



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

HIDROGEOLOGÍA DEL SISTEMA HÍDRICO PARINACOTA-COTACOTANI,
ALTIPLANO DE LA XV REGIÓN DE ARICA Y PARINACOTA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO

NICOLÁS ITURRA JÁUREGUI

PROFESOR GUÍA:
LINDA DANIELE

MIEMBROS DE LA COMISIÓN
DIEGO A. MORATA CÉSPEDES
CARLOS I. PARRAGUEZ DECKER

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por Matraz Consultores

SANTIAGO DE CHILE

2016

RESUMEN

Se desarrolla un modelo hidrogeológico conceptual del Sistema Hídrico Parinacota-Cotacotani, ubicado en el altiplano de la XV Región de Arica y Parinacota, en el extremo norte de Chile. Se presenta información hidrogeológica e hidroquímica del área en estudio, tanto superficial como subterránea.

La XV Región de Arica y Parinacota se caracteriza por ser una zona de extrema aridez. La distribución temporal de las lluvias en el altiplano responde al régimen de precipitaciones provenientes del invierno altiplánico, por tanto los caudales de los cursos superficiales son mayores entre los meses de diciembre a marzo. Se calculó la precipitación media anual en las cuencas y subcuencas de estudio para el periodo 1984-2013. La evapotranspiración es la componente de salida más importante del sistema hídrico de la cuenca. El río Lauca muestra un régimen pluvial.

La salida del sistema por flujo superficial corresponde al caudal promedio anual aforado en la salida de la cuenca. El caudal promedio anual es de 400 L/s en la estación de aforo Río Desaguadero en Cotacotani, 160 L/s en la estación Río Lauca en Estancia el Lago, 764 L/s en la estación Canal Lauca en Sifón nº 1. Este caudal es utilizado mayoritariamente para riego de bofedales y uso doméstico.

Desde el punto de vista geológico, la cuenca hidrográfica del río Lauca se enclava en una cuenca tectónica sedimentaria tipo antepaís en la zona central del orógeno andino. Esta cuenca se encuentra controlada por sistemas estructurales y movimientos tectónicos. La geología estructural existente define y condiciona la formación y geometría de los cuerpos acuíferos. Asimismo, la litología presente afecta y marca la hidroquímica del agua que transita por los acuíferos.

En la cuenca de estudio se han identificado 4 unidades hidrogeológicas: La UH1 son acuíferos en depósitos sedimentarios, la unidad UH2 corresponde con los acuíferos en roca muy fracturada, la UH3 es un acuitardo de porosidad primaria y la unidad UH4 es un acuitardo en roca fracturada. La UH5 es una roca casi impermeable. En el sector Parinacota-Cotacotani, la unidad acuífera principal es la UH1. A partir de la prospección geofísica realizada se observa una zona no saturada en las partes más altas de hasta 50 m de espesor, no obstante no se detectó el basamento en la zona central de este sector, implicando que el acuífero UH1 presenta al menos un espesor de 300 m. En la parte occidental y sur del sector existe la ignimbrita Lauca (UH4) que semiconfina la parte inferior de UH1 causando así la formación de un acuífero inferior semiconfinado que se extiende también aguas abajo hacia el sector del Lauca Alto.

Hidroquímicamente se ha observado que en la cuenca del río Lauca las aguas son de composición bicarbonatada. Esto evidencia una escasa evolución química del agua subterránea, mostrando un bajo contenido salino y un predominio mayoritario del ión bicarbonato. Por lo tanto, se puede concluir que las aguas subterráneas del área de estudio son relativamente jóvenes.

Se analizó la conexión hidráulica entre la cuenca del lago Chungará con la cuenca del río Lauca. A partir de este análisis se pudo concluir que existe un gradiente hidráulico entre las lagunas que permite que el agua circule desde la cuenca del lago Chungará hacia el Lauca. La conexión hidráulica entre la cuenca del lago Chungará con la cuenca del río Lauca por el sector de las lagunas de Cotacotani ha sido apoyada por la respuesta de resistividades eléctricas que muestra el perfil TEM llevado a cabo en la prospección geofísica.

