orogeny*. *Frontiers in Earth Science Series*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, pp. 29–43.

Udvardy, M., 1975. A classification of the biogeographical provinces of the world. *IUCN Occasional Paper*, N°18.

Villagrán, C., Kalin-Arroyo, M., Marticorena, C., 1983. Efectos de la desertización en la distribución de la flora andina de Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*, 56, 137-157.

von Huene, R., Weinrebe, W., Heeren, F., 1999. Subduction erosion along the north Chile margin. *Journal of Geodynamics*, 27, 345–358.

von Huene, R. y Ranero, C.R., 2003. Subduction erosion and basal friction along the sediment-starved convergent margin off Antofagasta, Chile. *Journal of Geophysical Research*, 108(B2), 2079.

Whitman, D., Isacks, B.L., Chalelain, J.L., Chiu, J.M., Perez, A., 1992. Attenuation of high-frequency seismic waves beneath the Central Andean Plateau. *Journal of Geophysical Research* 97, 19.929–19.947.

Whitney, M. I., 1978. The role of vorticity in developing lineation by wind erosion. *Geological Society of America Bulletin*, 89, 1–18.

Williams, H., 1941. Calderas and their origin. *Bulletin of Department of Geological Science, University of California*, 25, 239–346.

Yuan, X., Sobolev, S.V., Kind, R., 2002. Moho topography in the central Andes and its geodynamic implication. *Earth and Planetary Science Letters* 199, 389–402.

Zandt, G., Leidig, M., Chmielowski, J., Baumont, D., Yuan, X., 2003. Seismic detection and characterization of the Altiplano–Puna magma body, Central Andes. *Pure and Applied Geophysics* 160, 789–807.

ANEXO A

POZO	DESDE (M)	HASTA (M)	ESPESOR (M)	LITOLOGIA
LA-0	0	9	9	Relleno aluvial. Gravas y arenas limosas de color pardo amarillento
LA-0	9	24	15	Toba cristalina gris blanquecina
LA-0	24	28	4	Toba litocristalina de color gris rosada
LA-0	28	66	38	Toba litocristalina de color pardo grisáceo
LA-0	66	104.5	38.5	Arenas medias color pardo anaranjado con bastante cuarzo
LA-1	0	8	8	Gravas, arenas gruesas con algo de arenas finas y limo. Color pardo claro
LA-1	8	13	5	Toba cristalina color gris oscuro. En los metros finales se torna más rojiza
LA-1	13	27	14	Toba de cenizas color gris claro, con sectores anaranjados y rosados
LA-1	27	64	37	Toba cristalina, principalmente cuarzo, color pardo rosado
LA-1	64	88	24	Gravas, arenas gruesas, medias con algo de limo. Color pardo rosado
LA-1	88	95	7	Arenas gruesas, gravillas, arena media. Color pardo rosado
LA-1	95	101	6	Gravillas, arenas gruesas y medianas de color gris claro
LA-1	101	113	12	Arenas finas limosas, con clastos provenientes de una toba pardo rosado
LA-1	113	129	16	Arenas medias con una matriz de arenas finas y limo color gris claro
LA-1	129	147	18	Arenas gruesas, medias y finas con algo de gravillas
LA-1	147	202	55	Arenas gruesa, gravillas, medias y algo de arena fina y limo, color pardo claro
LA-2	0	11	11	Relleno aluvial. Gravas y arenas limosas de color pardo amarillento
LA-2	11	23	12	Toba cristalina gris blanquecina
LA-2	23	53	30	Toba de cristales gris oscura, matriz sacaroidal
LA-2	53	80	27	Toba de cristales color gris rosado suave, matriz sacaroidal
LA-2	80	90	10	Arenas medias color pardo anaranjado con bastante cuarzo
LA-2	90	110	20	Toba cristalolítica con fragmentos anaranjados y otros negros
LA-2	110	202	92	Arenas medias a gruesas
LA-3	0	45	45	Relleno aluvial. Gravas, gravillas, arenas gruesas y medias con algo de arenas finas y limo, color pardo grisáceo oscuro
LA-3	45	59	14	Toba litocristalina color rojizo
LA-3	59	79	20	Bloques de toba riolítica color rosado
LA-3	79	96	17	Lava riolítica porfírica de color marrón
LA-3	96	122	26	Toba cristalina riolítica color gris claro
LA-3	122	123	1	Lava riolítica color marrón
LA-3	123	181	58	Toba color gris morada oscura
LA-3	181	189	8	Toba color gris
LA-3	189	200	11	Lava color pardo
LAAR-1	0	4	4	Gravas oligomíticas con clastos subangulares a angulares de composición volcánica insertos en una matriz de arena gruesa y algo de limo
LAAR-1	4	20	16	Toba andesítica con cristales de plagioclasa y anfíbol
LAAR-1	20	26	6	Toba andesítica con cristales de plagioclasa y anfíbol
LAAR-1	26	36	10	Toba andesítica con cristales de plagioclasa y anfíbol
LAAR-1	36	48	12	Toba andesítica con cristales de plagioclasa y anfíbol
LAAR-1	48	94	46	Toba andesítica con cristales de plagioclasa y anfíbol

LAAR-1	94	100	6	Nivel de arenas
LAAR-1	100	174	74	Tobas dacíticas y andesíticas con una transición composicional gradual. Cristales de plagioclasa, cuarzo, biotitas oxidadas y líticos lavicos de manera subordinada
LAAR-1	174	210	36	Tobas dacíticas y andesíticas con una transición composicional gradual. Cristales de plagioclasa, cuarzo, biotitas oxidadas y líticos lavicos de manera subordinada
LAAR-1	210	219	9	Tobas dacíticas y andesíticas con una transición composicional gradual. Cristales de plagioclasa, cuarzo, biotitas oxidadas y líticos lavicos de manera subordinada
LAAR-1	219	220	1	Arenas medias a finas compuestas de cristales de cuarzo redondados y evidencias de meteorización (óxidos de Fe)
LAAR-1	220	230	10	Toba riódacítica con abundantes ojos de cuarzo y biotitas oxidadas de tamaño medio, con matriz cinerítica
LAAR-2	0	31	31	Toba dacítica con ojos de cuarzo y biotitas finas con matriz cinerítica de color gris parduzco en tono claro
LAAR-2	31	32	1	Arenas medias a finas compuestas de cristales de cuarzo redondeados y evidencias de meteorización (óxidos de Fe)
LAAR-2	32	54	22	Toba riódacítica con abundantes ojos de cuarzo y biotitas oxidadas de tamaño medio, con una matriz cinerítica
LAAR-2	54	150	96	Toba riódacítica con abundantes ojos de cuarzo y biotitas oxidadas de tamaño medio, con una matriz cinerítica
LADC-2	0	17	17	Relleno aluvial
LADC-2	17	84	67	Toba cristalina de composición andesítica dacítica con cristales de cuarzo, mica biotita oxidada y Pg. De forma muy local FdK en pequeñas vetillas. Todos estos insertos en una matriz fina de ceniza que varía en tonalidades de gris claro a pardo oscuro. El p
LADC-2	84	230	146	Toba cristalina de composición riódacítica con abundante cuarzo transparente, mica biotita y de forma subordinada algunos líticos de composición volcánica andesítica. Todos insertos en una matriz cristalina más fina compuesta principalmente de FdK, Pg y Q
PN-1A	0	22	22	Gravas y arenas, matriz de arena fina y limo color pardo anaranjado
PN-1A	22	42	20	Toba cristalina (biotitas y cuarzo) de color gris rosada
PN-1A	42	63	21	Toba cristalina (cuarzo, feldespato, escasa biotita) color gris morado oscuro
PN-1A	63	84	21	Fragmentos de toba morada con gravas polimícticas (10 - 20%)
PN-1A	84	92	8	Toba cristalina (cuarzo, feldespato, escasa biotita) color gris morado oscuro
PN-1A	92	108	16	Toba cristalina (escaso cuarzo, óxidos de hierro, abundante biotita) de color rojizo
PN-1A	108	112	4	Arenas gruesas, medias y finas con limo de color anaranjado
PN-1A	112	120	8	Arenas gruesas, medias y finas con limo y arcilla de color anaranjado
PN-1A	120	130	10	Arenas gruesas y medias de color gris rojizo
PN-1A	130	148	18	Arena media, gruesa, gravilla y arena fina con limo de color gris oscuro
PN-1A	148	159	11	Arena gruesa, media, fina con limo y gravilla color gris claro
PN-1A	159	166	7	Arena gruesa, arena media, y gravilla de color gris
PN-1A	166	169	3	Arena gruesa, arena media, fina con limo y gravilla de color gris claro
PN-1A	169	170	1	Arena gruesa, media, y gravilla de color gris
PN-1A	170	187	17	Arena gruesa, media, y fina con limo y gravilla de color gris claro
PN-1A	187	200	13	Arenas gruesas, medias y gravilla de color gris
PN-2	0	7	7	Arena gruesa, arena media, gravillas, arena fina y limo de color pardo grisáceo amarillento
PN-2	7	9	2	Arena gruesa, arena media, arena fina a limo y gravilla de color pardo grisáceo amarillento
PN-2	9	12	3	Arena gruesa, arena media, arena fina y grava de color pardo grisáceo amarillento
PN-2	12	19	7	Arena gruesa a gravilla y arena media de color pardo grisáceo verdoso
PN-2	19	54	35	Toba cristalina (biotitas y cuarzo) de color gris rosada
PN-2	54	60	6	Toba cristalina (cuarzo, feldespato, escasa biotita) color gris morado oscuro
PN-2	60	66	6	Arena media, arena gruesa y arena fina de color pardo grisáceo

PN-2	66	85	19	Arena gruesa principalmente fragmentos de toba morada, arena media y arena fina color pardo morado
PN-2	85	145	60	Toba cristalina (cuarzo, feldespatos, escasa biotita) de color gris morado oscuro
PN-5	0	7	7	Arenas y gravas angulosas con matriz de arena fina y limo de color pardo anaranjado
PN-5	7	12	5	Gravas y gravillas, con matriz de limo y arena fina color pardo verdoso
PN-5	12	16	4	Arenas y gravas angulosas con matriz de arena fina y limo de color pardo anaranjado
PN-5	16	23	7	Toba gris violácea, con algunos líticos color pardo y anaranjados
PN-5	23	50	27	Toba gris morado oscuro, con escasos líticos de dacitas, riolitas y andesitas
PN-5	50	60	10	Fragmentos de toba morada con gravas polimícticas (10 - 20%), posible nivel sedimentario
PN-5	60	93	33	Toba gris morada oscura, escasos líticos de dacitas, riolitas y andesitas
PN-5	93	103	10	Toba cristalina color rojizo, con líticos negros (10%)
PN-5	103	105	2	Arena gruesa, con limo color anaranjado (10%)
PN-5	105	114	9	Arena gruesa y media, con limo color anaranjado (20%)
PN-5	114	123	9	Arena gruesa y medias color rojizo
PN-5	123	147	24	Arenas gruesas, medias, finas, gravillas y algo de limo, color gris oscuro
PN-5	147	162	15	Arenas gruesas, medias, finas con algo de limo, color gris claro
PN-5	162	184	22	Arena gruesa, media y gravillas de color gris
PN-5	184	194	10	Arenas y gravas de color gris rosado
PN-5	194	201	7	Arena gruesa, media y gravillas de color gris
PN-6	175	200	25	Arena cuarcífera de color gris claro a gris blanquecino.
PN-6	165	175	10	Arena gravosa de color gris rojizo, compuesta por fenoclastos de tobas grises y rojas, en matriz arenosa de cuarzo y material tobáceo
PN-6	134	165	31	Grava arenosa de color gris oscuro, compuesta por fenoclastos de tobas gris oscuro y rojizas, con presencia de algunas lavas negras portadoras de magnetita
PN-6	0	16	16	Relleno aluvial compuesto por gravillas y gravas de tobas, con redondez media y esfericidad baja, en matriz areno-limosa
PN-6	16	33	17	Fragmentos angulosos de toba riolítica con escasa presencia de micas oxidadas y en algunos sectores pátinas oxidadas
PN-6	33	114	81	Toba riolítica de color gris morado oscuro, con granos de cuarzo de aspecto sacaroide y algunas inclusiones de láminas de micas oxidadas. Entre los 110-114, grano más fino por mayor dureza
PN-6	114	126	12	Toba cristalina de color gris rojizo, con abundante presencia de cuarzo sacaroide. Algunos fenoclastos presentan pátinas de óxidos negros
PN-6	126	134	8	Toba cristalina rojiza, con presencia de granos de cuarzo de aspecto sacaroide a cristalino
PN-8	0	19	19	Arenas y gravas en una matriz de arena fina y limo de color pardo anaranjado
PN-8	19	54	35	Toba cristalina de color gris violáceo, con algunos líticos de color pardo anaranjados (5%)
PN-8	54	151	97	Toba cristalina color gris morada oscura
PN-8	151	160	9	Toba cristalina (cuarzo, feldespatos y biotitas) de color rojizo
PN-8	160	173	13	Arena gruesa, media, gravillas y gravas, con algo de limo, color gris rosado
PN-8	173	176	3	Arena gruesa, media, gravillas y gravas, con algo de limo, color gris anaranjado
PN-8	176	177	1	Arena gruesa, media y fina, con algo de limo, color gris blanquecino
PN-8	177	184	7	Arena gruesa, media, gravillas y gravas, con algo de limo, color gris anaranjado
PN-8	184	190	6	Arenas gruesas, medias y finas color gris claro
PN-8	190	194	4	Arena fina y limo, arenas gruesas y medias de color gris
PN-8	194	200	6	Sin información
PN-9	0	24	24	Gravas y arenas. Matriz de arena fina y limo color pardo anaranjado
PN-9	24	36	12	Toba cristalina gris blanquecina cuarzosa

PN-9	36	47	11	Gravas finas a medias color gris blanquecinos
PN-9	47	52	5	Toba cristalina color gris ceniza
PN-9	52	69	17	Toba cristalina color gris oscuro
PN-9	69	95	26	Toba cristalina color gris morada oscura
PN-9	95	100	5	Toba color gris oscuro
PN-9	100	166	66	Toba litocristalina color pardo rojiza, más rojiza hacia la base
PN-9	166	172	6	Toba cristalina color gris rosada, cristales de cuarzo, feldespatos y micas. Roca frágil
PN-9	172	200	28	Arenas gruesas y medias cuarcíferas
PNAR-1	0	26	26	Toba riolitica soldada con ojos de cuarzo, biotita y epidota de manera subordinada
PNAR-1	26	28	2	Veta de cuarzo
PNAR-1	28	42	14	Volcanita oscura de difícil calcificación
PNAR-1	42	56	14	Zona de transición con volcanita oscura y flujos riolíticos de la toba infrayacente
PNAR-1	56	88	32	Toba cristalina riolitica en una matriz de ceniza
PNAR-1	88	191	103	Andesita con hornblenda de tamaño fino
PNAR-1	191	300	109	Toba cristalina de composición dacítica con ojos de cuarzo y biotita, de escasa matriz y semiconsolidada
PNAR-2	0	4	4	Gravas polimícticas subredondeadas
PNAR-2	4	22	18	Toba cristalina de composición dacítica con ojos de cuarzo biotitas y epidotas
PNAR-2	22	116	94	Toba cristalina de composición dacítica con ojos de cuarzo biotitas y epidotas
PNAR-2	116	130	14	Toba correlacionable con toba de nivel 2
PNAR-2	130	140	10	Aparente zona de falla con mucho contenido arcilloso (130 - 132), y granos muy bien redondeados (134-140)
PNAR-2	140	250	110	Toba ácida semiconsolidada de composición dacítica con ojos de cuarzo, biotitas, además de epidotas y hematitas subordinadas.
PNAR-3	0	2	2	Gravas polimícticas redondeadas a subredondeadas
PNAR-3	2	6	4	Toba andesítica con cristales de anfíbol y plagioclasa, óxidos de Fe
PNAR-3	6	12	6	Toba andesítica con cristales de anfíbol y plagioclasa, óxidos de Fe
PNAR-3	12	24	12	Zona transición brechas con niveles de arenas y arcillas
PNAR-3	24	40	16	Zona transición brechas con niveles de arenas y arcillas
PNAR-3	40	42	2	Capa de arcilla, puros finos
PNAR-3	42	96	54	Toba dacítica de matriz cinerítica compuesta por cuarzo, biotitas oxidadas y piroxenos de manera subordinada. Correlación con nivel 2 y 3
PNAR-3	96	110	14	Toba dacítica de matriz cinerítica compuesta por plagioclasa, cuarzo y biotita de manera subordinada. Además de líticos y epidotas aisladas
PNAR-3	110	112	2	Toba dacítica de matriz cinerítica compuesta por plagioclasa, cuarzo y biotita de manera subordinada. Además de líticos y epidotas aisladas
PNAR-3	112	114	2	Toba dacítica de matriz cinerítica compuesta por plagioclasa, cuarzo y biotita de manera subordinada. Además de líticos y epidotas aisladas
PNAR-3	114	120	6	Toba dacítica de matriz cinerítica compuesta por plagioclasa, cuarzo y biotita de manera subordinada. Además de líticos y epidotas aisladas
PNAR-3	120	150	30	Toba dacítica de matriz cinerítica compuesta por plagioclasa, cuarzo y biotita de manera subordinada. Además de líticos y epidotas aisladas
PNAR-3	150	176	26	Toba dacítica de matriz cinerítica compuesta por plagioclasa, cuarzo y biotita de manera subordinada. Además de líticos y epidotas aisladas
PNAR-3	176	188	12	Zona transicional entre tobas suprayacentes e infrayacentes
PNAR-3	188	203	15	Toba dacítica de matriz cinerítica compuesta de cuarzo, biotitas y líticos oscuros
PNAR-3	203	204	1	Nivel de arenas medias y gruesas
PNAR-3	204	208	4	Toba riolitica con matriz cinerítica con tintes de Fd K compuesta por abundante cuarzo, biotita, líticos rojizos y pardo oscuros
PNAR-3	208	230	22	Toba riolitica con matriz cinerítica con tintes de Fd K compuesta por abundante cuarzo, biotita, líticos rojizos y pardo oscuros