A mis padres, Mónica y Carlos,
los primeros en darme una oportunidad en la vida,
e incansables ejemplos del valor de la determinación y el empuje.

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA.....	1
1.2	OBJETIVOS.....	3
1.3	ALCANCE DEL ESTUDIO Y ACTIVIDADES	3
1.4	METODOLOGÍA	4
1.5	CONTEXTO SOCIAL Y MEDIOAMBIENTAL.....	5
2	RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES.....	17
2.1	HIDROLOGÍA.....	17
2.2	GEOLOGÍA	20
2.3	HIDROGEOLOGÍA.....	22
2.4	HIDROQUÍMICA.....	24
2.5	BALANCE HÍDRICO.....	26
3	ACTIVIDADES DE TERRENO	31
3.1	PROSPECCIÓN GEOFÍSICA	31
3.2	CAMPAÑA HIDROQUÍMICA	35
4	CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA	41
4.1	ESTRATIGRAFÍA.....	41
4.2	ESTRUCTURAS.....	52
5	CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLOGICA.....	58
5.1	UNIDADES HIDROGEOLOGICAS	58
5.2	MAPA PIEZOMÉTRICO	67
6	CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA.....	70
6.1	PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS.....	73
6.2	ANÁLISIS HIDROQUÍMICO.....	77
6.3	CALIDAD DE LAS AGUAS	82
6.4	MODELO HIDROQUÍMICO CONCEPTUAL.....	85
7	MODELO HIDROLÓGICO	90
7.1	ANÁLISIS CAUDAL-PRECIPITACIÓN.....	90
8	MODELO CONCEPTUAL	96
8.1	DOMINIOS HIDROGEOLOGICOS	96
8.2	CONEXIÓN ENTRE CUENCAS.....	101

9	CONCLUSIONES.....	107
10	BIBLIOGRAFÍA.....	110
11	ANEXO - CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA.....	114
11.1	INTRODUCCIÓN.....	115
11.2	CONTEXTO HIDROCLIMÁTICO.....	115
11.3	CARACTERIZACIÓN DE CUENCAS Y SUBCUENCAS.....	118
11.4	DELIMITACIÓN.....	118
11.5	ANÁLISIS DE VARIABLES METEOROLÓGICAS.....	130
11.6	ANÁLISIS DE CAUDALES.....	154
12	ANEXO- SEGUNDA CAMPAÑA DE TERRENO ABRIL 2015.....	167
13	ANEXO - DATOS HIDROQUÍMICA.....	174

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1-1. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO. A LA IZQUIERDA UN MAPA DE LA XV REGIÓN DE ARICA Y PARINACOTA; A LA DERECHA UN ZOOM DE LA REGIÓN PARA DESTACAR EL ÁREA DE ESTUDIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	2
FIGURA 1-2. RED HÍDRICA DE LA ZONA DEL ESTUDIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	7
FIGURA 1-3. LÍNEA CRONOLÓGICA DE LA SITUACIÓN DE LAS OBRAS REALIZADAS EN LA ZONA DE ESTUDIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	10
FIGURA 1-4. ÁREAS PROTEGIDAS DE LA ZONA DE ESTUDIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	13
FIGURA 2-1. LÍNEA DE TIEMPO DE ESTUDIOS HIDROLÓGICOS EN LA CUENCA DE ESTUDIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	19
FIGURA 2-2. LÍNEA DE TIEMPO DE ESTUDIOS GEOLÓGICOS EN LA CUENCA DE ESTUDIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	21
FIGURA 2-3 LÍNEA DE TIEMPO DE ESTUDIOS HIDROGEOLÓGICOS EN LA CUENCA DE ESTUDIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	23
FIGURA 2-4. LÍNEA DE TIEMPO DE ESTUDIOS HIDROQUÍMICOS E ISOTÓPICOS EN LA CUENCA DE ESTUDIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	25
FIGURA 2-5. LÍNEA DE TIEMPO DE ESTUDIOS DE BALANCE HÍDRICO EN LA CUENCA DE ESTUDIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	27
FIGURA 2-6. METODOLOGÍA BALANCE HÍDRICO. FUENTE: DGA, 1989.	29
FIGURA 3-1. UBICACIÓN DE LOS PERFILES TEM. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	32
FIGURA 3-2. PUNTOS ENSAYADOS EN EL PERFIL TEM 1. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	33
FIGURA 3-3. PUNTOS ENSAYADOS EN EL PERFIL TEM 2. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	33
FIGURA 3-4. PUNTOS ENSAYADOS EN EL PERFIL TEM 9. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	34
FIGURA 3-5. PUNTOS ENSAYADOS EN EL PERFIL TEM 9. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	34
FIGURA 3-6. UBICACIÓN DE LAS MUESTRAS TOMADAS PARA EL ANÁLISIS QUÍMICO E ISOTÓPICO EN LA CAMPAÑA DE TERRENO DE SEPTIEMBRE DE 2014. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	37
FIGURA 3-7. UBICACIÓN DE LAS MUESTRAS TOMADAS EN LA CAMPAÑA DE TERRENO DE SEPTIEMBRE DE 2014. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	39
FIGURA 4-1. ESTRATIGRAFÍA GENERAL DE LA CUENCA SEDIMENTARIA LAUCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	42
FIGURA 4-2. MAPA GEOLÓGICO DE LA ZONA DE ESTUDIO. FUENTE: MODIFICADO DE GARCÍA ET AL., 2004.	43
FIGURA 4-3. LEYENDA MAPA GEOLÓGICO. FUENTE: MODIFICADO DE GARCÍA ET AL., 2004.	44
FIGURA 4-4. SECUENCIA ESTRATIGRÁFICA DEL PERIODO OLIGOCENO-PLIOCENO DE LA CUENCA LAUCA. FUENTE: MODIFICADO DE GARCÍA ET AL., 2004.	46
FIGURA 4-5. COLUMNA ESTRATIGRÁFICA DE LA FORMACIÓN LUPICA EN EL SECTOR CERRO BELÉN. FUENTE: MODIFICADO DE GARCÍA ET AL., 2004.	47
FIGURA 4-6. SECUENCIAS ALUVIALES DE LA FORMACIÓN LAUCA SITUADAS POR DEBAJO DE LA IGNIMBRITA LAUCA EN EL SECTOR CHUBA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	48