PNAR-4	0	3	3	Regolito de las ignimbritas subyacentes
PNAR-4	3	48	45	Toba cristalina de composicion dacitica con cristales de cuarzo, mica biotita oxidada y de forma subordinada, liticos volcanicos en matriz fina cinerititca
PNAR-4	48	98	50	Toba cristalina de composicion dacitica con cristales de cuarzo, mica biotita oxidada y de forma subordinada, liticos volcanicos en matriz fina cinerititca
PNAR-4	98	102	4	Toba cristalina de composicion dacitica con cristales de cuarzo, mica biotita oxidada y de forma subordinada, liticos volcanicos en matriz fina cinerititca
PNAR-4	102	134	32	Toba cristalina de composicion dacitica con cristales de cuarzo, mica biotita oxidada y de forma subordinada, liticos volcanicos en matriz fina cinerititca
PNAR-4	134	142	8	Toba cristalina de composicion dacitica con cristales de cuarzo, mica biotita oxidada y de forma subordinada, liticos volcanicos en matriz fina cinerititca
PNAR-4	142	154	12	Toba cristalina de composicion dacitica con cristales de cuarzo, mica biotita oxidada y de forma subordinada, liticos volcanicos en matriz fina cinerititca
PNAR-4	154	250	96	Toba cristalina de composicion riodacitica con cristales de cuarzo, mica biotita y de forma subordinada liticos volcanicos insertos en matriz cristalina mas fina compuesta principalmente de FdK, Pg y Qz
PNPZ-1	0	8	8	Grava polimictica con clastos subangulares y subredondeados de composicion volcanica insertas en una matriz de arena gruesa y algo de limo
PNPZ-1	8	20	12	Grava oligomictica con fragmentos de toba dacitica predominante ademas de granos individuales de cuarzo y fragmentos de lava
PNPZ-1	20	34	14	Toba cristalina de composicion dacitica con abundantes cuarzos y biotitas subordinadas con matriz cristalina compuesta mayormente de plagioclasa
PNPZ-1	34	68	34	Toba cristalina de composicion dacitica con abundantes cuarzos y biotitas subordinadas con matriz cristalina compuesta mayormente de plagioclasa
PNPZ-1	68	74	6	Toba cristalina de composicion dacitica con abundantes cuarzos y biotitas subordinadas con matriz cristalina compuesta mayormente de plagioclasa
PNPZ-1	74	80	6	Toba cristalina de composicion dacitica con abundantes cuarzos y biotitas subordinadas con matriz cristalina compuesta mayormente de plagioclasa
PNPZ-1	80	88	8	Toba cristalina de composicion dacitica con abundantes cuarzos y biotitas subordinadas con matriz cristalina compuesta mayormente de plagioclasa
PNPZ-1	88	128	40	Toba cristalina de composicion dacitica con abundantes cuarzos y biotitas subordinadas con matriz cristalina compuesta mayormente de plagioclasa
PNPZ-1	128	156	28	Toba cristalina de composicion dacitica con abundantes cuarzos y biotitas subordinadas con matriz cristalina compuesta mayormente de plagioclasa
PNPZ-1	156	162	6	Toba cristalina de composicion dacitica con abundantes cuarzos y biotitas subordinadas con matriz cristalina compuesta mayormente de plagioclasa
PNPZ-1	162	170	8	Toba cristalina de composicion dacitica con abundantes cuarzos y biotitas subordinadas con matriz cristalina compuesta mayormente de plagioclasa
PNPZ-1	170	178	8	Toba cristalina de composicion dacitica con abundantes cuarzos y biotitas subordinadas con matriz cristalina compuesta mayormente de plagioclasa
PNPZ-1	178	182	4	Toba cristalina de composicion dacitica con abundantes cuarzos y biotitas subordinadas con matriz cristalina compuesta mayormente de plagioclasa
PNPZ-1	182	190	8	Gravas y arenas intertobas formadas por granos subredondeados de cuarzo y frahmentos de roca volcanica negra
PNPZ-1	190	210	20	Toba cristalina de composicion dacitica con abundantes cuarzos y biotitas subordinadas, con matriz cristalina compuesta mayormente de Pg
PNPZ-1	210	212	2	Toba cristalina de composicion dacitica con abundantes cuarzos y biotitas subordinadas, con matriz cristalina compuesta mayormente de Pg
PNPZ-1	212	226	14	Toba cristalina de composicion dacitica con abundantes cuarzos y biotitas subordinadas, con matriz cristalina compuesta mayormente de Pg
PNPZ-1	226	236	10	Toba cristalina de composicion dacitica con abundantes cuarzos y biotitas subordinadas, con matriz cristalina compuesta mayormente de Pg
PNPZ-1	236	240	4	Toba cristalina de composicion dacitica con abundantes cuarzos y biotitas subordinadas, con matriz cristalina compuesta mayormente de Pg
PNPZ-1	240	250	10	Toba cristalina de composicion dacitica con abundantes cuarzos y biotitas subordinadas, con matriz cristalina compuesta mayormente de Pg
PNPZ-2	0	27	27	Gravas y arenas gruesas de composicion polimictica con clastos subredondeados a subangulares con fragmentos volcanicos y cuarzo
PNPZ-2	27	34	7	Toba cristalina de composicion dacitica, se observan cristales de cuarzo micas oxidadas y liticos negros incorporados en la matriz fina afanitica

PNPZ-2	34	38	4	Toba cristalina de composición dacítica, se observan cristales de cuarzo micas oxidadas y líticos negros incorporados en la matriz fina afanítica
PNPZ-2	38	62	24	Toba cristalina de composición dacítica, se observan cristales de cuarzo micas oxidadas y líticos negros incorporados en la matriz fina afanítica
PNPZ-2	62	70	8	Toba cristalina de composición dacítica, se observan cristales de cuarzo micas oxidadas y líticos negros incorporados en la matriz fina afanítica
PNPZ-2	70	84	14	Toba cristalina de composición dacítica, se observan cristales de cuarzo micas oxidadas y líticos negros incorporados en la matriz fina afanítica
PNPZ-2	84	96	12	Toba cristalina de composición dacítica, se observan cristales de cuarzo micas oxidadas y líticos negros incorporados en la matriz fina afanítica
PNPZ-2	96	98	2	Toba cristalina de composición dacítica, se observan cristales de cuarzo micas oxidadas y líticos negros incorporados en la matriz fina afanítica
PNPZ-2	98	114	16	Zona de transición entre depósitos de toba de composición dacítica fuertemente alteradas a óxidos de Fe y lavas andesíticas
PNPZ-2	114	124	10	
PNPZ-2	124	138	14	Lava extremadamente porosa con cristales relleno de poros
PNPZ-2	138	250	112	Toba cristalina de composición riódacítica con cristales de cuarzo, mica biotita y de forma subordinada líticos volcánicos insertos en una matriz cristalina más fina compuesta principalmente de FdK, Pg y Qz
PNDC-1	0	18	18	Cobertura aluvial
PNDC-1	18	38	20	Toba dacítica con ojos de cuarzo, Pg, Bt oxidada, Hem, líticos, pumaceos alargados, otros grises y pardo rojizos
PNDC-1	38	53	15	Transición entre la toba dacítica suprayacente y andesita cuarcífera infrayacente
PNDC-1	53	140	87	Toba andesítica cuarcífera compuesta por Pg mayoritariamente y menos de un 20% del total de cristales de Qz, Bt, sin líticos
PNDC-1	140	143	3	-
PNDC-1	143	166	23	La toba cambia de textura, mayoritariamente de líticos y ceniza. Toba de lapilli y líticos mientras que la mayoría de los cx son Pg
PNDC-1	166	168	2	Roca molida
PNDC-1	168	168.25	0.25	-
PNDC-1	168.25	195	26.75	Toba de lapilli muy porosa con pequeños líticos pardo rojizos de 1 mm a 1 cm
PNDC-1	195	300	105	La misma toba se vuelve más cristalina y de composición dacítica con abundantes ojos de cuarzo Pg anfíbol y biotita subordinada
PNDC-1	300	333	33	-
PNDC-1	333	340	7	-
PNDC-1	340	392	52	-
PNDC-1	392	440	48	Brecha volcánica con clastos volcánicos angulosos de hasta 1 m o más
PNDC-1	440	479	39	Toba andesítica compuesta casi de puros cristales
PNDC-1	479	495	16	Brecha volcánica de menor tamaño que la anterior
PNDC-1	495	500	5	Arenas de tamaño medio de clastos subredondeados y con buena selección
PA-2	0	24	24	Relleno aluvial. Gravillas y gravas limo arenosas de color pardo amarillento
PA-2	24	29	5	Toba gris amarillenta cristalolítica
PA-2	29	104	75	Toba gris rosada cristalolítica
PA-2	104	120	16	Toba pardo rojiza oscura
PA-2	120	134	14	Toba marrón rosada
PA-2	134	136	2	Transición entre la toba blanquecina y la pardo rojiza oscura
PA-2	136	143	7	Toba blanquecina cristalolítica
PA-2	143	156	13	Toba gris rosada cristalolítica
PA-2	156	159	3	Toba gris rosada
PA-2	159	163	4	Toba gris blanquecina
PA-2	163	206	43	sin información

PA-4	0	29	29	Relleno aluvial
PA-4	29	110	81	Toba gris rosada
PA-4	110	118	8	Lava gris rojizo oscuro
PA-4	118	122	4	Toba gris rosada
PA-4	122	134	12	Lava gris oscuro
PA-4	134	136	2	Arenas, gravillas y limo, color gris oscuro
PA-4	136	146	10	Gravillas, grava y arenas, color gris oscuro
PA-4	146	158	12	Arenas, gravillas y gravas, color gris
PA-4	158	162	4	Arenas, gravillas y gravas color gris blanquecino
PA-4	162	180	18	Arenas y poco limo, color gris
PA-4	180	200	20	Gravillas, arenas y gravas , color gris blanquecino
PAAR-1	0	4	4	Gravilla mediana oligomictica formada por clastos de toba e ignimbrita y escasos fragmentos de lavas negras. Los clastos son subangulares de selección media
PAAR-1	4	30	26	Gravilla mediana polimictica formada por clastos subredondeados de lava y vidrio volcanico fuertemente silicificadas La selección es entre media a buena
PAAR-1	30	48	18	Roca volcanica fuertemente silicificada, se observan caras planas con una alteracion rojiza producto de oxidacion
PAAR-1	48	72	24	Zona de brecha volcanica
PAAR-1	72	90	18	Se observa una alternancia entre tobas blancas y tobas pardo oscuras bien soldadas. Las tobas son de matriz cineritica con fragmentos de liticos, micas oxidadas y abundante Qz. Existen vesiculas rellenas. La ignimbrita presenta una matriz fuertemente sili
PAAR-1	90	96	6	Toba de ceniza de color rosado salmon, en algunos de los fragmentos se reconoce la textura mientras que en otros la matriz se torna lisa lo que genera una silicificacion
PAAR-1	96	120	24	Roca volcanica en la cual se observa una matriz afanitica de color blanco amarillento con cristales tabulares alargados. Intercalada ocasionalmente con rocas volcanicas color café oscuro con cristales tabulares
PAAR-1	120	130	10	Rocas volcanicas, se observa una matriz porfidica fina con cristales tabulares insertos.
PAAR-1	130	138	8	Roca volcanica (lava) la cual presenta una matriz levemente porfidica con cristales de Pg y vesiculas rellenas con CaCO3.
PAAR-1	138	142	4	Igual a la anterior pero en algunos tramos es mas fuertemente alterada
PAAR-1	142	150	8	Toba de ceniza, presenta una matriz levemente cineritica. El grado de silicificacion enmascara la textura. Se observa algo de Qz inserto en la matriz
PAAR-1	150	156	6	Toba de ceniza igual a la anterior
PAAR-1	156	162	6	Toba de ceniza con matriz levemente cineritica
PAAR-1	162	174	12	Igual a la anterior pero con mayor grado de fracturamiento. En la matriz hay amigdalas rellenas con Qz y CaCO3.
PAAR-1	174	180	6	Roca volcanica de matriz porfidica, cristales subhedrales
PAAR-1	180	200	20	Roca volcanica con matriz fuertemente silicificada donde se reconocen algunos cristales tabulares
PAAR-3	0	64	64	Grava oligomictica, clasto soportada con clastos subredondeados de composicion volcanica. Se encuentra en una matriz de arena y limos
PAAR-3	64	116	52	Toba cristalina dacitica con matriz cineritica y cristales de biotita y cuarzo subhedrales a anhedrales
PAAR-3	116	200	84	Toba riolitica con cristales subhedrales a anhedrales de Pg y Bt inmersos en una matriz cineritica
PADC-5	0	25.8	25.8	Gravas polimicticas
PADC-5	25.8	54.5	28.7	Toba cineritica con cristales de Qz en matriz de ceniza gris. Presencia de liticos y volcanicos
PADC-5	54.5	116.8	62.3	Toba cristalina dacitica con cristales de Pg, Qz y Bt en matriz microcristalina. Entre 128-166,8 roca mas compacta
PADC-5	116.8	178.5	61.7	Nivel andesitico con fenocristals de Pg en masa fundamental afanitica oscura
PADC-5	178.5	180.7	2.2	Toba cineritica con cristales de Bt y Qz en matriz de ceniza. Algunos liticos de material andesitico
PADC-5	180.7	340	159.3	Toba dacitica con cristales de Pg, Qz y abundante Bt en matriz de ceniza.

				Algunos líticos de composición volcánica.
PADC-5	340	381	41	Toba riódacítica a dacítica con Pg y Qz, cambia de matriz microcristalina con FdK a una sin FdK y con alteración clorítica
PC-1	0	13	13	Material aluvial
PC-1	13	16	3	Toba pardo rosada
PC-1	16	20	4	Toba gris blanquecina de grano grueso
PC-1	20	30	10	Toba grisácea grano grueso
PC-1	30	40	10	Toba gris blanquecina con escaso cuarzo
PC-1	40	46	6	Toba grisácea de grano medio
PC-1	46	50	4	Toba gris blanquecina con abundante cuarzo
PC-1	50	71	21	Toba grisácea con algunos cristales de cuarzo
PC-1	71	84	13	Ignimbrita gris
PC-1	84	93	9	Toba gris oscuro
PC-1	93	111	18	Ignimbrita gris oscuro
PC-1	111	190	79	Conglomerado con fragmentos de material ignimbrítico rosado
PC-1	190	200	10	Conglomerados de material ignimbrítico limpio, matriz arenosa
PC-2	0	29	29	Material aluvial
PC-2	29	68	39	Ignimbrita gris alterada
PC-2	68	94	26	Ignimbrita gris morada
PC-2	94	115	21	Ignimbrita gris rojiza
PC-2	115	118	3	Lava
PC-2	118	123	5	Toba rojiza
PC-2	123	132	9	Conglomerado y arenas rojizas
PC-2	132	200	68	Conglomerado grueso
PC-3	0	36	36	Material aluvial
PC-3	36	90	54	Ignimbrita gris alterada
PC-3	90	100	10	Toba cristalolítica color pardo rojiza
PC-3	100	136	36	Lava andesítica silicificada color gris oscuro
PC-3	136	150	14	Gravas finas arenosas color gris rosado
PC-3	150	177	27	Lava andesítica silicificada color gris oscuro
PC-3	177	200	23	Conglomerado mediano oligomítico color gris oscuro
PC-4	0	23	23	Material aluvial
PC-4	23	55	32	Ignimbrita gris alterada
PC-4	55	60	5	Toba cristalolítica color gris morada
PC-4	60	65	5	Toba cristalolítica color gris
PC-4	65	101	36	Gravas y arenas en matriz limo arcillosa de color pardo rojiza
PC-4	101	155	54	Toba cristalolítica color gris morada
PC-4	155	175	20	Toba cristalolítica color gris con pátinas de óxido color pardo rojizo
PC-4	175	187	12	Fragmentos de tobas y cuarzo en matriz limosa de color pardo claro
PC-4	187	200	13	Toba cristalolítica color gris morada
PC-5	0	25	25	Relleno aluvial. Arenas, gravillas y escasa grava en matriz de limo y arena fina de color pardo
PC-5	25	52	27	Material aluvial. Gravillas y gravillas en matriz arenosa de color gris
PC-5	52	124	72	Material aluvial. Gravillas y gravillas en matriz arenosa de color pardo grisáceo

PC-5	124	137	13	Toba cristalolítica color gris
PC-5	137	200	63	Toba cristalina color gris violáceo
PCAR-1	0	82	82	Gravas y arenas redondeadas a subredondeadas monomicticas con fragmentos liticos angulosos a subangulosos
PCAR-1	82	200	118	Lava probablemente andesitica con cristales de Pg y anfíbol aparentemente algo silicificada y obliterada
PCPZ-3	0	18	18	Depositos de gravas polimicticas
PCPZ-3	18	20	2	Toba litica con fragmentos liticos polimicticos de rocas volcanicas
PCPZ-3	20	40	20	Toba litica con fragmentos liticos polimicticos de rocas volcanicas
PCPZ-3	40	56	16	Toba litica con fragmentos liticos polimicticos de rocas volcanicas
PCPZ-3	56	62	6	Toba litica con fragmentos liticos polimicticos de rocas volcanicas
PCPZ-3	62	64	2	Toba litica con fragmentos liticos polimicticos de rocas volcanicas
PCPZ-3	64	92	28	Toba litica con fragmentos liticos polimicticos de rocas volcanicas
PCPZ-3	92	102	10	Toba litica con fragmentos liticos polimicticos de rocas volcanicas
PCPZ-3	102	108	6	Toba litica con fragmentos liticos polimicticos de rocas volcanicas
PCPZ-3	108	114	6	Tobas de ceniza con una matriz fuertemente cineritica en la cual se observan insertos cuarzos y micas
PCPZ-3	114	118	4	Tobas de ceniza con una matriz fuertemente cineritica en la cual se observan insertos cuarzos y micas
PCPZ-3	118	130	12	Tobas de ceniza con una matriz fuertemente cineritica en la cual se observan insertos cuarzos y micas
PCPZ-3	130	192	62	Es la misma roca pero en la cual las micas estan todas alteradas
PCPZ-3	192	230	38	Toba de ceniza, en esta aumenta el tamaño de los clastos y el grado de alteracion
PCPZ-4	0	30	30	Gravas polimicticas subredondeadas compuestas por clastos tobaceos y lavicos de manera subordinada
PCPZ-4	30	78	48	Toba dacítica con cristales de cuarzo, plagioclasa y biotitas oxidadas en una matriz cineritica
PCPZ-4	78	208	130	Lava andesitica con cristales de plagioclasas insertos en una masa fundamental que varia entre pardo rojizo y gris
PCDC-3	0	38.8	38.8	Cobertura aluvial
PCDC-3	38.8	80	41.2	Toba litica con fragmentos subangulares y subredondeados multicomposicionales de matriz cineritica
PCDC-3	80	204	124	Toba cristalina de compacion dacitica con ojos de cuarzo, Pg, anfíboles y biotitas oxidadas. Incluye liticos pequeños de color gris, pardo rojizo y pomez. La matriz es cineritica
PCDC-3	204	207	3	Toba andesitica compuesta de Pg y matriz de color gris
PCDC-3	207	209	2	Toba de lapilli con cristales de Pg y Bt
PCDC-3	209	216	7	Arenas gruesas y medias muy bien seleccionadas compuestas de clastos volcanicos multicomposicionales que van desde subredondeados a redondeados
PCDC-3	216	240	24	Brecha volcanica con liticos subangulares y angulares de distintos tipos de tobas y matriz de color gris parduzco a gris rojizo de tamaño limo a arena muy fina
PT-1	0	29	29	Relleno aluvial
PT-1	29	59	30	Ignimbrita
PT-1	59	67	8	Limo arcilloso
PT-1	67	75	8	Arcilla y limo
PT-1	75	84	9	Ignimbrita parda
PT-1	84	142	58	Ignimbrita gris
PT-1	142	170	28	Arcilla roja
PT-1	170	174	4	Limo gris
PT-1	174	181	7	Arcilla y limo gris
PT-1	181	200	19	Lava andesítica