FIGURA 4-7. CORRELACIÓN ESTRATIGRÁFICA DE LA FORMACIÓN LAUCA Y LOS SEDIMENTOS CUATERNARIOS SOBREYACENTES EN EL SECTOR CENTRAL DE LA ZONA DE ESTUDIO. FUENTE: MODIFICADO DE KÖTT ET AL., 1995.	49
FIGURA 4-8. PERFIL GEOLÓGICO DEL SECTOR NORTE DE LA ZONA DE ESTUDIO. FUENTE: MODIFICADO DE GARCÍA ET AL., 2004.	54
FIGURA 4-9. PERFIL GEOLÓGICO TRANSVERSAL DE LA ZONA CENTRAL DE LA CUENCA LAUCA. FUENTE: MODIFICADO DE GARCÍA ET AL., 2004.	55
FIGURA 4-10. EXTENSIÓN DE LA IGNIMBRITA DEL CORDÓN BELÉN EN LA CUENCA LAUCA. FUENTE: MODIFICADO DE GARCÍA ET AL., 2000.	56
FIGURA 4-11. TRAMO BAJO DE QUEBRADA CHUBA EXCAVADO EN EL CONTACTO ENTRE LA FORMACIÓN LUPICA Y LA FORMACIÓN LAUCA Y SU RELACIÓN CON EL ANTICLINAL QUEÑUACOLLO. FUENTE PERFIL: MODIFICADO DE GARCÍA, 2004. FUENTE FOTO: ELABORACIÓN PROPIA.	57
FIGURA 5-1. SECTOR HIDROGEOLÓGICO DEL SHPC. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	59
FIGURA 5-2. FUENTES DE INFORMACIÓN PARA LA DETERMINACIÓN DE UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	60
FIGURA 5-3. PERFIL TEM-1: INTERPRETACIÓN DE CAMPO DE RESISTIVIDADES ASOCIADOS A LOS PUNTOS TEM ENSAYADOS EN EL PERFIL TEM-1. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	61
FIGURA 5-4. PERFIL TEM-2: INTERPRETACIÓN DE CAMPO DE RESISTIVIDADES ASOCIADOS A LOS PUNTOS TEM ENSAYADOS EN EL PERFIL TEM-2. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	62
FIGURA 5-5. PERFIL TEM-9, TRAMO 2.500-5.000M: INTERPRETACIÓN DE CAMPO DE RESISTIVIDADES ASOCIADOS A LOS PUNTOS TEM ENSAYADOS EN EL PERFIL TEM-9. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	63
FIGURA 5-6. PERFIL TEM-9, TRAMO 8.700-20.000M: INTERPRETACIÓN DE CAMPO DE RESISTIVIDADES ASOCIADOS A LOS PUNTOS TEM ENSAYADOS EN EL PERFIL TEM-9. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	64
FIGURA 5-7. MAPA HIDROGEOLÓGICO PRELIMINAR DEL SHPC. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	67
FIGURA 5-8. MAPA PIEZOMÉTRICO DE LA ZONA DE ESTUDIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	68
FIGURA 6-1. UBICACIÓN DE LAS MUESTRAS TOMADAS PARA EL ANÁLISIS QUÍMICO EN LA CAMPAÑA DE TERRENO DE SEPTIEMBRE DE 2014. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	71
FIGURA 6-2. UBICACIÓN DE LAS MUESTRAS TOMADAS PARA EL ANÁLISIS QUÍMICO EN LA CAMPAÑA DE TERRENO DE ABRIL DE 2015. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	72
FIGURA 6-3. MAPA DE LOS VALORES DE TEMPERATURA (°C) MEDIDOS EN LA PRIMERA CAMPAÑA DE TERRENO, SEPTIEMBRE 2014. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	74
FIGURA 6-4. MAPA DE LOS VALORES DE pH MEDIDOS EN LA PRIMERA CAMPAÑA DE TERRENO, SEPTIEMBRE 2014. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	75
FIGURA 6-5. MAPA DE LOS VALORES DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA ($\mu\text{S}/\text{CM}$) MEDIDOS EN LA PRIMERA CAMPAÑA DE TERRENO, SEPTIEMBRE 2014. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	76
FIGURA 6-6. MAPA DE LAS MUESTRAS RECOGIDAS EN SEPTIEMBRE DE 2014. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	79
FIGURA 6-7. DIAGRAMA SCHÖELLER Y MAPA DE UBICACIÓN DE LAS MUESTRAS EN EL SECTOR PARINACOTA-COTACOTANI EN LA PRIMERA CAMPAÑA DE TERRENO, SEPTIEMBRE 2014. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	81