PT-3	0	77	77	Relleno aluvial. Gravas y gravillas limo arenosas de color pardo
PT-3	77	84	7	Arenas medias a gruesas monomícticas de color gris oscuro
PT-3	84	100	16	Toba cristalina riolítica de color gris rosada
PT-3	100	115	15	Toba cristalina riolítica de color pardo morada
PT-3	115	132	17	Toba litocristalina de color gris rosada
PT-3	132	137	5	Gravillas y arenas polimícticas de color pardo grisáceas
PT-3	137	141	4	Toba litocristalina de color gris claro
PT-3	141	200	59	Toba litocristalina de color gris rosada
PT-4	0	101	101	Relleno aluvial. Gravas y gravillas limo arenosas de color pardo
PT-4	101	110	9	Toba cristalina riolítica de color gris rosada
PT-4	110	115	5	Toba cristalina riolítica de color pardo morada
PT-4	115	122	7	Gravas y gravillas en una matriz de arena fina a media de color pardo
PT-4	122	125	3	Gravas y gravillas en una matriz de arena y limo de color pardo
PT-4	125	140	15	Gravas y gravillas en una matriz de arena fina a media de color pardo
PT-4	140	148	8	Toba litocristalina de color gris claro
PT-4	148	149	1	Arcilla y limo de color gris claro
PT-4	149	169	20	Toba litocristalina de color gris claro
PT-4	169	174	5	Gravas, gravillas y arenas gruesas de color pardo rojizas
PT-4	174	200	26	Toba litocristalina de color gris claro
PT-5	0	51	51	Relleno aluvial. Gravas y gravillas limo arenosas de color pardo
PT-5	51	64	13	Toba cristalina riolítica de color gris morada
PT-5	64	69	5	Toba litocristalina soldada de color gris rojizo
PT-5	69	73	4	Toba cristalina riolítica de color gris morada
PT-5	73	84	11	Toba litocristalina soldada de color gris rojizo
PT-5	84	91	7	Toba litocristalina de color gris anaranjado
PT-5	91	97	6	Toba litocristalina de color gris claro
PT-5	97	104	7	Arcilla y limo de color gris claro
PT-5	104	115	11	Toba litocristalina de color gris claro
PT-5	115	125	10	Gravas, gravillas y arenas gruesas de color pardo rojizas
PT-5	125	200	75	Toba litocristalina de color gris anaranjado
PT-6	0	60	60	Relleno aluvial. Gravas y gravillas limo arenosas de color pardo
PT-6	60	78	18	Arenas y gravillas de color gris oscuro
PT-6	78	84	6	Toba litocristalina soldad de color gris
PT-6	84	94	10	Toba cristalina riolítica de color gris morada
PT-6	94	150	56	Toba litocristalina soldad de color gris
PT-6	150	171	21	Arcilla plástica de color pardo anaranjado
PT-6	171	175	4	Gravas, gravillas y arenas en una matriz limo arcillosa de color gris rojizo
PT-6	175	200	25	Gravas, gravillas y arenas en una matriz de limo color pardo grisáceo
LTAR-1	0	38	38	Toba con matriz de ceniza y cristales de biotita oxidada, de color rojizo. Aparece en los 36-38 una zona de mezcla con fragmentos de lavas rojas
LTAR-1	38	40	2	Zona con finos
LTAR-1	40	100	60	Lavas y tobas de composición andesítica con cristales grandes de biotitas (tabulares) También se observan cristales de plagioclasa
LTAR-1	100	136	36	Toba de composición andesítica con cristales de plagioclasa y algunos mienrales

				alterados (color rojizo)
LTAR-1	136	198	62	La misma roca que antes. Presenta un tramo fuertemente alterado (144-156) donde los fragmentos son de color rojizo
LTAR-1	198	240	42	Lava andesítica con nivel de tobas andesíticas se observan cristales de anfíbol y pargiroclinas y líticos volcánicos de variados tamaños
LTAR-2	0	2	2	Grava polimictica compuesta de clastos volcánicos
LTAR-2	2	38	36	Grava polimictica compuesta de clastos volcánicos
LTAR-2	38	50	12	Toba de composición dacítica, se observan cristales de cuarzo, Pg, y algunos líticos volcánicos, todos ellos insertos en una matriz de ceniza
LTAR-2	50	64	14	Toba de composición dacítica, se observan cristales de cuarzo, Pg, y algunos líticos volcánicos, todos ellos insertos en una matriz de ceniza
LTAR-2	64	76	12	Toba de composición dacítica, se observan cristales de cuarzo, Pg, y algunos líticos volcánicos, todos ellos insertos en una matriz de ceniza
LTAR-2	76	88	12	Toba de composición dacítica, se observan cristales de cuarzo, Pg, y algunos líticos volcánicos, todos ellos insertos en una matriz de ceniza
LTAR-2	88	94	6	Toba de composición dacítica, se observan cristales de cuarzo, Pg, y algunos líticos volcánicos, todos ellos insertos en una matriz de ceniza
LTAR-2	94	102	8	Toba de composición dacítica, se observan cristales de cuarzo, Pg, y algunos líticos volcánicos, todos ellos insertos en una matriz de ceniza
LTAR-2	102	112	10	Toba de composición dacítica, se observan cristales de cuarzo, Pg, y algunos líticos volcánicos, todos ellos insertos en una matriz de ceniza
LTAR-2	112	114	2	Toba de composición dacítica, se observan cristales de cuarzo, Pg, y algunos líticos volcánicos, todos ellos insertos en una matriz de ceniza
LTAR-2	114	120	6	Toba de composición dacítica, se observan cristales de cuarzo, Pg, y algunos líticos volcánicos, todos ellos insertos en una matriz de ceniza
LTAR-2	120	122	2	Toba silicificada, al parecer de composición andesítica. Se reconocen cristales de anfíbol y Pg
LTAR-2	122	130	8	Toba silicificada, al parecer de composición andesítica. Se reconocen cristales de anfíbol y Pg
LTAR-2	130	146	16	Toba silicificada, al parecer de composición andesítica. Se reconocen cristales de anfíbol y Pg
LTAR-2	146	154	8	Toba silicificada, al parecer de composición andesítica. Se reconocen cristales de anfíbol y Pg
LTAR-2	154	158	4	Toba silicificada, al parecer de composición andesítica. Se reconocen cristales de anfíbol y Pg
LTAR-2	158	172	14	Toba silicificada, al parecer de composición andesítica. Se reconocen cristales de anfíbol y Pg
LTAR-2	172	178	6	Toba silicificada, al parecer de composición andesítica. Se reconocen cristales de anfíbol y Pg
LTAR-2	178	180	2	Toba silicificada, al parecer de composición andesítica. Se reconocen cristales de anfíbol y Pg
LTAR-2	180	182	2	Toba silicificada, al parecer de composición andesítica. Se reconocen cristales de anfíbol y Pg
LTAR-2	182	190	8	Toba silicificada, al parecer de composición andesítica. Se reconocen cristales de anfíbol y Pg
LTAR-2	190	192	2	Brecha volcánica de líticos angulares y multicomposicionales. En sectores los líticos son de 2 m o mas
LTAR-2	192	204	12	Brecha volcánica de líticos angulares y multicomposicionales. En sectores los líticos son de 2 m o mas
LTAR-2	204	208	4	sin rec
LTAR-2	208	268	60	Brecha volcánica de líticos angulares y multicomposicionales. En sectores los líticos son de 2 m o mas
LTAR-2	268	272	4	Brecha volcánica de líticos angulares y multicomposicionales. En sectores los líticos son de 2 m o mas
LTAR-2	272	280	8	Brecha volcánica de líticos angulares y multicomposicionales. En sectores los líticos son de 2 m o mas
LTPZ-5A/5B	0	6	6	Gravas monomicticas con clastos de tobas de 2 cm, formados en una matriz cinerítica en la cual se observa inserto cuarzo, líticos, etc.
LTPZ-5A/5B	6	36	30	Gravas polimicticas con fragmentos de tobas blancas. Se observan algunos niveles de tobas monomicticas iguales la tramo anterior
LTPZ-5A/5B	36	64	28	Gravas monomicticas de color pardo claro con una selección media a mala
LTPZ-5A/5B	64	76	12	Toba de ceniza: se observa una matriz de ceniza sobre la cual se encuentran insertos fragmentos de cuarzo y micas
LTPZ-5A/5B	76	82	6	Toba se observa un matriz fuertemente silicificada con cuarzos líticos y biotita
LTPZ-5A/5B	82	94	12	Toba de ceniza con una matriz de ceniza fuertemente alterada en la cual se observan fragmentos de cuarzo y mica oxidadas

LTPZ-5A/5B	94	150	56	Toba con una matriz de ceniza la cual se encuentra soldada e incluso silicificada. Inserta en esta matriz se reconoce abundante Qz fragmentos liticos y micas oxidadas
LTPZ-5A/5B	150	170	20	Toba litocristalina con presencia de biotitas
LTPZ-5A/5B	170	186	16	Lavas (andesiticas basalticas). Estas rocas se encuentran fuertemente afectada por alteracion de oxidacion, pues se observan una serie de vesiculas no rellenas. Se observa intercalado un nivel de ignimbritas rosadas.
LTPZ-5A/5B	186	192	6	Lavas (andesiticas basalticas). Estas rocas se encuentran fuertemente afectada por alteracion de oxidacion, pues se observan una serie de vesiculas no rellenas. Se observa intercalado un nivel de ignimbritas rosadas.
LTPZ-5A/5B	192	198	6	Lavas (andesiticas basalticas). Estas rocas se encuentran fuertemente afectada por alteracion de oxidacion, pues se observan una serie de vesiculas no rellenas. Se observa intercalado un nivel de ignimbritas rosadas.
LTPZ-5A/5B	198	200	2	Tobas grises, igual a lo anterior
LTPZ-6A	0	80	80	Gravas oligomicticas en donde se observan fragmentos de tobas y lavas insertos en una matriz de arena fina a media. Corresponde a depositos no consolidados
LTPZ-6A	80	144	64	Toba cristalina de composicion andesitica-dacitica, se observan cristales de Pg, algo de Qz, biotitas y anfíbol en menor cantidad, líticos volcánicos de color pardo, todos ellos insertos en una matriz de ceniza fina
LTPZ-6A	144	164	20	Toba litocristalina con líticos volcánicos y cristales de cuarzo yPg
LTPZ-6A	164	210	46	Toba gris y parda de composicion andesitica
LTPZ-6B	0	74	74	Gravas oligomicticas. Se observan fragmentos de toba y lavas insertos en una matriz de arena fina y algo de limo, corresponde a sedimentos no conolidados
LTPZ-6B	74	132	58	Toba cristalina de composicion andesitica-dacitica se observan cristales de Pg, algo de Qz, Bt cobriza, anfíbol en menor cantidad y líticos volcánicos de color pardo, insertos en una matriz de ceniza fina
LTPZ-6B	132	141	9	Toba litocristalina con líticos volcánicos y cristales de Qz y Pg
LTPZ-6B	141	160	19	Zona brechosa o posiblemente una toba litica, se observan clastos polimicticos, lavas algo silicificadas color negro, tobas pardas y grises
LTPZ-6B	160	216	56	Toba gris de composicion andesitica con cristales de plagioclasa y anfíbol, insertos en una matriz de ceniza color gris a negro
LTDC-4	0	72		Relleno aluvial
LTDC-4	72	141.3	69.3	Toba de ceniza, Cx de Bt oxidadas, Qz, pomez, algunos liticos. Entre los 82-83 la toba se presenta alterada y fracturada
LTDC-4	141.3	164.3	23	Toba de ceniza, igual a la anterior pero varia el color de la matriz.
LTDC-4	164.3	241.65	77.35	Toba silicificada, Qz >90% de la roca. Entre los 161,3-198,4 hay fracturas rellenas de Qz, Epi, Ox Fe, Manganeso y arcilla.
PAAR-2	0	20	20	Gravas y arenas con clastos subredondeados a subanguloso de composicion oligomictica (volcanica) tobas y lavas, insertos en una matriz de arena gruesa y algo de limo
PAAR-2	20	54	34	Toba cristalina, se observa cx de Pg, micas biotitas y clastos volcánicas subredondeados de color negro y pardo. Todos ellos insertos en una matriz de ceniza color gris blanquecina
PAAR-2	54	75	21	Toba cristalina con cristales de Pg, mica biotita y clastos volcánicos muy subordinados insertos en una matriz de ceniza
PAAR-2	75	86	11	Toba con cristales de anfíboles alargados subhedrales a euhedrales (4 mm) insertos en una matriz fina de color pardo oscuro a parda amarillenta. De forma subordinada hay líticos volcánicos
PAAR-2	86	96	10	Toba con cristales de anfíboles (3-4 mm) y de forma subordinada fragmentos líticos y Pg insertos en una matriz muy fina de color gris
PAAR-2	96	130	34	Lava andesitica con cristales de Pg y anfíbol insertos en una matriz de ceniza de color pardo claro
PAAR-2	130	158	28	Toba con cristales de Pg y anfíbol insertas en una matriz de ceniza de color pardo oscuro
PAAR-2	158	200	42	Zona de intercalaciones entre lavas y tobas de composicion andesitica
PCAR-2	0	32	32	Gravas polimicticas de clastos subredondeados y subesfericos, volcánicos
PCAR-2	32	110	78	Toba dacitica con líticos en su mayoría andesiticos. Contiene ojos de cuarzo, biotitas oxidadas y pequeños maficos subordinados de anfíbol
PCAR-2	110	148	38	Toba con fragmentos líticos negros a rojizos con cristales de biotitas oxidadas
PCAR-2	148	150	2	Nivel de arenas erosivas intervolcánicas
PCAR-2	150	160	10	Toba de composicion andesitica algo silicificada, se observan cristales de plagioclasa y anfíbol

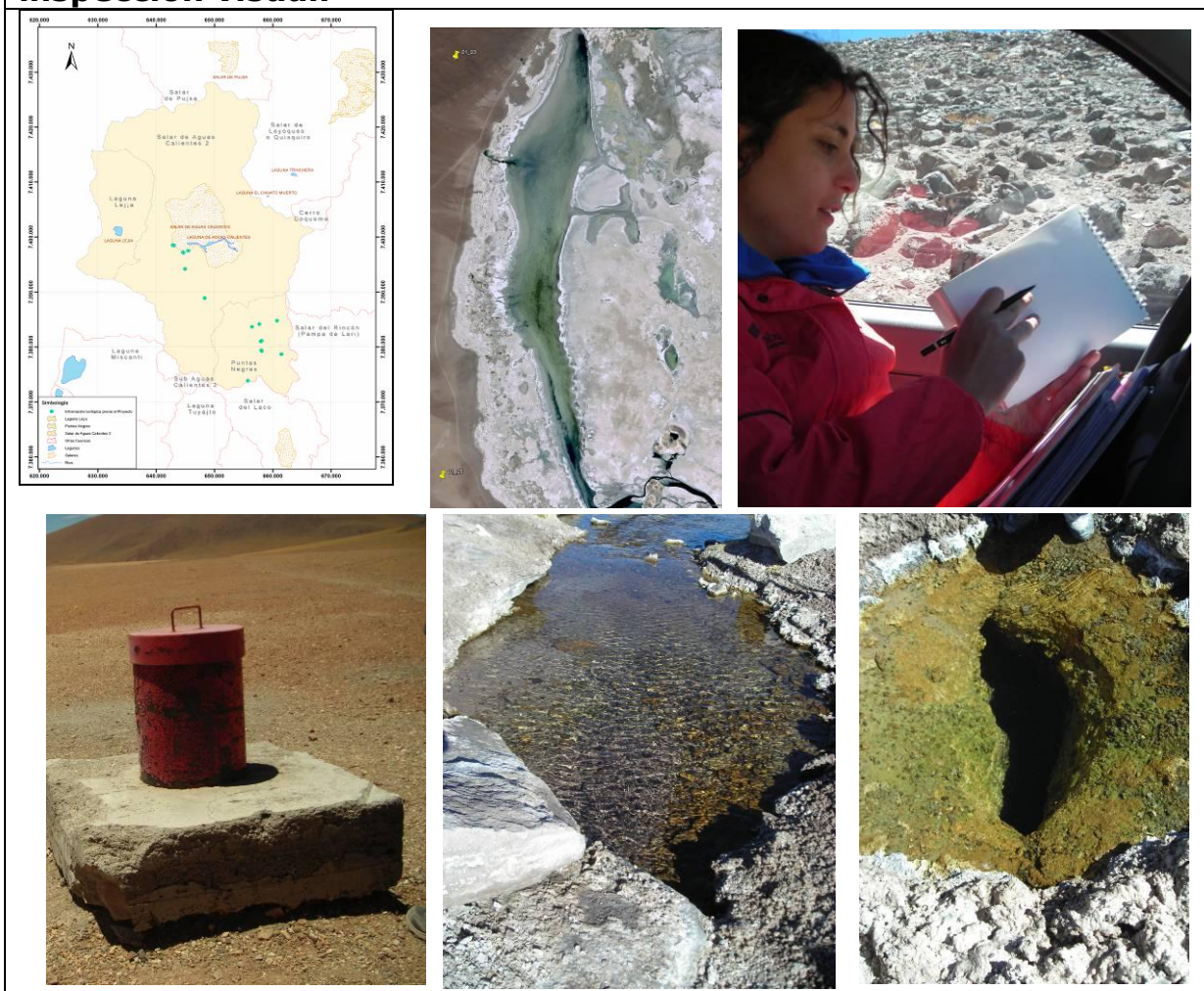
PCAR-2	160	222	62	Alternancia entre tobas grises y pardas de composicion andesitica
--------	-----	-----	----	---

ANEXO B

MÉTODO DE MUESTREO

Se presenta en este anexo, un punteo complementado con imágenes fotográficas, que detalla paso a paso los pasos que la metodología de trabajo implementada durante las campañas de terreno que se realizó en Octubre del año 2008, y con el objeto de retirar muestras de agua superficial y subterránea, para las cuencas piloto, y aledañas, del sector de la Puna de Atacama, II Región de Chile.

1. Identificación puntos de muestreo; consulta de antecedentes e inspección visual.



2. Muestreo químico e isotópico; vertientes

Toma de muestra: usando guantes de latex tomar el agua directamente desde el punto de afloramiento o vertiente. Para mantener en óptimo estado las etiquetas de rotulación, se recomienda utilizar un único dispositivo para tomar las muestras y luego trasvasiar a los recipientes finales. Dicho envase debe ser ambientado antes de cada muestreo definitivo.



Llenado de envases: ambientar los envases enjuagando varias veces con agua tomada del mismo punto de muestreo. Llenar completamente los envases procurando que no queden burbujas de aire en su interior.



Parafilm: sellar los envases aplicando cinta parafilm tanto en la parte interior de la tapa, como en su exterior. El sellado, rotulado y almacenamiento para el caso de las muestras tomadas en pozos es equivalente a lo indicado para vertientes.



Etiquetas: rotular los envases con un plumón permanente. Escribir sobre las etiquetas identificación de muestra, fecha y hora de realización. Se recomienda proteger las etiquetas con cinta adhesiva para evitar el contacto con agua.



Almacenamiento: Guardar las muestras rotuladas y selladas al interior de cajas de plumavit (aislapol) enfriadas con hielo. Cubrir la caja con nylon para proteger muestras de polvo y mantener sin



2. Muestreo químico e isotópico; vertientes

luz.

3.-Muestreo químico e isotópico; pozos

Preparación de equipo de muestreo bailer: conectar los componentes del bailer (cable de acero, manguera línea de aire, bombín y muestreador) según manual presentado en ANEXO C.

Tener especial cuidado en la fijación del cable de acero.

Determinar profundidad de la napa y profundidad a la que se desea tomar la muestra.



Presurización: presurizar el sistema según requerimiento establecido en manual (ANEXO C).

De ser posible se recomienda utilizar compresor de aire.

Desconectar el bombín o compresor antes de seguir el siguiente paso.



Toma de muestras 1: Una vez presurizado el sistema introducir el bailer en el pozo y descender a ritmo constante hasta la profundidad deseada.

Tener especial cuidado en mantener tanto la línea de aire como el cable de acero tensos en todo momento (esto evitará que ambas líneas se enreden)



3.-Muestreo químico e isotópico; pozos

Toma de muestra 2: una vez alcanzada la profundidad deseada, despresurizar y esperar un par de minutos para lograr que el agua al interior de la manguera alcance el nivel estático.

Re-presurizar y subir el bailer hasta la superficie. Debido a que muchas veces la válvula no queda completamente cerrada, realizar el proceso en forma rápida, teniendo precaución de que los cables no se enreden.



Llenado de envases: utilizar la primera muestra obtenida para ambientar los envases. A partir de la segunda muestra llenar los envases en forma directa, despresurizando el sistema y abriendo completamente la válvula del bailer.

Para aumentar el caudal de salida, ubicar la manguera lo más alto posible

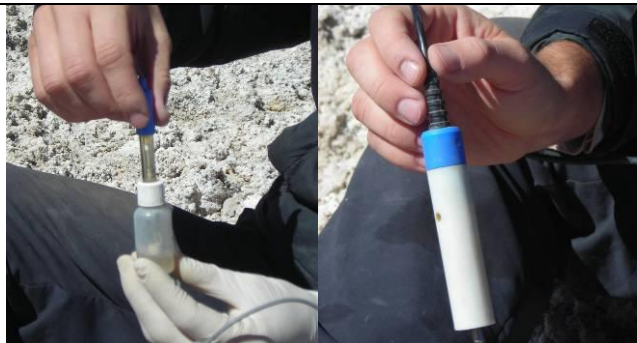




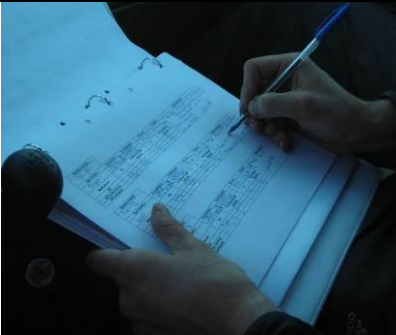
4.-Mediciones en terreno

Utilización de guantes de latex: al momento de manipular muestras e instrumentos, es necesario utilizar guantes que permitan mantener limpios las herramientas de trabajo y envases, para evitar la contaminación de muestras.



Preparación de instrumentación: preparar sondas de medición tanto para cuantificar el pH, como la conductividad y temperatura. La sonda de medición de pH debe mantenerse en todo momento al interior de una solución buffer (pH 4).



4.-Mediciones en terreno	
<p>Limpieza de instrumentos: Los instrumentos deben ser lavados con agua mili-Q antes y después de realizar cada medición. Eso tiene como objetivos evitar la contaminación cruzada de muestras y mantener limpios los instrumentos.</p>	
<p>Medición: Utilizando un envase especialmente asignado para ello, se introducen las sondas al interior de la muestra recolectada. Los sensores deben mantenerse en el interior de la muestra hasta que se alcance un claro equilibrio.</p>	
<p>Registro de información: una vez realizados los análisis de terreno deben registrarse los valores obtenidos en la ficha. En esta misma ficha deben anotarse las coordenadas, cotas, niveles estáticos, nombre de identificación y profundidad de las muestras.</p>	

5.-Determinación de niveles estáticos y ubicación de puntos de muestreo	
<p>Ubicación de pozos y puntos de muestreo: utilización de GPS para obtener coordenadas de ubicación y cotas de terreno de pozos a muestrear.</p>	
<p>Medición altura de brocal: necesaria para obtener el nivel real de las aguas subterráneas. Es equivalente a la altura existente entre el nivel del terreno y la parte superficial del tubo.</p>	

Medición de nivel: se introduce el pozómetro, determinando la distancia existente entre la parte superior de la tubería y la columna de agua.



ANEXO C

PROTOCOLO DE MUESTREO

A - MATERIALES

1 - Almacenamiento de muestras

- Envases para cada punto de muestreo
 - 1 Envase plástico de 1 L para los análisis de química general
 - 1 Envase plástico de 500 ml para análisis químico de metales
 - 1 Envase plástico de 500 ml para análisis de isótopos
- Parafilm
- Hielo
- Cajas de Plumavit (Aislapol) para transportar envases
- Cinta adhesiva
- Tijeras

2 - Mediciones en terreno

- Planillas formulario de muestreo
- Cuaderno
- Sonda de medición de pH
- Sonda de medición de conductividad y T°
- Agua mili-Q
- Guantes de Látex
- Lápiz y plumón permanente

3 - Obtención muestras desde pozos

- Bomba sumergible (opcional)
- Set de tomamuestras o Bailer (opcional).
- Guantes de trabajo.

B – PROCEDIMIENTO

1 - Toma de muestras naturales desde vertientes (química e isótopos de Deuterio y Oxígeno) y mediciones *in situ*

- Los envases deben estar limpios procedentes del laboratorio.
- En el punto de muestreo, los envases procedentes del laboratorio deben ser ambientados tres veces con el agua a muestrear, utilizando siempre guantes de látex para su manipulación.
- Luego, los envases deben ser llenados completamente, tratando de que no queden burbujas de aire en su interior y cerrados lo más herméticamente posible, para lo cual puede utilizarse cinta Parafilm, película autosellante especial para estos fines. En caso que las muestras sean enviadas por vía aérea, es conveniente dejar una pequeña burbuja de aire.
- En terreno los envases deben guardarse en frío para lo que pueden utilizarse cajas de plumavit tipo colemans con hielo (*icepack*) y protegidas de la luz solar.
- En el momento de llenado de recipientes debe medirse "*in situ*" los parámetros de pH, conductividad y temperatura del agua, lavando con agua Mili-Q, las sondas antes y después de cada utilización.

2 - Toma de muestras naturales desde pozos (química e isótopos de deuterio y oxígeno) y mediciones "*in situ*".

- Si se requiere muestrear un pozo con bomba, antes de la toma de muestra debe bombearse y descartarse tres veces el volumen de agua existente en el pozo.
- Si se requiere muestrear un pozo mediante la utilización de un bailer, debe eliminarse el primer volumen muestreado, mientras que el segundo debe ser utilizado para la ambientación de los envases.
- Se anota en el cuaderno de registro el método empleado para el muestreo.
- Las botellas se llenan, tratando de que no dejar burbujas de aire en su interior y se cierran lo más herméticamente posible, usando de preferencia cinta Parafilm.
- En terreno los envases se guardan en frío para lo cual se utilizan cajas de plumavit (aislapol) ambientadas con hielo y protegidas de la luz solar.

- En el momento de llenado de recipientes se mide pH, conductividad y temperatura, lavando con agua Mili-Q las sondas tras cada utilización.

3 - Toma de muestras con aditivos y/o preservantes (O₂, metales, etc.)

- Los envases procedentes del laboratorio que contienen aditivos o preservantes no deben ser ambientados con el agua de muestreo.
- El llenado debe hacerse con especial atención para que no se rebalse la muestra del envase. Se sugiere la ayuda de otro recipiente para concluir el llenado de muestras con aditivos.
- Los envases deben ser cerrados lo más herméticamente posible.
- En terreno los envases deben guardarse en frío y protegidos de la luz solar.

4 - Etiquetado de los envases

- Se rotula cada envase con lápiz resistente al agua (en la etiqueta o directamente en el envase), con la siguiente información:
 - Nombre de la muestra (que indica nombre de la cuenca, tipo de muestra y un número identificador)
 - Fecha y hora de muestreo
 - Lugar de muestreo (nombre alusivo a las características existentes)
- Se protege la etiqueta de cada envase con cinta adhesiva transparente gruesa.
- Se anota en una ficha de registro, especialmente diseñada para el terreno, la información completa de la muestra, es decir, coordenadas del punto de muestreo, altura topográfica, fecha y hora de muestreo, tipo de muestra, observaciones del lugar o condiciones de muestreo además de los datos de mediciones *in situ* de pH, conductividad y temperatura.

5 - Envío de muestras al laboratorio

- Las muestras deben ser recibidas en laboratorio dentro de las primeras 24 horas desde su muestreo.
- El envío debe realizarse embalado y protegiendo correctamente las muestras para evitar derrames. Las muestras deben ir protegidas de la luz solar y en lo posible viajar en frío.

- Se considera importante ponerse en contacto anteriormente con el laboratorio para anunciar el arribo de las muestras.
- 6 - Coordinación con Laboratorio para preparación de envases previo al muestreo
- Avisar con suficiente antelación al laboratorio la cantidad de envases que serán requeridos. Para ello calcular 4-5 días más el tiempo de traslado de los envases hasta el lugar de muestreo.
 - Prever cómo se enviarán las muestras de vuelta al laboratorio; cantidad de envíos, cajas, permisos, etc.

ANEXO D

MANUAL USO DE BEILER SOLINST 425

MATERIALES

1 - Medición en terreno

- Bailer Solinst modelo 425
- Manguera de 150 m para línea de aire y almacenamiento de muestra
- Cable de acero de 300 m de extensión
- Bombín con capacidad de presión máxima 230 psi
- Pozómetro de 150 m de extensión
- Cinta adhesiva

2 - Mantenimiento y operación del equipo

- Llave Inglesa
- Agua destilada
- Toalla Nova

- Paño
- Guantes de látex
- Destornilladores cruz, nº2.

MANUAL DE FUNCIONAMIENTO

3 - Funcionamiento tradicional

A - Determinar la profundidad de muestreo deseada y la profundidad del nivel estático.

B - Determinar la presión que debe ser aplicada al sistema mediante la ecuación:

$$P = PM - NE \cdot 1.411 + 10$$

- P : Presión (psi)
 PM : Profundidad de muestreo (m)
 NE : Profundidad de nivel estático (m)
 O : Mediante la Tabla 1:

Tabla 1 Presión para poner al bailer para toma de muestra.

Profundidad (m) bajo nivel estático	Presión (psi)
10	24
20	38
30	52
40	66
50	81
100	151
150	222

C - Conectar la manguera al bailer (Figura 3) y el cable de sujeción. Luego conectar el bombín o compresor a la entrada de presión (Figura 4).

D - Girar la válvula de presión/ventilación, hacia la señal de presión (pressure, Figura 4).

E -Cerrar la válvula de entrada y salida de agua del bailer (ubicada en su extremo inferior, Figura 2). *Muchas veces se encuentra aparentemente cerrada pero existe un escape de aire. En este caso abrir y cerrar la válvula repetidamente hasta que se solucione el problema. También, el problema puede ser solucionado tapando y destapando con el dedo el sector inferior de la válvula por donde se produce el escape.*

F - Presurizar el bailer hasta alcanzar la presión requerida.

G - Desconectar el bombín o compresor.

H - Bajar el bailer hasta la profundidad de muestreo deseada. *Tener especial cuidado en que tanto la manguera, como el cable de sujeción se encuentren siempre tirantes, de esta forma se asegura muestrear a la profundidad requerida y se evita que ambos cables se enreden. Para conocer la profundidad a la que se encuentra el bailer, la manguera puede ser marcada con cinta adhesiva a intervalos conocidos*

I - Girar la válvula de presión/ventilación a la posición de ventilación. Esperar dos minutos aproximadamente; esto permitirá que la manguera se llene hasta alcanzar el nivel estático.

J - Girar la válvula de presión/ventilación hacia la posición de presión y represurizar el sistema utilizando la misma presión determinada anteriormente.

K -Desconectar nuevamente el bombín o compresor y subir el bailer hacia la superficie.

L - Girar la válvula de presión/ventilación hacia la posición de ventilación. *Para facilitar la salida del flujo desde el bailer y la manguera, puede dejarse un remanente de presión al interior del sistema.*

M - Disponer el bailer sobre la botella de muestreo y abrir la válvula de entrada y salida de agua de éste.
Un volumen de muestreo cercano al litro, se obtiene al introducir el bailer hasta 40 m bajo el nivel de agua.

4 - Para el caso de profundidades de muestreos mayores a 60 metros bajo el nivel estático, se recomienda realizar el proceso por etapas, de esta forma, las modificaciones a la metodología serían:

- Antes de tomar la muestra:

A - Presurizar el sistema hasta 100 psi.

B - Bajar el bailer hasta una profundidad de 50m bajo el nivel estático.

C - A esa profundidad, aumentar la presión en el sistema hasta el máximo requerido.

D - Bajar el bailer hasta la profundidad deseada.

- Después de tomar la muestra:

A - Subir el bailer presurizado al máximo requerido hasta una profundidad de 50 metros bajo el nivel de agua.

B - Disminuir la presión hasta 100 psi.

C - Subir el bailer hasta la superficie.

5 Se recomienda limpiar el bailer después de cada muestreo. Para esto debe realizarse el siguiente procedimiento (detalle de las partes en figura n°5)

A - Desarmar el bailer.

B - Lavar todas sus componentes con jabón sin fosfatos o con un solvente suave (no usar acetona en los O - rings).

C - Enjuagar todo el sistema con agua desionizada y secar.

D - Rearmar el bailer.

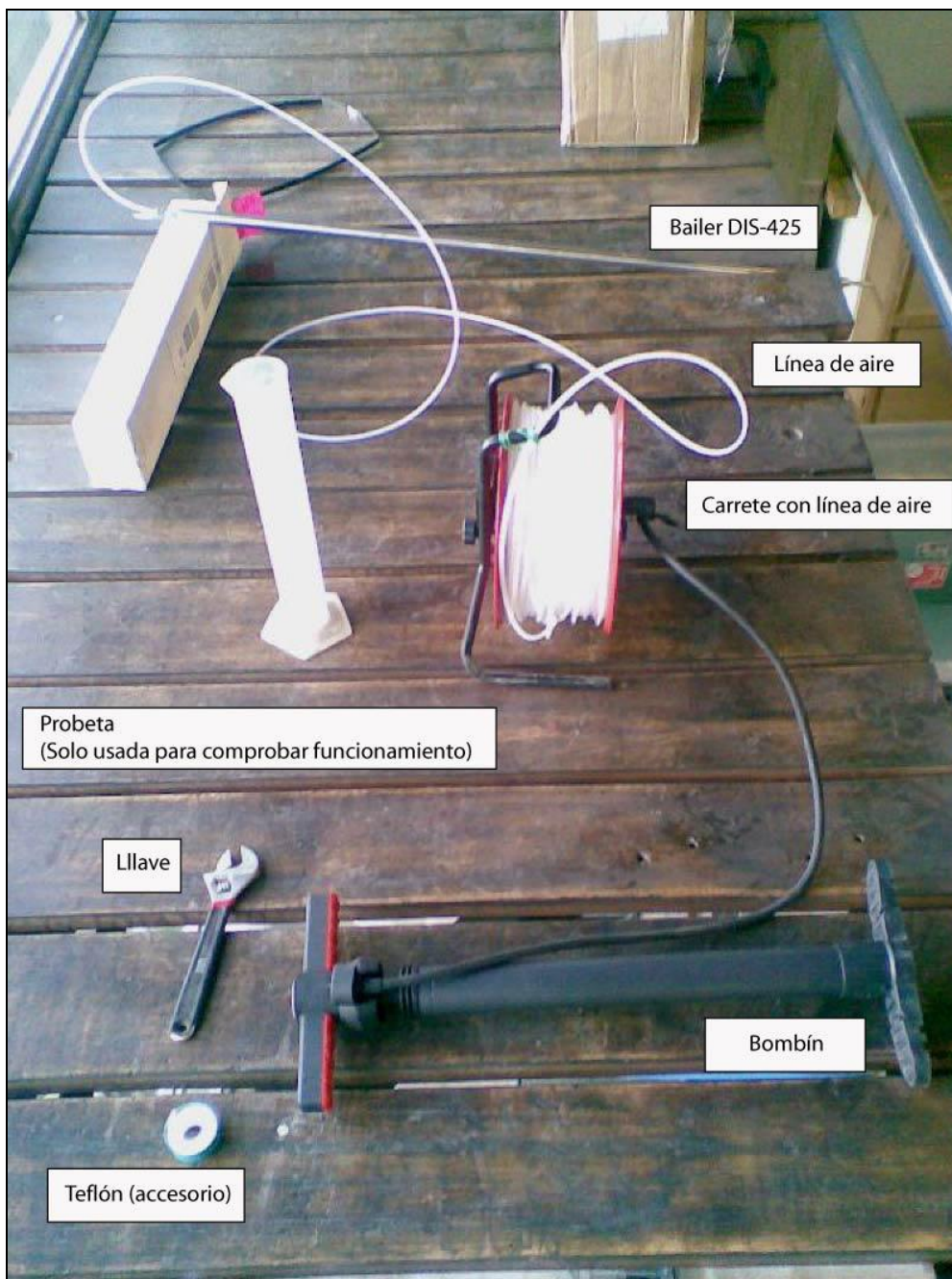


Figura 1 Accesorios sistema de muestreo desde aguas subterráneas.