FIGURA 6-8. MAPA QUE MUESTRA LA CONCENTRACIÓN DE AS (MG/L) EN LOS PUNTOS DE MUESTREO DE LA PRIMERA CAMPAÑA DE TERRENO, SEPTIEMBRE 2014. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	83
FIGURA 6-9. MAPA QUE MUESTRA LA CONCENTRACIÓN DE FE (MG/L) EN LOS PUNTOS DE MUESTREO DE LA PRIMERA CAMPAÑA DE TERRENO, SEPTIEMBRE 2014. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	84
FIGURA 6-10. MAPA QUE MUESTRA LA CONCENTRACIÓN DE B (MG/L) EN LOS PUNTOS DE MUESTREO DE LA PRIMERA CAMPAÑA DE TERRENO, SEPTIEMBRE 2014. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	85
FIGURA 6-11. SECUENCIA DE CHEVOTAREB. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	86
FIGURA 6-12. RELACIÓN DEL FLUJO CON EL TRANSPORTE DE SOLUTOS. FUENTE: MODIFICADO DE FCIHS, 2009.	87
FIGURA 6-13. BLOQUE DIAGRAMA DE LA HIDROQUÍMICA DEL SISTEMA DE LAS CUENCAS CHUNGARÁ Y LAUCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	89
FIGURA 7-1. ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS Y SUBCUENCAS DE LA CUENCA DEL RÍO LAUCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	91
FIGURA 7-2. RELACIÓN CAUDAL-PRECIPITACIÓN EN LA SUBCUENCA DEL RÍO DESAGUADERO EN COTACOTANI (PERIODO 1984-2013). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	92
FIGURA 7-3. RELACIÓN CAUDAL-PRECIPITACIÓN EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LAUCA EN ESTANCIA EL LAGO (PERIODO 1984-2013). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	94
FIGURA 7-4. IZQUIERDA: CORRELACIÓN CRUZADA ENTRE LA PRECIPITACIÓN Y EL CAUDAL MEDIO MENSUAL EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LAUCA EN ESTANCIA EL LAGO (PERIODO 1984-2013). DERECHA: AUTOCORRELACIÓN DEL CAUDAL PROMEDIO MENSUAL EN LA SUBCUENCA DEL RÍO LAUCA EN ESTANCIA EL LAGO (PERIODO 1984-2013) FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	94
FIGURA 8-1. MAPA DE LA UBICACIÓN DE LOS PERFILES HIDROGEOLÓGICOS DEL MODELO CONCEPTUAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	97
FIGURA 8-2. PERFIL HIDROGEOLÓGICO A DEL SECTOR CIÉNAGAS DE PARINACOTA – LAGUNAS DE COTACOTANI. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	100
FIGURA 8-3. UBICACIÓN SECTORES CON POTENCIAL CONEXIÓN ENTRE CUENCAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	101
FIGURA 8-4. PERFIL HIDROGEOLÓGICO DEL SECTOR LAGO CHUNGARÁ - LAGUNAS DE COTACOTANI. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	104
FIGURA 8-5. PERFIL HIDROGEOLÓGICO DEL SECTOR LAGO CHUNGARÁ - CHIRIGUAYA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	106
FIGURA 11-1. CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA DE KÖPPEN EN LA REGIÓN DE ARICA Y PARINACOTA. FUENTE: MODIFICADO DE HTTP://WWW7.UC.CL/SW_EDUC/GEOGRAFIA/CARTOGRAFIINTERACTIVA/INDEX.HTM	117
FIGURA 11-2. DIVISIÓN EN SUBCUENCAS, SISTEMA HIDROLÓGICO Y ESTACIONES METEOROLÓGICAS Y FLUVIOMÉTRICAS DE LA DGA DE LA CUENCA DEL RÍO LAUCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	119
FIGURA 11-3. DIVISORIA DE LA CUENCA DEL RÍO LAUCA Y LA CUENCA DEL LAGO CHUNGARÁ. SEPTIEMBRE 2014. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	120
FIGURA 11-4. SISTEMA HIDROLÓGICO DE LAS LAGUNAS DE COTACOTANI. FUENTE: MODIFICADO DE GOOGLE EARTH.	120
FIGURA 11-5. SISTEMA HIDROLÓGICO DE LAS LAGUNAS DE COTACOTANI. FUENTE: MODIFICADO DE GOOGLE EARTH.	122