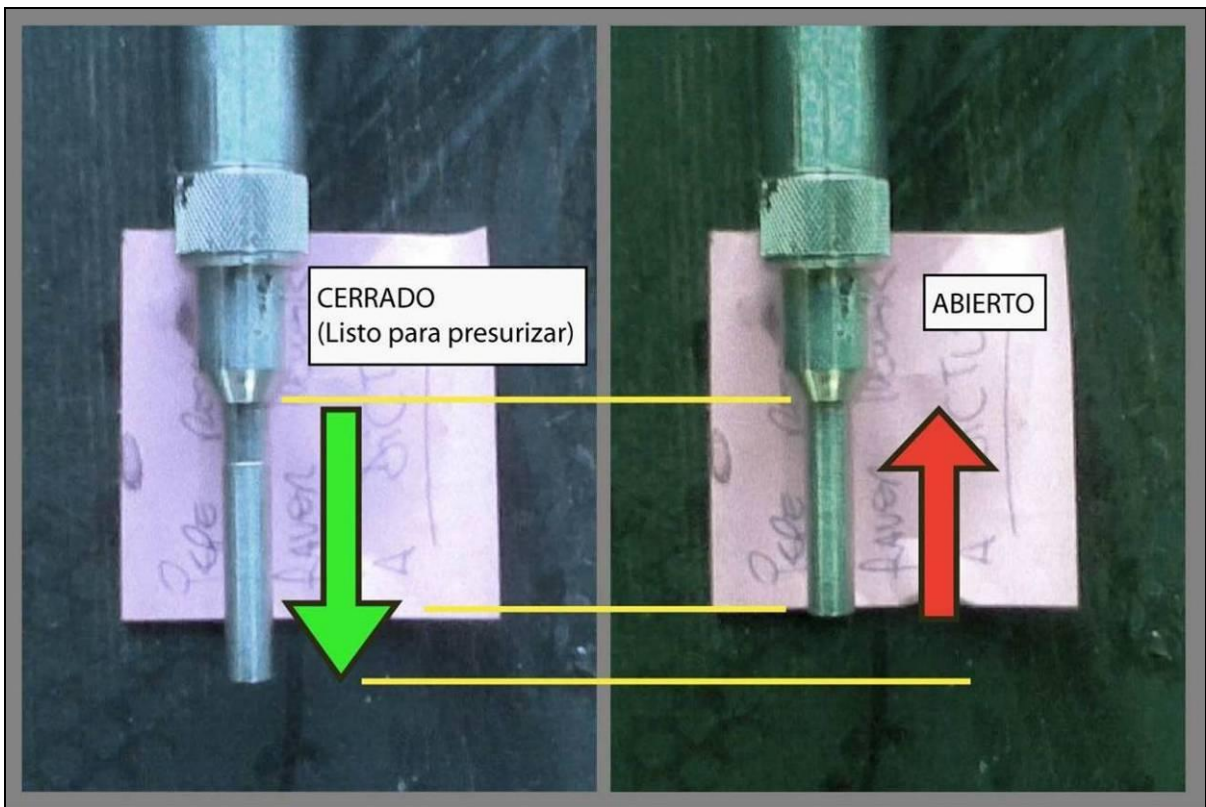


Figura 2 Detalle válvula de entrada y salida de agua.



Figura 3 Detalle conexión manguera.

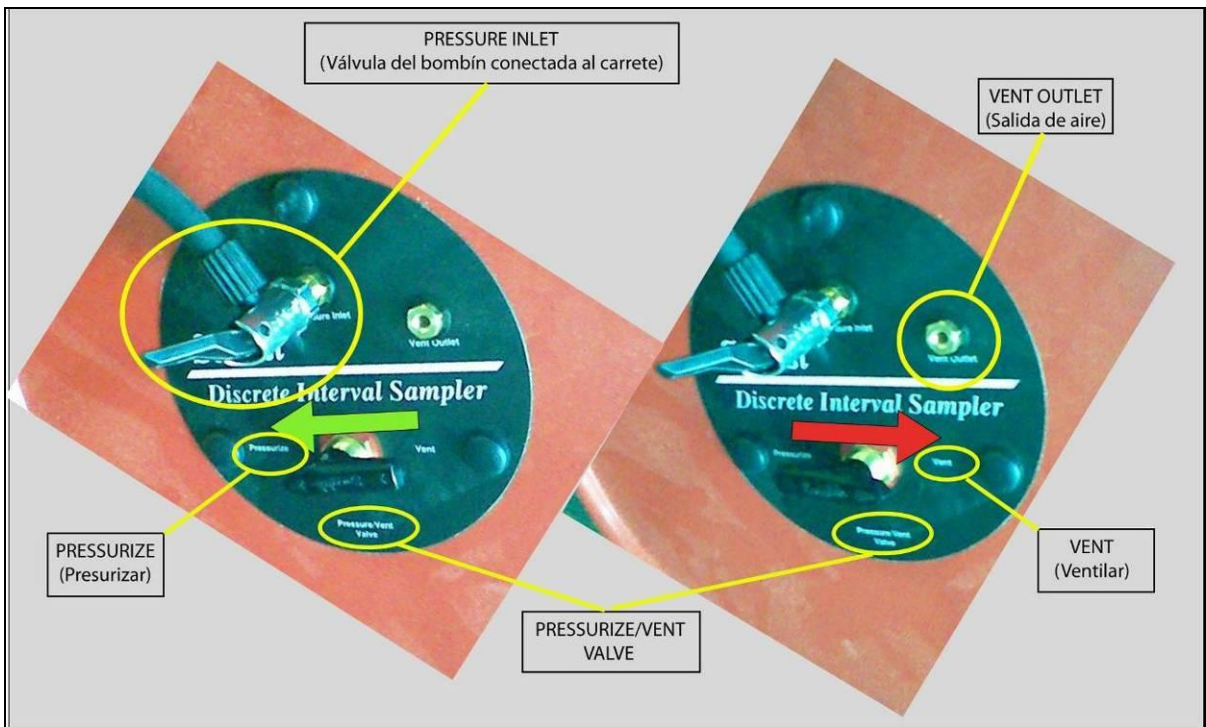


Figura 4 Detalle conexión de aire y válvula de presión/ventilación.

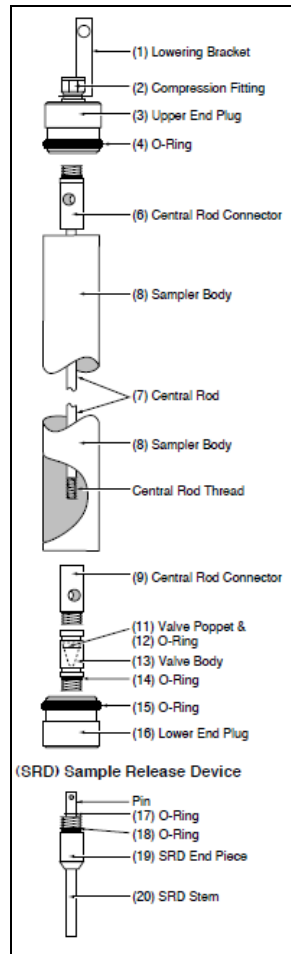


Figura 5 Componentes bailer Solinst



Figura 6 A la izquierda, parte superior bailer, conexión con manguera; a la derecha, parte inferior bailer, entrada de agua

ANEXO E

RESULTADOS LABORATORIO DICTUC



Formulario Documentación
Planilla 4: Resultados
FD-E.01-CHA

IDENTIFICACION

Muestras : Agua Cruda
Orden de trabajo : 3398
Análisis Solicitado : Químico
Fecha de Recepción : 28-10-2008
Solicitado por : **Dictuc S.A.**
Aguas Subterráneas
Aten.: Sr. José Antonio Yáñez

RESULTADOS

Muestra N°	12355	12356	12357	12358	12359	Fecha de Análisis	Método de Análisis
Identificación	LEJ.F005	AC2.F027	AC2.F025	LAC.F010	TUY.F032		
pH	8,28	7,96	7,53	8,56	7,11	29-10-08	Me-29-2007-siss
Conductividad Especifica	98500	4470	4220	98700	2750	29-10-08	Sm2510 b
Cloruro Disuelto (mg/L)	16539	1039,2	922,14	9100,2	579,35	13-11-08	10304-1
Nitratos Disueltos (mg/L)	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	13-11-08	10304-1
Sulfatos Disueltos (mg/L)	51325,47	687,35	675,59	2096,4	301,66	13-11-08	10304-1
Bicarbonato Disuelto (mg/L)	4094,7	98,9	110,4	268,4	198,1	29-10-08	Sm2320 b
Carbonato Disuelto (mg/L)	<0,02	<0,02	<0,02	31,2	<0,02	29-10-08	Sm2320 b
Calcio Disuelto (mg/L)	4892	517	460	1344	250	24-11-08	Sm3120 b
Sodio Disuelto (mg/L)	22830	356	322	4830	270	24-11-08	Sm3120 b
Potasio Disuelto (mg/L)	2134	28,1	24,2	250	19,3	24-11-08	Sm3120 b
Magnesio Disuelto (mg/L)	2850	56,2	40,8	397	29,6	24-11-08	Sm3120 b
Sílice (mg/L)	25,6	61,8	71,8	30,8	74,45	17-18-11-08	Sm3120 b
Aluminio (mg/L)	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	17-18-11-08	Sm3120 b
Hierro (mg/L)	1,55	0,47	<0,03	<0,03	<0,03	19-11-08	Sm3120 b
Boro(mg/L)	251	5,00	5,47	29,6	3,31	17-18-11-08	Sm3120 b
Litio (mg/L)	92,4	1,00	1,71	8,73	<0,01	19-11-08	Sm3120 b
Zinc (mg/L)	2,18	1,45	2,26	1,82	1,28	19-11-08	Sm3120 b
Manganeso (mg/L)	0,65	0,02	0,08	0,03	<0,01	19-11-08	Sm3120 b

* Método 10304-1 (10/13-10-08)

IDENTIFICACION

Muestras : Agua Cruda
 Orden de trabajo : 3398
 Análisis Solicitado : Químico
 Fecha de Recepción : 28-10-2008
 Solicitado por : **Dictuc S.A.**
Aguas Subterráneas
 Aten.: Sr. José Antonio Yáñez

RESULTADOS

Muestra N°	12360	12361	12362	12363	12364	Fecha de Análisis	Método de Análisis
Identificación	AC3.F032	AC3.F030	TUY.F031	AC2.F028	AC2.F026		
pH	7,59	7,81	8,01	7,37	7,47	29-10-08	Me-29-2007-siss
Conductividad Especifica	4020	18350	10850	3020	4980	29-10-08	Sm 2510 b
Cloruro Disuelto (mg/L)	880,01	2458,8	3012,0	744,74	1235,5	13-11-08	10304-1
Nitratos Disueltos (mg/L)	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	13-11-08	10304-1
Sulfatos Disueltos (mg/L)	549,09	461,94	654,38	192,07	528,32	13-11-08	10304-1
Bicarbonato Disuelto (mg/L)	182,8	79,3	349,4	189,2	112,9	29-10-08	Sm2320 b
Carbonato Disuelto (mg/L)	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	29-10-08	Sm2320 b
Calcio Disuelto (mg/L)	302	920	1296	302	522	24-11-08	Sm3120 b
Sodio Disuelto (mg/L)	352	765	656	268	398	24-11-08	Sm3120 b
Potasio Disuelto (mg/L)	29,4	18,6	16,3	15,2	25,6	24-11-08	Sm3120 b
Magnesio Disuelto (mg/L)	68,4	22,3	20,9	22,2	44,2	24-11-08	Sm3120 b
Sílice (mg/L)	63,7	33,0	60,2	50,1	51,9	18-11-08	Sm3120 b
Aluminio (mg/L)	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	18-11-08	Sm3120 b
Hierro (mg/L)	<0,03	0,06	<0,03	<0,03	<0,03	19-11-08	Sm3120 b
Boro(mg/L)	4,74	9,18	9,96	3,46	4,95	19-11-08	Sm3120 b
Litio (mg/L)	1,21	1,77	2,44	0,78	1,34	19-11-08	Sm3120 b
Zinc (mg/L)	0,99	0,82	1,11	0,97	0,63	19-11-08	Sm3120 b
Manganeso (mg/L)	0,06	0,01	<0,01	<0,01	<0,01	19-11-08	Sm3120 b

* Método 10304-1 (10/13-10-08)

IDENTIFICACION

Muestras : Agua Cruda
 Orden de trabajo : 3398
 Análisis Solicitado : Químico
 Fecha de Recepción : 28-10-2008
 Solicitado por : **Dictuc S.A.**
Aguas Subterráneas
 Aten,: Sr. José Antonio Yáñez

RESULTADOS

Muestra N°	12366	12367	Fecha de Análisis	Método de Análisis
Identificación	AC3.F031	AC2.F029		
pH	7,52	8,10	29-10-08	Me-29-2007-siss
Conductividad Especifica	4500	3250	29-10-08	Sm2510 b
Cloruro Disuelto (mg/L)	929,02	473,09	12-11-08	10304-1
Nitratos Disueltos (mg/L)	<0,5	<0,5	13-11-08	10304-1
Sulfatos Disueltos (mg/L)	764,46	398,90	12-11-08	10304-1
Bicarbonato Disuelto (mg/L)	143,5	822,4	29-10-08	Sm2520 b
Carbonato Disuelto (mg/L)	<0,02	<0,02	29-10-08	Sm2320 b
Calcio Disuelto (mg/L)	270	68,8	24-11-08	Sm3120 b
Sodio Disuelto (mg/L)	415	586	24-11-08	Sm3120 b
Potasio Disuelto (mg/L)	95,2	33,2	24-11-08	Sm3120 b
Magnesio Disuelto (mg/L)	101	60,7	24-11-08	Sm3120 b
Sílice (mg/L)	33,6	50,8	18-11-08	Sm3120 b
Aluminio (mg/L)	<0,10	<0,10	17-11-08	Sm3120 b
Hierro (mg/L)	<0,03	0,27	19-11-08	Sm3120 b
Boro(mg/L)	10,3	4,54	17-11-08	Sm3120 b
Litio (mg/L)	0,25	0,55	19-11-08	Sm3120 b
Zinc (mg/L)	0,64	2,28	19-11-08	Sm3120 b
Manganeso (mg/L)	0,06	0,20	19-11-08	Sm3120 b

* Método 10304-1 (10/13-10-08)

IDENTIFICACION

Muestras : Agua Cruda
 Orden de trabajo : 3467
 Análisis Solicitado : Químico
 Fecha de Recepción : 01-11-2008
 Solicitado por : **Dictuc S.A.**
Aguas Subterráneas
 Aten.: Sr, José Antonio Yáñez

RESULTADOS

Muestra N°	12597	12598	12599	12600	Fecha de Análisis	Método de Análisis
Identificación	PTN-T016	TUY.F033	AC2.T008	AC2.T007		
pH	7,66	8,26	6,53	7,13	31-10-08	Me-29-2007-SISS
Conductividad Especifica	4130	9650	30400	4430	31-10-08	SM 2510 B
Cloruro Disuelto (mg/L)	1353,08	2793,08	11038,67	1254,2	12-14-11-08	10304-1
Nitratos Disueltos (mg/L)	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	12-14-11-08	10304-1
Sulfatos Disueltos (mg/L)	272,45	533,43	168,06	499,45	12-14-11-08	10304-1
Bicarbonato Disuelto (mg/L)	63,13	276,70	33,89	79,66	31-10-08	SM 2320 B
Carbonato Disuelto (mg/L)	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	31-10-08	SM 2320 B
Calcio Disuelto (mg/L)	286	541	3388	273	27-11-08	SM 3120 B
Sodio Disuelto (mg/L)	462	1272	2632	547	27-11-08	SM 3120 B
Potasio Disuelto (mg/L)	97,1	101	252	49,2	27-11-08	SM 3120 B
Magnesio Disuelto (mg/L)	59,8	148	265	64,0	27-11-08	SM 3120 B
Silice (mg/L)	17,9	36,0	15,6	32,5	17-11-08	2313/25
Aluminio (mg/L)	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	17-11-08	2313/25
Hierro (mg/L)	0,75	0,26	110	0,22	19-11-08	SM 3120 B
Boro(mg/L)	449	5,99	23,9	4,11	17-11-08	2313/25
Litio (mg/L)	0,99	2,81	14,2	0,65	19-11-08	SM 3120 B
Zinc (mg/L)	2,49	1,27	1,55	0,35	19-11-08	SM 3120 B
Manganeso (mg/L)	0,78	0,10	28,6	0,34	19-11-08	SM 3120 B

* Método 10304-1 (10/13-10-08)

IDENTIFICACION

Muestras : Agua Cruda
 Orden de trabajo : 3467
 Análisis Solicitado : Químico
 Fecha de Recepción : 01-11-2008
 Solicitado por : **Dictuc S.A.**
Aguas Subterráneas
 Aten.: Sr, José Antonio Yáñez

RESULTADOS

Muestra N°	12601	12602	12603	12604	Fecha de Análisis	Método de Análisis
Identificación	LAC.F011	PTN.T017	AC3.T003	COL.T009		
pH	7,79	7,26	7,23	7,52	31-10-08	Me-29-207-SISS
Conductividad Especifica	34700	4980	11620	3830	31-10-08	SM 2510 B
Cloruro Disuelto (mg/L)	10944	1607,4	3384,2	925,6	14-11-08	10304-1
Nitratos Disueltos (mg/L)	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	14-11-08	10304-1
Sulfatos Disueltos (mg/L)	3221,3	65,53	708,26	440,43	14-11-08	10304-1
Bicarbonato Disuelto (mg/L)	274,16	82,84	332,635	164,83	31-10-08	SM 2320 B
Carbonato Disuelto (mg/L)	<0,02	<0,02	<0,02	<0,02	31-10-08	SM 2320 B
Calcio Disuelto (mg/L)	2463	254	792	178	27-11-08	SM 3120 B
Sodio Disuelto (mg/L)	4256	598	1479	612	27-11-08	SM 3120 B
Potasio Disuelto (mg/L)	759	89,6	151	53,6	27-11-08	SM 3120 B
Magnesio Disuelto (mg/L)	367	86,6	169	38,1	27-11-08	SM 3120 B
Sílice (mg/L)	50,2	21,9	66,6	63,6	17-11-08	2313/25
Aluminio (mg/L)	<0,10	<0,10	<0,10	<0,10	17-11-08	2313/25
Hierro (mg/L)	<0,03	0,69	<0,03	0,27	19-11-08	SM 3120 B
Boro(mg/L)	68,0	5,63	9,08	3,57	17-11-08	2313/25
Litio (mg/L)	22,7	2,36	3,11	0,56	19-11-08	SM 3120 B
Zinc (mg/L)	0,90	0,69	0,30	0,41	19-11-08	SM 3120 B
Manganeso (mg/L)	0,08	1,03	0,07	0,27	19-11-08	SM 3120 B