FIGURA 11-6. ESTACIÓN DE AFORO EN LA BOCATOMA DEL CANAL LAUCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	123
FIGURA 11-7. ESTACIÓN FLUVIOMÉTRICA “RÍO LAUCA EN SIFÓN N° 1”, KM 3,3 DE LA BOCATOMA DEL CANAL LAUCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	124
FIGURA 11-8. ESTACIÓN FLUVIOMÉTRICA “RÍO LAUCA EN ESTANCIA EL LAGO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	124
FIGURA 11-9. SISTEMA HIDROLÓGICO DE LA CUENCA DEL LAGO CHUNGARÁ Y ESTACIONES DE LA DGA EXISTENTES, FLUVIOMÉTRICAS Y METEOROLÓGICAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	126
FIGURA 11-10. ESTACIÓN FLUVIOMÉTRICA “RÍO CHUNGARÁ EN DESEMBOCADURA”. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	127
FIGURA 11-11. CONEXIÓN SUBTERRÁNEA ENTRE LA CUENCA DEL LAGO CHUNGARÁ Y LA CUENCA DEL RÍO LAUCA, CONCRETAMENTE CON LAS LAGUNAS DE COTACOTANI. FUENTE: MODIFICADO DE GOOGLE EARTH.	127
FIGURA 11-12. MAPA DE ALTITUDES DE LAS CUENCAS DE ESTUDIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	129
FIGURA 11-13. LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES PLUVIOMÉTRICAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	131
FIGURA 11-14. PRECIPITACIONES MEDIAS MENSUALES DE ALGUNAS ESTACIONES SELECCIONADAS PARA EL ANÁLISIS HIDROLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO LAUCA (PERIODO 1984-2013). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	135
FIGURA 11-15. PRECIPITACIONES PROMEDIO ANUAL Y MODELO DIGITAL DE PRECIPITACIONES DE LA CUENCA DEL RÍO LAUCA Y LAGO CHUNGARÁ (PERIODO 1984-2013). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	137
FIGURA 11-16. RELACIÓN ENTRE LA TEMPERATURA Y LA ALTITUD DE LAS ESTACIONES SELECCIONADAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	141
FIGURA 11-17. LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS DGA PARA CARACTERIZAR LA TEMPERATURA Y MODELO DIGITAL DE TEMPERATURAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	142
FIGURA 11-18. LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS EMPLEADAS PARA EL ANÁLISIS DE LA EVAPORACIÓN. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	144
FIGURA 11-19. VARIACIÓN DE LA EVAPORACIÓN ANUAL TOTAL DE LAS CUATRO ESTACIONES, CODPA (ALTITUD 1.870 MSNM.), PUTRE (3.545 MSNM), COTACOTANI (4.550 MSNM) Y CHUNGARÁ AJATA (4.585 MSNM). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	145
FIGURA 11-20. EVOLUCIÓN DE LA EVAPORACIÓN Y TEMPERATURA MEDIA ANUAL DE LA ESTACIÓN METEOROLÓGICA CHUNGARÁ AJATA (4.858 MSNM). PERIODO 1984-2011. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	146
FIGURA 11-21. ARRIBA: CORRELACIÓN ENTRE LA EVAPORACIÓN Y TEMPERATURA MEDIA ANUAL DE LA ESTACIÓN CHUNGARÁ AJATA (4.858 MSNM). ABAJO: CORRELACIÓN ENTRE LA EVAPORACIÓN Y TEMPERATURA MEDIA ANUAL DE LA ESTACIÓN CODPA (1.870 MSNM). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	147
FIGURA 11-22. VARIACIÓN INTERANUAL Y TENDENCIA DE LA EVAPORACIÓN REGISTRADA EN LA ESTACIÓN CHUNGARÁ AJATA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	148
FIGURA 11-23. ARRIBA: VARIACIÓN MENSUAL DE LA EVAPORACIÓN Y LA HUMEDAD EN LA ESTACIÓN CHUNGARÁ AJATA. ABAJO: VARIACIÓN MENSUAL DE LA EVAPORACIÓN Y LA HUMEDAD EN LA ESTACIÓN CODPA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	151
FIGURA 11-24. CORRELACIÓN ENTRE EVAPORACIÓN Y HUMEDAD DE LA ESTACIÓN CHUNGARÁ AJATA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	152
FIGURA 11-25. CORRELACIÓN ENTRE EVAPORACIÓN Y HUMEDAD DE LA ESTACIÓN CODPA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	152