* Método 10304-1 (10/13-10-08)

IDENTIFICACION

Muestras : Agua Cruda
 Orden de trabajo : 3467
 Análisis Solicitado : Químico
 Fecha de Recepción : 01-11-2008
 Solicitado por : **Dictuc S.A.**
Aguas Subterráneas
 Aten.: Sr, José Antonio Yáñez


RESULTADOS

Muestra N°	12605	12606	12607	Fecha de Análisis	Método de Análisis
Identificación	AC3.F033	PTN.T015	COL.T008		
pH	7,10	7,70	7,47	31-10-08	Me-29-2007-SISS
Conductividad Especifica	13770	3890	4140	31-10-08	SM 2510 B
Cloruro Disuelto (mg/L)	4202,1	1097,1	994,29	14-11-08	10304-1
Nitratos Disueltos (mg/L)	<0,5	<0,5	<0,5	14-11-08	10304-1
Sulfatos Disueltos (mg/L)	581,33	244,52	458,55	14-11-08	10304-1
Bicarbonato Disuelto (mg/L)	355,52	86,01	181,36	31-10-08	SM 2320 B
Carbonato Disuelto (mg/L)	<0,02	<0,02	<0,02	31-10-08	SM 2320 B
Calcio Disuelto (mg/L)	874	286	130	27-11-08	SM 3120 B
Sodio Disuelto (mg/L)	1764	478	692	27-11-08	SM 3120 B
Potasio Disuelto (mg/L)	162	77,9	65,5	27-11-08	SM 3120 B
Magnesio Disuelto (mg/L)	221	24,0	52,8	27-11-08	SM 3120 B
Sílice (mg/L)	41,2	55,4	65,0	17-11-08	2313/25
Aluminio (mg/L)	<0,10	<0,10	<0,10	17-11-08	2313/25
Hierro (mg/L)	0,31	<0,03	0,55	19-11-08	SM 3120 B
Boro(mg/L)	9,64	5,58	3,62	17-11-08	2313/25
Litio (mg/L)	3,97	2,00	0,99	19-11-08	SM 3120 B
Zinc (mg/L)	0,79	1,44	0,60	19-11-08	SM 3120 B
Manganeso (mg/L)	0,08	0,11	0,30	19-11-08	SM 3120 B

* Método 10304-1 (10/13-10-08)

ANEXO F

RESULTADO LABORATORIO CCHEN

 <p style="text-align: center;">DEPARTAMENTO DE APLICACIONES LABORATORIO DE ISOTOPOS AMBIENTALES</p> <p style="text-align: center;">INFORME DE RESULTADOS SERVICIO DICTUC S.A</p> <p style="text-align: right;">9/12/2008</p>					
Muestra	Fecha	Identificación	Fecha de análisis	$\delta \text{‰}^{2}\text{H}$	$\delta \text{‰}^{18}\text{O}$
DICTUC-64	s/f	TJT-A1	20/11/2008	-70,8	-8,77
DICTUC-65	s/f	TJT-V1	20/11/2008	-78,7	-11,30
DICTUC-66	s/f	LAC-A1	20/11/2008	-26,4	1,80
DICTUC-67	s/f	AC3-V1	20/11/2008	-74,4	-9,91
DICTUC-68	s/f	AC3-V2	20/11/2008	-78,2	-10,77
DICTUC-69	s/f	AC3-V3	20/11/2008	-77,6	-10,77
DICTUC-70	s/f	AC2-A1	20/11/2008	-74,5	-10,18
DICTUC-71	s/f	AC2-A2	20/11/2008	-77,5	-10,56
DICTUC-72	s/f	AC2-A3	20/11/2008	-75,4	-10,24
DICTUC-73	s/f	AC2-V1	20/11/2008	-72,9	-9,53
DICTUC-74	s/f	AC2-V2	20/11/2008	-65,1	-6,73
DICTUC-75	s/f	LEJ-L1	20/11/2008	10,7	5,56
DICTUC-76	s/f	AC2-P1	20/11/2008	-78,9	-10,64
DICTUC-77	s/f	AC2-P2	20/11/2008	-78,2	-10,17
DICTUC-78	s/f	PN-P1	20/11/2008	-81,7	-11,11
DICTUC-79	s/f	PN-P2	24/11/2008	-81,8	-11,05
DICTUC-80	s/f	PN-P3	24/11/2008	-83,0	-11,07
DICTUC-81	s/f	LAC-A2	24/11/2008	-2,6	5,59
DICTUC-82	s/f	PC-P1	24/11/2008	-81,2	-11,24
DICTUC-83	s/f	PC-P2	24/11/2008	-80,9	-11,35
DICTUC-84	s/f	TJT-A2	24/11/2008	-65,6	-7,03
DICTUC-85	s/f	AC3-P1	24/11/2008	-79,3	-10,72
DICTUC-86	s/f	AC3-V4	24/11/2008	-80,2	-10,32

Nota: Resultados expresados en $\delta \text{‰}$ (delta por mil) referido a SMOW
Error analítico en Oxígeno-18 es de +/- 0,05 $\delta \text{‰}$ y en Deuterio es de +/- 1 $\delta \text{‰}$

ANEXO G

1-CARACTERISTICAS DE MUESTRAS Y PARAMETROS IN SITU

CODIGO MUESTRA A	NOMBRE MUESTRA 1	TIPO DE AGUA	FECHA MUESTREO	REFERENCIA	ID CCA	UTM NORTE	UTM ESTE	ALTITUD (MSNM)	PROF. (M)	pH IN SITU	COND. IN SITU (mS/cm)	TEM P. IN SITU (°C)	pH	COND. (uS/cm)	TDS (mg/l)
AC2.S001	E-1	Superficial	11/19/2004	WMC 2004-2005	SAC 2	7397204	644654		0	-	-	-	-	-	6964
AC2.S002	E-2	Superficial	12/19/2004	WMC 2004-2005	SAC 2	7398464	643090		0	-	-	-	-	-	88968
AC2.S003	AC-1	Superficial	1/28/2005	WMC 2004-2005	SAC 2	7397149	644719		0	-	-	-	-	-	7512
AC2.S004	AC-2	Superficial	1/28/2005	WMC 2004-2005	SAC 2	7398503	642904		0	-	-	-	-	-	181672
AC2.S005	AC-3	Superficial	1/28/2005	WMC 2004-2005	SAC 2	7397503	645560		0	-	-	-	-	-	1129
AC2.F008	AC2-A1	Superficial	10/27/2008	DICTUC	SAC 2	7397163	644699	4212	0	7.25	-	18.9	7.53	4220	-
AC2.F009	AC2-A2	Superficial	10/27/2008	DICTUC	SAC 2	7397292	644952	4208		7.17	-	15.6	7.47	4980	-
AC2.F010	AC2-A3	Superficial	10/27/2008	DICTUC	SAC 2	7397164	644782	4210	0	7.19	-	16.5	7.96	4470	-
AC2.F011	AC2-V1	Superficial	10/27/2008	DICTUC	SAC 2	7398491	642914	4208	0	6.72	-	8.3	7.37	3020	-
AC2.F012	AC2-V2	Superficial	10/27/2008	DICTUC	SAC 2	7407690	641053	4317	0	7.89	-	-1.5	8.1	3250	-
AC2.T001.1	LAAR-1	Subterránea	12/9/2004	WMC 2004-2005	SAC 2	7388880	648364		186	-	-	15.8	8.2	3300	2046
AC2.T001.3	LAAR-1	Subterránea		WMC 2004-2005	SAC 2	7388880	648364		230	-	-	21.8	7.5	40200	24675
AC2.T002.1	LAAR-2	Subterránea	12/11/2004	WMC 2004-2005	SAC 2	7394197	644993		54	-	-	20.3	7.8	5100	3242
AC2.T002.2	LAAR-2	Subterránea	12/11/2004	WMC 2004-2005	SAC 2	7394197	644993		150	-	-	20.3	7.5	25700	14001
AC2.T007.1	AC2-P1	Subterránea	10/28/2008	DICTUC	SAC 2	7395562	645244	4234	0	6.76		12.1	7.13	4430	-
AC2.T007.2	AC2-P2	Subterránea	10/29/2008	DICTUC	SAC 2	7395562	645244	4234	80	6.52		15.2	6.53	30400	-
PN.F001	NIEVE	Superficial	9/15/2005	WMC 2004-2005	PN	7373862	655767		0	-	-	-	-	-	14975
PN.T001.1	PNAR-1	Subterránea	12/8/2004	WMC 2004-2005	PN	7378686	661521		190	-	-	21.3	7.8	4600	2186
PN.T001.2	PNAR-1	Subterránea	12/8/2004	WMC	PN	7378686	661521		225	-	-	17.9	7.6	4600	2180

				2004-2005												
PN.T002.1	PNAR-2	Subterránea	12/10/2004	WMC 2004-2005	PN	7384776	660767		162	-	-	12.1	7.5	100	466	
PN.T002.4	PNAR-2	Subterránea	12/13/2004	WMC 2004-2005	PN	7384776	660767		245.2	-	-	14.3	8.9	600	332	
PN.T003.1	PNAR-3	Subterránea	12/4/2004	WMC 2004-2005	PN	7383662	656456		156	-	-	15.8	9.4	1700	963	
PN.T004.1	PNAR-4	Subterránea	12/5/2004	WMC 2004-2005	PN	7384162	657730		210	-	-	15.8	8.0	600	341	
PN.T005.1	PNPZ-1	Subterránea	11/26/2004	WMC 2004-2005	PN	7381107	658132		77	-	-	22.9	7.9	4900	2559	
PN.T005.2	PNPZ-1	Subterránea	11/26/2004	WMC 2004-2005	PN	7381107	658132		108.4	-	-	22.9	7.7	4600	2438	
PN.T005.3	PNPZ-1	Subterránea	11/27/2004	WMC 2004-2005	PN	7381107	658132		250	-	-	23.8	7.8	4900	2464	
PN.T006.1	PNPZ-2	Subterránea	11/27/2004	WMC 2004-2005	PN	7379267	658125		78.3	-	-	28.4	7.5	4700	2413	
PN.T007.1	PN-1A	Subterránea		INGEORE C (EMSA)	PN	7379393	658068			-	-	-	6.8	4000	2820	
PN.T007.4	PN-1A	Subterránea	1/9/2005	WMC 2004-2005	PN	7379393	658068			-	-	36	6.5	6700	6575	
PN.T007.5	PN-1A	Subterránea	1/16/2005	WMC 2004-2005	PN	7379393	658068			-	-	34.3	6.4	6500	6805	
PN.T007.6	PN-1A	Subterránea	1/20/2005	WMC 2004-2005	PN	7379393	658068			-	-	-	-	-	6823	
PN.T008.2	PN-9	Subterránea	12/22/2004	WMC 2004-2005	PN	7381033	657973			-	-	29.8	6.6	5000	2398	
PN.T008.4	PN-9	Subterránea	1/16/2005	WMC 2004-2005	PN	7381033	657973			-	-	29.4	6.6	5200	5870	
PN.T008.5	PN-9	Subterránea	1/20/2005	WMC 2004-2005	PN	7381033	657973			-	-	-	-	-	5816	
PN.T014	PN-P1	Subterránea	10/29/2008	DICTUC	PN	7380945	658400	4383	105	7.71		14.7	7.7	3890	-	
PN.T015	PN-P2	Subterránea	10/29/2008	DICTUC	PN	7379366	658091	4361	75	7.63		17	7.6 6	4130	-	
PN.T016	PN-P3	Subterránea	10/29/2008	DICTUC	PN	7379366	658091	4361	125	7.26		16	7.2 6	4980	-	
TUY.F004	NIEVE P.A.	Nieve	9/15/2005	WMC 2004-2005	TUY	7355454	649013		0	-	-	-	-	-	783	
TUY.F005	TJ-1	Superficial	1/24/2005	WMC 2004-2005	TUY	7354124	645264		0	-	-	33.2	6.3	2900	1869	
TUY.F006	TJ-2	Superficial	1/24/2005	WMC 2004-2005	TUY	7352882	643724		0	-	-	22.8	6.3	10300	10228	
TUY.F007	TJ-3	Superficial	1/24/2005	WMC 2004-2005	TUY	7351828	644753		0	-	-	15.8	8.1	11400	11757	
TUY.F008	TJ-4	Superficial	1/24/2005	WMC 2004-2005	TUY	7350845	644666		0	-	-	15.3	7.4	5700	5041	
TUY.F009	TJ-5	Superficial	1/24/2005	WMC 2004-2005	TUY	7350500	643701		0	-	-	13.2	8.3	12800	11484	

TUY.F010	TJ-6	Superficial	1/25/2005	WMC 2004-2005	TUY	7350993	642788		0	-	-	12.7	7.6	-	215285
TUY.F011	TJ-7	Superficial	1/29/2005	WMC 2004-2005	TUY	7354153	645318		0	-	-	-	-	-	1794
TUY.F024	TU-1	Superficial	9/9/2006	Geoaguas	TUY	7354129	645263	4056	0	-	-	30.8	6.9	2710	1592
TUY.F025	TU-2	Superficial	9/9/2006	Geoaguas	TUY	7353607	644629	4056	0	-	-	10.7	8.1	2970	1833
TUY.F026	TU-3	Superficial	9/9/2006	Geoaguas	TUY	7352749	644158	4054	0	-	-	12.9	8.0	4160	2345
TUY.F027	TU-4	Superficial	9/9/2006	Geoaguas	TUY	7352804	643946	4054	0	-	-	24.7	6.9	10170	6307
TUY.F028	TU-5	Superficial	9/10/2006	Geoaguas	TUY	7350577	643740		0	-	-	17	8.0	7850	5065
TUY.F029	TU-6	Superficial	9/10/2006	Geoaguas	TUY	7351831	644753	4059	0	-	-	18	7.8	10100	6327
TUY.F030	LTU-1	Superficial	9/9/2006	Geoaguas	TUY	7352474	644179	4056	0	-	-	13.5	7.5	-	-
TUY.F031	TJT-A1	Superficial	10/26/2008	DICTUC	TUY	7351843	644733	4056	0	-	-	9.6	8.0 1	10850	
TUY.F032	TJT-VI	Superficial	10/26/2008	DICTUC	TUY	7354166	645296	4052	0	-	-	23.5	7.1 1	2750	
TUY.F033	TJT-A2	Superficial	10/30/2008	DICTUC	TUY	7350324	643814	4060	0	-	-	10.2	8.2 6	9650	
TUY.T001. 1	PAAR-1	Subterranea	1/13/2005	WMC 2004-2005	TUY	7348212	643170	4069.05	48	-	-	15	7.6	8000	5999
TUY.T001. 2	PAAR-1	Subterranea	1/15/2005	WMC 2004-2005	TUY	7348212	643170	4069.05	101.2	-	-	-	7.6	-	5459
TUY.T001. 3	PAAR-1	Subterranea	1/15/2005	WMC 2004-2005	TUY	7348212	643170	4069.05	131.2	-	-	-	7.6	-	6408
TUY.T001. 4	PAAR-1	Subterranea	1/15/2005	WMC 2004-2005	TUY	7348212	643170	4069.05	150	-	-	-	7.2	9600	6151
TUY.T001. 5	PAAR-1	Subterranea	1/15/2005	WMC 2004-2005	TUY	7348212	643170	4069.05	202	-	-	21.6	7.2	11900	7607
TUY.T002. 1	PAAR-3	Subterranea	1/16/2005	WMC 2004-2005	TUY	7351655	646820	4075.8	96	-	-	20.1	8.0	8000	3970
TUY.T002. 2	PAAR-3	Subterranea	1/16/2005	WMC 2004-2005	TUY	7351655	646820	4075.8	200	-	-	23.3	7.7	15000	8164
COL.T001 .1	PCPZ-3	Subterranea	1/1/2005	WMC 2004-2005	COL	7356530	654771	4290.75	138	-	-	24.5			2803
COL.T001 .2	PCPZ-3	Subterranea	1/1/2005	WMC 2004-2005	COL	7356530	654771	4290.75	156	-	-	25.7			4744
COL.T001 .3	PCPZ-3	Subterranea	1/2/2005	WMC 2004-2005	COL	7356530	654771	4290.75	186	-	-	28.7	7.3	-	10258
COL.T001 .4	PCPZ-3	Subterranea	1/2/2005	WMC 2004-2005	COL	7356530	654771	4290.75	230	-	-	27.4	7.3	18320	12012
COL.T002 .2	PCPZ-4	Subterranea	12/15/2004	WMC 2004-2005	COL	7357388	653155	4270.49	209	-	-	29.6	7.4	22900	14060
COL.T003	PCAR-1	Subterranea	12/19/2004	WMC 2004-2005	COL	7359584	654612	4364.14	216	-	-	21.2	7.9	12250	7375
COL.T004 .1	PC-1	Subterranea	2/10/2005	WMC 2004-2005	COL	7357059	654028	4283.64		-	-	31.9	6.2	11500	7233

COL.T004 .2	PC-1	Subterranea	3/2/2005	WMC 2004-2005	COL	7357059	654028	4283.64		-	-	36	6.2	14500	
COL.T006 .1	PC-3	Subterranea	3/10/2005	WMC 2004-2005	COL	7357511	653109	4269.07		-	-	36.5	6.2	10400	6547
COL.T006 .2	PC-3	Subterranea	3/2/2005	WMC 2004-2005	COL	7357511	653109	4269.07		-	-	38.7	6.6	9000	
COL.T008 .2	PC-2	Subterranea	10/30/2008	DICTUC	COL	7358029	652249	4277	100	-	-	20.9	7.5 2	3830	
COL.T008 .1	PC-2	Subterranea	10/30/2008	DICTUC	COL	7358029	652249	4277	140	-	-	20.7	7.4 7	4140	
TEC.F001	NIEVE L.T.	Nieve	9/15/2005	WMC 2004-2005	TEC	7344413	655231		0	-	-	-	-	-	15
TEC.T001	LTAR-1	Subterranea	1/20/2005	WMC 2004-2005	TEC	7351626	652490	4275.7	227.1	-	-	16.8	7.7	7630	923
TEC.T002. 1	LTAR-2	Subterranea	2/2/2005	WMC 2004-2005	TEC	7348045	655137	4288.97	221.2	-	-	22.2	7.3	500	237
TEC.T002. 2	LTAR-2	Subterranea	2/2/2005	WMC 2004-2005	TEC	7348045	655137	4288.97	245.2	-	-	22	7.5	400	226
TEC.T002. 3	LTAR-2	Subterranea	2/2/2005	WMC 2004-2005	TEC	7348045	655137	4288.97	280	-	-	18.2	8.3	800	394
TEC.T003. 1	LTPZ-5	Subterranea	1/27/2005	WMC 2004-2005	TEC	7352744	654266	4182.11	118	-	-	12.3	7.6	1200	639
TEC.T003. 2	LTPZ-5	Subterranea	1/27/2005	WMC 2004-2005	TEC	7352744	654266	4182.11	125.2	-	-	13.3	7.8	1300	611
TEC.T003. 3	LTPZ-5	Subterranea	1/28/2005	WMC 2004-2005	TEC	7352744	654266	4182.11	137.2	-	-	12.3	7.6	1200	737
TEC.T003. 4	LTPZ-5	Subterranea	1/29/2005	WMC 2004-2005	TEC	7352744	654266	4182.11	197	-	-	16.7	7.7	5700	2189
TEC.T004	LTPZ-6A	Subterranea	1/15/2005	WMC 2004-2005	TEC	7352940	654803	4187.82	122	-	-		7.8	2800	1959
TEC.T005. 1	LTPZ-6B	Subterranea	2/4/2005	WMC 2004-2005	TEC	7353115	654770	4185.9	122	-	-	16.6	7.9	5700	3798
TEC.T005. 2	LTPZ-6B	Subterranea	2/4/2005	WMC 2004-2005	TEC	7353115	654770	4185.9	179.2	-	-	21.7	7.5	10200	6039
TEC.T005. 3	LTPZ-6B	Subterranea	2/5/2005	WMC 2004-2005	TEC	7353115	654770	4185.9	216	-	-	21.3	7.5	11500	7001
TEC.T006. 1	PT-1	Subterranea	3/22/2005	WMC 2004-2005	TEC	7352737	654192	4181.56		-	-	17.7	6.4	4490	2530
TEC.T006. 2	PT-1	Subterranea	3/29/2005	WMC 2004-2005	TEC	7352737	654192	4181.56		-	-	19	6.5	5370	2021
TEC.T006. 3	PT-1	Subterranea	3/29/2005	WMC 2004-2005	TEC	7352737	654192	4181.56		-	-	-	-	-	-
TEC.T006. 5	PT-1	Subterranea	4/12/2005	WMC 2004-2005	TEC	7352737	654192	4181.56		-	-	-	-	-	-
TEC.T006. 6	PT-1	Subterranea	4/12/2005	WMC 2004-2005	TEC	7352737	654192	4181.56		-	-	-	-	-	-
TEC.T011. 1	PT-6	Subterranea	3/22/2005	WMC 2004-2005	TEC	7353071	654938	4188.44		-	-	21.3	6.4	10120	6041

TEC.T011.2	PT-6	Subterranea	3/29/2005	WMC 2004-2005	TEC	7353071	654938	4188.44		-	-	22	6.5	10100	6469
TEC.T011.3	PT-6	Subterranea	3/29/2005	WMC 2004-2005	TEC	7353071	654938	4188.44		-	-	-	-	-	-
TEC.T011.5	PT-6	Subterranea	4/12/2005	WMC 2004-2005	TEC	7353071	654938	4188.44		-	-	-	-	-	-
TEC.T011.6	PT-6	Subterranea	4/12/2005	WMC 2004-2005	TEC	7353071	654938	4188.44		-	-	-	-	-	-
LAC.P001	LLUVIA LAC	Precipitacion	1/1/2006	Geoaguas	LAC	7364285	658593	4307	0	-	-	-	6.9	30	<10
LAC.F004	LA-1	Superficial	9/7/2006	Geoaguas	LAC	7365048	662194	4253	0	-	-	6.4	7.8	2490	1539
LAC.F005	LA-2	Superficial	9/7/2006	Geoaguas	LAC	7361610	663259	4256	0	-	-	8.6	7.5	4370	2659
LAC.F006	LA-3	Superficial	9/7/2006	Geoaguas	LAC	7358425	661312	4255	0	-	-	3.2	8.4	6790	3199
LAC.F007	LA-6	Superficial	9/8/2006	Geoaguas	LAC	7361783	660379	4251	0	-	-	9.5	9.0	41600	28639
LAC.F008	LA-7	Superficial	9/29/2006	Geoaguas	LAC	7361804	661508	4251	0	-	-	6.5	8.1	42500	26353
LAC.F009	LAC-A1	Superficial	10/26/2008	DICTUC	LAC	7357745	662787	4243	0	-	-	0.1	8.5 6	98700	
LAC.F010	LAC-A2	Superficial	10/30/2008	DICTUC	LAC	7364661	661289	4252	0	-	-	-3.8	7.7 9	34700	
LAC.T002	LA-4	Subterranea	9/7/2006	Geoaguas	LAC	7362400	662150	4255		-	-	5.5	7.5	183200	149393
LAC.T003	LA-5	Subterranea	9/8/2006	Geoaguas	LAC	7363400	661350			-	-	5.6	7.2	63200	43576
LAC.T004	LA-8	Subterranea	9/29/2006	Geoaguas	LAC	7361993	660459	4253		-	-	7.1	9.6	1270	665
LAC.T005.1	PCAR-2	Subterranea	12/21/2004	WMC 2004-2005	LAC	7356418	660098	4312.48	108	-	-	15.8	8.3	470	316
LAC.T005.5	PCAR-2	Subterranea	12/23/2004	WMC 2004-2005	LAC	7356418	660098	4312.48	168	-	-	13.8	8.1	510	225

2-ELEMENTOS MAYORITARIOS E ISOTOPOS

CODIGO MUESTRA	UTM NORTE	UTM ESTE	ALTITUD (MSNM)	Cl- (mg/L)	SO4= (mg/L)	HCO3- (mg/L)	NO3- (mg/L)	Na+ (mg/L)	K+ (mg/L)	Mg++ (mg/L)	Ca++ (mg/L)	δD (‰)	δ ¹⁸ O (‰)	H ³
AC2.S001	7397204	644654		1080	820	67	0.67	466	71.8	56.4	363	-72.8	-9.86	-
AC2.S002	7398464	643090		16700	1770	114	1	5520	582	518	3660	-1.7	3.79	-
AC2.S003	7397149	644719		3890	788	90	4.04	1910	122	177	272	-74	-10.6	-
AC2.S004	7398503	642904		33100	3060	98	5	130000	10400	7490	485	-73.6	-9.43	-
AC2.S005	7397503	645560		643	329	104	0.63	456	45.5	30.8	83.5	-66.2	-7.37	-
AC2.F008	7397163	644699	4212	922.14	675.59	110.4	<0,5	322	24.2	40.8	460	-74.5	-10.18	
AC2.F009	7397292	644952	4208	1235.5	528.32	112.9	<0,5	398	25.6	44.2	522	-77.5	-10.56	
AC2.F010	7397164	644782	4210	1039.2	687.35	98.9	<0,5	356	28.1	56.2	517	-75.4	-10.24	

AC2.F011	7398491	642914	4208	744.74	192.07	189.2	<0,5	268	15.2	22.2	302	-72.9	-9.53	
AC2.F012	7407690	641053	4317	473.09	398.9	822.4	<0,5	586	33.2	60.7	68.8	-65.1	-6.73	
AC2.T001.1	7388880	648364		809	227	175	0.9	419	45.1	91.9	278	-84.1	-10.7	-
AC2.T001.3	7388880	648364		19100	200	247	2	2210	353	573	1990	-82.5	-10.31	-
AC2.T002.1	7394197	644993		1340	597	87	0.7	556	72.7	55	534	-79	-10.6	-
AC2.T002.2	7394197	644993		8340	522	66	1.5	2180	177	144	2570	-77.8	-10.34	-
AC2.T007.1	7395562	645244	4234	1254.2	499.45	79.66	<0,5	547	49.2	64	273	-78.9	-10.64	
AC2.T007.2	7395562	645244	4234	11038.67	168.06	33.89	<0,5	2632	252	265	3388	-78.2	-10.17	
PN.F001	7373862	655767		7.6	17.2	-	0.4	7640	1640	1500	4170	-63	-8.8	-
PN.T001.1	7378686	661521		979	164	293	0.6	285	45.4	158	261	-87.4	-10.97	-
PN.T001.2	7378686	661521		982	175	298	0.4	287	46.6	143	248	-86.9	-11.03	-
PN.T002.1	7384776	660767		35.4	43.8	54	0.6	154	11.4	17.6	149	-82.9	-10.1	-
PN.T002.4	7384776	660767		57.1	47	122	0.5	51.8	4.1	25	24.8	-83.5	-10.19	-
PN.T003.1	7383662	656456		437	138	93	1.22	0	53.4	187	41.3	-83	-10.44	-
PN.T004.1	7384162	657730		25.7	50.8	145	1.42	0	47.6	39.6	11.6	-87.2	-10.74	-
PN.T005.1	7381107	658132		1250	289	62	0.58	0	39.2	528	116	-80.2	-11.03	-
PN.T005.2	7381107	658132		1220	284	35	0.58	0	65.8	478	99.2	-81.4	-10.95	-
PN.T005.3	7381107	658132		1190	259	131	0.45	0	63.4	451	94.2	-82.9	-11.07	-
PN.T006.1	7379267	658125		1220	242	41	0.55	0	78.2	503	112	-82	-11.11	-
PN.T007.1	7379393	658068		1438.1	232.5	187.5	0	108.6	14.5	176.5	603	-82.7	-11.1	-
PN.T007.4	7379393	658068		1510	246	138	0.3	593	107	115	308	-79.8	-11.17	-
PN.T007.5	7379393	658068		1540	255	140	0.4	597	108	108	319	-82.8	-11.24	-
PN.T007.6	7379393	658068		1550	254	142	0.1	590	111	119	316	-82.5	-11.15	-
PN.T008.2	7381033	657973		1260	301	47	0.4	425	87.7	33.4	243	-81.4	-11.21	-
PN.T008.4	7381033	657973		1240	305	70	0.6	442	87.6	35.1	269	-82	-11.18	-
PN.T008.5	7381033	657973		1250	310	56	0.6	437	89.7	35	267	-81.9	-10.97	-
PN.T014	7380945	658400	4383	1097.1	244.52	86.01	<0,5	478	77.9	24	286	-81.7	-11.11	
PN.T015	7379366	658091	4361	1353.08	272.45	63.13	<0,5	462	97.1	59.8	286	-81.8	-11.05	
PN.T016	7379366	658091	4361	1607.4	65.53	82.84	<0,5	598	89.6	86.6	254	-83	-11.07	
TUY.F004	7355454	649013		8.32	19.7	-	0.4	0.15	0.09	0.02	0.35	-61.7	-8.59	-
TUY.F005	7354124	645264		656	334	170	3.0	474	43.4	28.5	81.7	-77.3	-11.32	-
TUY.F006	7352882	643724		3290	746	190	0.2	1750	119	127	260	-78.5	-10.92	-
TUY.F007	7351828	644753		3950	862	176	2.2	1890	140	158	290	-70.6	-9.06	-
TUY.F008	7350845	644666		1450	306	163	0.9	777	42.5	77.6	166	-80	-9.98	-
TUY.F009	7350500	643701		3890	788	172	4.0	1910.0	122	177	272	-56.8	-5.47	-

TUY.F010	7350993	642788		33100	3060	611	5.0	130000	10400	7490	485	16.9	-0.12	-
TUY.F011	7354153	645318		643	329	126	0.6	456	45.5	30.8	83.5	-77.6	-11.26	-
TUY.F024	7354129	645263	4056	588	322	181.78	0.4	413	36.9	25.9	71	-77.9	-11.25	-
TUY.F025	7353607	644629	4056	661	362	215.94	0.1	469	44.1	30	81	-75.4	-10.63	-
TUY.F026	7352749	644158	4054	1096	440	211.06	0.7	675	55.6	47.2	115.5	-67.8	-9.19	-
TUY.F027	7352804	643946	4054	2963	717	284.26	0.3	1760	106.5	116.5	266	-78.8	-10.88	-
TUY.F028	7350577	643740		2390	553	226.92	0.0	1380	73.2	110	218	-67.2	-8.46	-
TUY.F029	7351831	644753	4059	3037	677	296.46	0.0	1825	104	129.5	283	-75.5	-9.8	-
TUY.F030	7352474	644179	4056	-	-	-	-	-	-	-	-	-15.6	0.61	-
TUY.F031	7351843	644733	4056	3012	654.38	349.4	<0,5	656	16.3	20.9	1296	-70.8	-8.77	-
TUY.F032	7354166	645296	4052	579.35	301.66	198.1	<0,5	270	19.3	29.6	250	-78.7	-11.3	-
TUY.F033	7350324	643814	4060	2793.08	533.43	276.7	<0,5	1272	101	148	541	-65.6	-7.03	-
TUY.T001.1	7348212	643170	4069.05	3110	623	200	1.9	1460	89.1	182	333	-78.9	-10.04	-
TUY.T001.2	7348212	643170	4069.05	2980	578	225	2.0	1130	90.1	160	294	-81.4	-10.35	-
TUY.T001.3	7348212	643170	4069.05	3140	608	225	1.7	1840	101	180	313	-81.2	-10.41	-
TUY.T001.4	7348212	643170	4069.05	3310	618	215	1.3	1430	93	176	307	-81.6	-10.39	-
TUY.T001.5	7348212	643170	4069.05	4150	690	257	1.6	1840	117	191	360	-81.4	-10.41	-
TUY.T002.1	7351655	646820	4075.8	2010	476	205	1.6	921	59.2	100	197	-81.8	-10.2	-
TUY.T002.2	7351655	646820	4075.8	4420	645	298	1.6	1980	102	251	466	-83.4	-10.46	-
COL.T001.1	7356530	654771	4290.75	1240	520	118	1.3	752	59	68.6	127	-78.8	-10.66	-
COL.T001.2	7356530	654771	4290.75	2200	755	211	1.0	1150	92	129	206	-78.8	-10.54	-
COL.T001.3	7356530	654771	4290.75	5170	1260	300	0.5	2720	189	221	397	-78.9	-10.26	-
COL.T001.4	7356530	654771	4290.75	5600	1370	473	0.5	3520	291	273	485	-79.2	-10.33	-
COL.T002.2	7357388	653155	4270.49	6820	1660	655	1.0	3820	288	289	527	-81	-10.22	-
COL.T003	7359584	654612	4364.14	3510	895	440	0.5	1930	125	179	295	-81.3	-9.82	-
COL.T004.1	7357059	654028	4283.64	3200	880	324	0.7	2140	122	159	326	-81.5	-10.69	<0,8+/- 0,5
COL.T004.2	7357059	654028	4283.64	-	-	-	-	-	-	-	-	-81.4	-10.59	<0,8+/- 0,5
COL.T006.1	7357511	653109	4269.07	2700	809	320	0.7	2120	119	130	259	-81.1	-10.85	1,5+/- 0,6
COL.T006.2	7357511	653109	4269.07	-	-	-	-	-	-	-	-	-80.4	-10.89	<0,8+/- 0,5
COL.T008.2	7358029	652249	4277	925.6	440.43	164.83	<0,5	612	53.6	38.1	178	-80.9	-11.35	
COL.T008.1	7358029	652249	4277	994.29	458.55	181.36	<0,5	692	65.5	52.8	130	-81.2	-11.24	
TEC.F001	7344413	655231		1.01	0.67	-	0.1	7.58	1.7	1.5	4.0	-19.3	-5.31	-
TEC.T001	7351626	652490	4275.7	735	158	132	1.7	438	26.1	44.5	92.1	-81.3	-10.14	-

TEC.T002.1	7348045	655137	4288.97	51.7	52.3	792	1.6	39.5	4.91	12.5	38.9	-82	-10.6	<0,8+/- 0,5
TEC.T002.2	7348045	655137	4288.97	49.7	49.3	786	1.6	34.4	4.74	11.2	35.6	-83.2	-10.78	<0,8+/- 0,5
TEC.T002.3	7348045	655137	4288.97	130	72.7	832	1.6	82.3	7.85	14.8	46.7	-83.4	-10.82	0,95+/- 0,6
TEC.T003.1	7352744	654266	4182.11	168	58.7	160	2.0	103	11.8	20.7	54.8	-81.2	-9.33	-
TEC.T003.2	7352744	654266	4182.11	169	59	137	2.0	97.7	7.32	23	63.9	-81	-9.39	-
TEC.T003.3	7352744	654266	4182.11	221	73	180	1.9	127	15.6	21.7	56.3	-81.4	-9.43	-
TEC.T003.4	7352744	654266	4182.11	949	269	144	2.5	555	32.4	61.4	127	-81.1	-9.58	-
TEC.T004	7352940	654803	4187.82	867	243	120	2.4	513	31.1	50.1	96.4	-78.4	-9	-
TEC.T005.1	7353115	654770	4185.9	1680	444	194	1.6	1290	82.2	101	174	-70	-9.51	<0,8+/- 0,6
TEC.T005.2	7353115	654770	4185.9	2730	664	283	1.8	2020	97.4	151	318	-80.9	-9.79	0,85+/- 0,5
TEC.T005.3	7353115	654770	4185.9	3360	797	330	1.6	2180	108	168	327	-80.8	-9.79	<0,8+/- 0,5
TEC.T006.1	7352737	654192	4181.56	1190	318	-	1.2	767	34.2	76.7	98.7	-80.6	-9.59	-
TEC.T006.2	7352737	654192	4181.56	390	379	-	11.5	917	44.7	90.9	135	-80.5	-9.67	-
TEC.T006.3	7352737	654192	4181.56	-	-	-	-	-	-	-	-	-80.6	-9.67	-
TEC.T006.5	7352737	654192	4181.56	2551.09	796.14	-	2.2	901	53.3	84.6	192	-81.1	-9.67	-
TEC.T006.6	7352737	654192	4181.56	2539.71	789.4	-	2.0	891	54.2	85.3	200	-80.7	-9.68	-
TEC.T011.1	7353071	654938	4188.44	2860	699	-	1.6	1940	84.9	174	229	-81.5	-9.74	-
TEC.T011.2	7353071	654938	4188.44	3040	749	-	1.4	2110	90.8	182	242	-81.4	-9.88	-
TEC.T011.3	7353071	654938	4188.44	-	-	-	-	-	-	-	-	-81.6	-9.77	-
TEC.T011.5	7353071	654938	4188.44	2658.99	764.63	-	1.5	1910	108	166	345	-82.9	-9.78	-
TEC.T011.6	7353071	654938	4188.44	2661.47	767.06	-	0.2	1900	110	168	348	-81.9	-9.78	-
LAC.P001	7364285	658593	4307	<10	<20	-	-	1.3	<0,5	0.33	3.1	135.4	-17.97	-
LAC.F004	7365048	662194	4253	637	223	-	0.2	339	49.6	17.2	104	-79.8	-10.13	-
LAC.F005	7361610	663259	4256	1126	252	-	0.1	619	63.7	63.9	193	-78.7	-9.68	-
LAC.F006	7358425	661312	4255	2000	521	-	<0,044	742	61.3	65.3	85.6	-79.2	-9.33	-
LAC.F007	7361783	660379	4251	13087	3244	-	7.4	8740	621	657	1015	-36.2	-1.27	-
LAC.F008	7361804	661508	4251	13334	3293	-	<0,044	7048.5	660	640	693	-11.2	2.84	-
LAC.F009	7357745	662787	4243	9100.2	2096.4	268.4	<0,5	4830	250	397	1344	-26.4	1.8	-
LAC.F010	7364661	661289	4252	10944	3221.3	274.16	<0,5	4256	759	367	2463	-2.6	5.59	-
LAC.T002	7362400	662150	4255	81980	5808	-	7.4	50900	6630	1575	1845	-61.3	-6.19	-
LAC.T003	7363400	661350		19754	4772	-	13.1	12550	953	1095	1010	-75.2	-8.97	-

LAC.T004	7361993	660459	4253	198	149	-	0.1	169.5	14	21.7	40	-78	-8.96	-
LAC.T005.1	7356418	660098	4312.48	121	37.4	26	1.2	89.6	8.15	8.04	24.1	-82.9	-10.36	-
LAC.T005.5	7356418	660098	4312.48	95.6	33.9	32	1.2	72.8	5.58	5.71	7.09	-84.8	-10.87	-

3-BALANCE IONICO

CODIGO MUESTRA	UTM NORTE	UTM ESTE	rCL- (meq/L)	rSO4= (meq/L)	rHCO3- (meq/L)	rNO3- (meq/L)	Suma aniones	rNa+ (meq/L)	rK+ (meq/L)	rMg++ (meq/L)	rCa++ (meq/L)	Suma cationes	Error (r%)	error admisible
AC2.S001	7397204	644654	30.47	17.07	1.10	0.011	48.65	20.27	1.84	4.64	18.11	44.86	-8.10	-
AC2.S002	7398464	643090	471.09	36.85	1.87	0.016	509.82	240.10	14.88	42.63	182.63	480.26	-5.97	-
AC2.S003	7397149	644719	109.73	16.41	1.47	0.065	127.68	83.08	3.12	14.57	13.57	114.34	-11.02	-
AC2.S004	7398503	642904	933.71	63.71	1.61	0.081	999.11	5654.63	265.98	616.46	24.20	6561.28	147.14	-
AC2.S005	7397503	645560	18.14	6.85	1.70	0.010	26.70	19.83	1.16	2.53	4.17	27.70	3.67	-
AC2.F008	7397163	644699	26.01	14.07	1.81	0.002	41.89	14.01	0.62	3.36	22.95	40.94	-2.30	3.38
AC2.F009	7397292	644952	34.85	11.00	1.85	0.002	47.70	17.31	0.65	3.64	26.05	47.65	-0.11	3.02
AC2.F010	7397164	644782	29.31	14.31	1.62	0.002	45.25	15.48	0.72	4.63	25.80	46.63	3.00	3.25
AC2.F011	7398491	642914	21.01	4.00	3.10	0.002	28.11	11.66	0.39	1.83	15.07	28.94	2.92	4.10
AC2.F012	7407690	641053	13.35	8.31	13.48	0.002	35.13	25.49	0.85	5.00	3.43	34.77	-1.04	3.94
AC2.T001.1	7388880	648364	22.82	4.73	2.87	0.015	30.43	18.23	1.15	7.56	13.87	40.81	29.15	3.91
AC2.T001.3	7388880	648364	538.79	4.16	4.05	0.032	547.03	96.13	9.03	47.16	99.30	251.62	-73.98	-1.52
AC2.T002.1	7394197	644993	37.80	12.43	1.43	0.011	51.67	24.18	1.86	4.53	26.65	57.22	10.20	2.97
AC2.T002.2	7394197	644993	235.26	10.87	1.08	0.024	247.23	94.82	4.53	11.85	128.24	239.45	-3.20	-0.55
AC2.T007.1	7395562	645244	35.38	10.40	1.31	0.002	47.09	23.79	1.26	5.27	13.62	43.94	-6.91	3.27
AC2.T007.2	7395562	645244	311.39	3.50	0.56	0.002	315.44	114.48	6.45	21.81	169.06	311.80	-1.16	-0.91
PN.F001	7373862	655767	0.21	0.36	-	0.006	0.58	332.32	41.94	123.46	208.08	705.80	-	-
PN.T001.1	7378686	661521	27.62	3.41	4.80	0.010	35.84	12.40	1.16	13.00	13.02	39.59	9.93	3.19

PN.T001.2	7378686	661521	27.70	3.64	4.88	0.006	36.23	12.48	1.19	11.77	12.38	37.82	4.28	3.19
PN.T002.1	7384776	660767	1.00	0.91	0.88	0.010	2.81	6.70	0.29	1.45	7.44	15.87	139.93	23.34
PN.T002.4	7384776	660767	1.61	0.98	2.00	0.008	4.60	2.25	0.10	2.06	1.24	5.65	20.61	7.61
PN.T003.1	7383662	656456	12.33	2.87	1.52	0.020	16.74	0.00	1.37	15.39	2.06	18.82	11.66	5.35
PN.T004.1	7384162	657730	0.72	1.06	2.38	0.023	4.18	0.00	1.22	3.26	0.58	5.06	18.92	7.61
PN.T005.1	7381107	658132	35.26	6.02	1.02	0.009	42.30	0.00	1.00	43.46	5.79	50.25	17.17	3.05
PN.T005.2	7381107	658132	34.41	5.91	0.57	0.009	40.91	0.00	1.68	39.34	4.95	45.97	11.66	3.19
PN.T005.3	7381107	658132	33.57	5.39	2.15	0.007	41.11	0.00	1.62	37.12	4.70	43.44	5.50	3.05
PN.T006.1	7379267	658125	34.41	5.04	0.67	0.009	40.13	0.00	2.00	41.40	5.59	48.99	19.87	3.14
PN.T007.1	7379393	658068	40.57	4.84	3.07	-	48.48	4.72	0.37	14.53	30.09	49.71	2.51	3.49
PN.T007.4	7379393	658068	42.60	5.12	2.26	0.005	49.98	25.79	2.74	9.47	15.37	53.36	6.54	2.37
PN.T007.5	7379393	658068	43.44	5.31	2.29	0.006	51.05	25.97	2.76	8.89	15.92	53.54	4.75	2.44
PN.T007.6	7379393	658068	43.72	5.29	2.33	0.002	51.34	25.66	2.84	9.79	15.77	54.06	5.17	-
PN.T008.2	7381033	657973	35.54	6.27	0.77	0.006	42.59	18.49	2.24	2.75	12.13	35.60	-17.86	3.01
PN.T008.4	7381033	657973	34.98	6.35	1.15	0.010	42.49	19.23	2.24	2.89	13.42	37.78	-11.73	2.92
PN.T008.5	7381033	657973	35.26	6.45	0.92	0.010	42.64	19.01	2.29	2.88	13.32	37.51	-12.82	-
PN.T014	7380945	658400	30.95	5.09	1.41	0.002	37.45	20.79	1.99	1.98	14.27	39.03	4.13	3.55
PN.T015	7379366	658091	38.17	5.67	1.03	0.002	44.88	20.10	2.48	4.92	14.27	41.77	-7.17	3.42
PN.T016	7379366	658091	45.34	1.36	1.36	0.002	48.07	26.01	2.29	7.13	12.67	48.11	0.08	3.02
TUY.F004	7355454	649013	0.23	0.41	-	0.006	-	0.01	0.00	0.00	0.02	0.03	-	-
TUY.F005	7354124	645264	18.50	6.95	2.79	0.049	28.29	20.62	1.11	2.35	4.08	28.15	-0.51	4.19
TUY.F006	7352882	643724	92.81	15.53	3.11	0.003	111.46	76.12	3.04	10.45	12.97	102.59	-8.28	1.44
TUY.F007	7351828	644753	111.42	17.95	2.88	0.036	132.29	82.21	3.58	13.00	14.47	113.27	-15.50	1.22
TUY.F008	7350845	644666	40.90	6.37	2.67	0.015	49.96	33.80	1.09	6.39	8.28	49.55	-0.82	2.72
TUY.F009	7350500	643701	109.73	16.41	2.82	0.065	129.02	83.08	3.12	14.57	13.57	114.34	-12.06	0.97

TUY.F010	7350993	642788	933.71	63.71	10.01	0.081	1007.51	5654.63	265.98	616.46	24.20	6561.28	146.75	-
TUY.F011	7354153	645318	18.14	6.85	2.06	0.010	27.06	19.83	1.16	2.53	4.17	27.70	2.33	-
TUY.F024	7354129	645263	16.59	6.70	2.98	0.006	26.28	17.96	0.94	2.13	3.54	24.58	-6.66	4.34
TUY.F025	7353607	644629	18.65	7.54	3.54	0.001	29.72	20.40	1.13	2.47	4.04	28.04	-5.83	4.14
TUY.F026	7352749	644158	30.92	9.16	3.46	0.011	43.55	29.36	1.42	3.88	5.76	40.43	-7.42	3.41
TUY.F027	7352804	643946	83.58	14.93	4.66	0.004	103.17	76.56	2.72	9.59	13.27	102.14	-1.01	1.47
TUY.F028	7350577	643740	67.42	11.51	3.72	0.001	82.65	60.03	1.87	9.05	10.88	81.83	-1.00	2.03
TUY.F029	7351831	644753	85.67	14.10	4.86	0.001	104.62	79.38	2.66	10.66	14.12	106.82	2.08	1.48
TUY.F030	7352474	644179	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TUY.F031	7351843	644733	84.96	13.62	5.73	0.002	104.32	28.53	0.42	1.72	64.67	95.34	-8.99	1.33
TUY.F032	7354166	645296	16.34	6.28	3.25	0.002	25.87	11.74	0.49	2.44	12.48	27.15	4.82	4.31
TUY.F033	7350324	643814	78.79	11.11	4.53	0.002	94.43	55.33	2.58	12.18	27.00	97.09	2.77	1.58
TUY.T001.1	7348212	643170	87.73	12.97	3.28	0.030	104.01	63.51	2.28	14.98	16.62	97.38	-6.58	1.99
TUY.T001.2	7348212	643170	84.06	12.03	3.69	0.033	99.82	49.15	2.30	13.17	14.67	79.30	-22.91	-
TUY.T001.3	7348212	643170	88.58	12.66	3.69	0.028	104.95	80.03	2.58	14.81	15.62	113.05	7.43	-
TUY.T001.4	7348212	643170	93.37	12.87	3.52	0.022	109.78	62.20	2.38	14.49	15.32	94.38	-15.08	1.59
TUY.T001.5	7348212	643170	117.07	14.37	4.21	0.025	135.67	80.03	2.99	15.72	17.96	116.71	-15.02	1.13
TUY.T002.1	7351655	646820	56.70	9.91	3.36	0.026	70.00	40.06	1.51	8.23	9.83	59.64	-15.98	1.99
TUY.T002.2	7351655	646820	124.68	13.43	4.88	0.025	143.02	86.12	2.61	20.66	23.25	132.65	-7.53	0.62
COL.T001.1	7356530	654771	34.98	10.83	1.93	0.021	47.76	32.71	1.51	5.65	6.34	46.20	-3.32	30.00
COL.T001.2	7356530	654771	62.06	15.72	3.46	0.017	81.25	50.02	2.35	10.62	10.28	73.27	-10.33	30.00
COL.T001.3	7356530	654771	145.84	26.23	4.92	0.008	177.00	118.31	4.83	18.19	19.81	161.15	-9.38	-
COL.T001.4	7356530	654771	157.97	28.52	7.75	0.008	194.25	153.11	7.44	22.47	24.20	207.22	6.46	0.19
COL.T002.2	7357388	653155	192.38	34.56	10.73	0.017	237.70	166.16	7.37	23.79	26.30	223.61	-6.11	-0.30
COL.T003	7359584	654612	99.01	18.63	7.21		124.87	83.95	3.20	14.73	14.72	116.60	-6.85	1.06

						0.009								
COL.T004.1	7357059	654028	90.27	18.32	5.31	0.012	113.91	93.08	3.12	13.09	16.27	125.56	9.73	1.20
COL.T004.2	7357059	654028	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
COL.T006.1	7357511	653109	76.16	16.84	5.24	0.011	98.26	92.21	3.04	10.70	12.92	118.88	18.99	1.42
COL.T006.2	7357511	653109	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
COL.T008.2	7358029	652249	26.11	9.17	2.70	0.002	37.98	26.62	1.37	3.14	8.88	40.01	5.20	3.59
COL.T008.1	7358029	652249	28.05	9.55	2.97	0.002	40.57	30.10	1.68	4.35	6.49	42.61	4.90	3.42
TEC.F001	7344413	655231	0.03	0.01	-	0.002	0.04	0.33	0.04	0.13	0.20	0.70	-	-
TEC.T001	7351626	652490	20.73	3.29	2.16	0.027	26.21	19.05	0.67	3.66	4.60	27.98	6.51	2.09
TEC.T002.1	7348045	655137	1.46	1.09	12.98	0.026	15.55	1.72	0.13	1.03	1.94	4.81	-105.46	8.01
TEC.T002.2	7348045	655137	1.40	1.03	12.88	0.025	15.33	1.50	0.12	0.92	1.78	4.32	-112.15	8.49
TEC.T002.3	7348045	655137	3.67	1.51	13.63	0.025	18.84	3.58	0.20	1.22	2.33	7.33	-87.98	6.99
TEC.T003.1	7352744	654266	4.74	1.22	2.62	0.031	8.61	4.48	0.30	1.70	2.73	9.22	6.79	6.11
TEC.T003.2	7352744	654266	4.77	1.23	2.25	0.033	8.27	4.25	0.19	1.89	3.19	9.52	13.99	5.93
TEC.T003.3	7352744	654266	6.23	1.52	2.95	0.031	10.73	5.52	0.40	1.79	2.81	10.52	-2.04	6.11
TEC.T003.4	7352744	654266	26.77	5.60	2.36	0.040	34.77	24.14	0.83	5.05	6.34	36.36	4.47	2.72
TEC.T004	7352940	654803	24.46	5.06	1.97	0.039	31.52	22.31	0.80	4.12	4.81	32.04	1.64	4.27
TEC.T005.1	7353115	654770	47.39	9.24	3.18	0.026	59.84	56.11	2.10	8.31	8.68	75.21	22.76	2.72
TEC.T005.2	7353115	654770	77.01	13.82	4.64	0.029	95.50	87.86	2.49	12.43	15.87	118.65	21.62	1.46
TEC.T005.3	7353115	654770	94.78	16.59	5.41	0.026	116.81	94.82	2.76	13.83	16.32	127.73	8.93	1.20
TEC.T006.1	7352737	654192	33.57	6.62	-	0.020	-	33.36	0.87	6.31	4.93	45.47	-	-
TEC.T006.2	7352737	654192	11.00	7.89	-	0.185	-	39.89	1.14	7.48	6.74	55.25	-	-
TEC.T006.3	7352737	654192	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TEC.T006.5	7352737	654192	71.96	16.58	-	0.036	-	39.19	1.36	6.96	9.58	57.10	-	-
TEC.T006.6	7352737	654192	71.64	16.44	-	0.032	-	38.76	1.39	7.02	9.98	57.14	-	-
TEC.T011.1	7353071	654938	80.68	14.55	-	0.026	-	84.38	2.17	14.32	11.43	112.30	-	-

TEC.T011.2	7353071	654938	85.75	15.59	-	0.023	-	91.78	2.32	14.98	12.08	121.16	-	-
TEC.T011.3	7353071	654938	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TEC.T011.5	7353071	654938	75.01	15.92	-	0.025	-	83.08	2.76	13.66	17.22	116.72	-	-
TEC.T011.6	7353071	654938	75.08	15.97		0.003	-	82.64	2.81	13.83	17.37	116.65	-	-
LAC.P001	7364285	658593	-	-	-	-	0.00	0.06	-	0.03	0.15	0.24	-	-
LAC.F004	7365048	662194	17.97	4.64	1.72	0.004	24.33	14.75	1.27	1.42	5.19	22.62	-7.31	4.52
LAC.F005	7361610	663259	31.76	5.25	7.54	0.001	44.55	26.92	1.63	5.26	9.63	43.44	-2.51	3.30
LAC.F006	7358425	661312	56.42	10.85	<1,14	<0,0007	<68,40	32.27	1.57	5.37	4.27	43.49	-44.53	2.34
LAC.F007	7361783	660379	369.17	67.54	0.90	0.119	437.73	380.17	15.88	54.07	50.65	500.77	13.43	-1.59
LAC.F008	7361804	661508	376.14	68.56	4.32	<0,0007	<449,02	306.59	16.88	52.67	34.58	410.73	-8.91	-1.64
LAC.F009	7357745	662787	256.71	43.65	4.40	0.002	304.75	210.09	6.39	32.67	67.07	316.23	3.69	-3.47
LAC.F010	7364661	661289	308.72	67.07	4.49	0.002	380.28	185.12	19.41	30.21	122.90	357.65	-6.13	-1.20
LAC.T002	7362400	662150	2312.55	120.92	3.76	0.119	2437.36	2214.01	169.57	129.63	92.07	2605.27	6.66	-4.81
LAC.T003	7363400	661350	557.24	99.35	17.65	0.211	674.46	545.89	24.37	90.12	50.40	710.79	5.25	-2.50
LAC.T004	7361993	660459	5.59	3.10	0.80	0.001	9.49	7.37	0.36	1.79	2.00	11.51	19.28	5.98
LAC.T005.1	7356418	660098	3.41	0.78	0.43	0.020	4.64	3.90	0.21	0.66	1.20	5.97	25.12	8.14
LAC.T005.5	7356418	660098	2.70	0.71	0.52	0.019	3.95	3.17	0.14	0.47	0.35	4.13	4.64	7.96