FIGURA 11-26. ESTACIONES FLUVIOMÉTRICAS EN LA ZONA DE ESTUDIO Y ESTACIONES METEOROLÓGICAS SELECCIONADAS PARA EL ANÁLISIS DE CAUDALES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	156
FIGURA 11-27. TIPOS DE REGÍMENES DE CAUDAL EN LA ZONA DE ESTUDIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	158
FIGURA 11-28. LOCALIZACIÓN DE LAS OBRAS HIDRÁULICAS DE LA LAGUNA PRINCIPAL DE COTACOTANI. FUENTE: MODIFICADO DE GOOGLE EARTH.	159
FIGURA 11-29. OBRAS DE ENTREGA “A” SITUADAS EN LA DESEMBOCADURA DE LA LAGUNA PRINCIPAL DE COTACOTANI. FUENTE: DGA ARICA.	160
FIGURA 11-30. OBRAS DE ENTREGA “B” SITUADAS A 115 METROS DE LAS OBRAS DE ENTREGA “A”. FUENTE: DGA ARICA.	160
FIGURA 11-31. AÑO HIDROLÓGICO MEDIO EN EL RÍO DESAGUADERO EN COTACOTANI (PERIODO 1984-2013). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	161
FIGURA 11-32. AÑO HIDROLÓGICO MEDIO EN LAS ESTACIONES DEL RÍO LAUCA (PERIODO 1984-2013). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	162
FIGURA 11-33. VARIACIÓN ANUAL DE LOS CAUDALES PROMEDIO ANUALES AFORADOS EN EL RÍO LAUCA Y EXTRACCIÓN EN CANAL LAUCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	164
FIGURA 11-34. VARIACIÓN ANUAL DE LOS CAUDALES PROMEDIO ANUALES AFORADOS EN EL RÍO GUALLATIRE EN GUALLATIRE Y EN EL RÍO DESAGUADERO COTACOTANI. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	164
FIGURA 11-35. CAUDALES MEDIOS MENSUALES PARA DISTINTAS PROBABILIDADES DE EXCEDENCIA EN LA ESTACIÓN “RÍO DESAGUADERO EN COTACOTANI” (PERIODO 1984-2013). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	165
FIGURA 11-36. CAUDALES MEDIOS MENSUALES PARA DISTINTAS PROBABILIDADES DE EXCEDENCIA EN LA ESTACIÓN “RÍO LAUCA EN ESTANCIA EL LAGO” (PERIODO 1984-2013). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	166
FIGURA 12-1. MAPA DE LOS VALORES DE TEMPERATURA (°C) MEDIDOS EN LA TERCERA CAMPAÑA DE TERRENO, ABRIL DE 2015. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	169
FIGURA 12-2. MAPA DE LOS VALORES DE PH MEDIDOS EN LA TERCERA CAMPAÑA DE TERRENO, ABRIL 2015. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	169
FIGURA 12-3. MAPA DE LOS VALORES DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA ($\mu\text{S}/\text{CM}$) MEDIDOS EN LA TERCERA CAMPAÑA DE TERRENO, ABRIL 2015. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	170
FIGURA 12-4. MAPA DE LOS SECTORES DE LA CUENCA DEL RÍO LAUCA, MUESTRAS RECOGIDAS EN ABRIL DE 2015. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	170
FIGURA 12-5. DIAGRAMA SCHÖELLER Y MAPA DE UBICACIÓN DE LAS MUESTRAS EN EL SECTOR PARINACOTA-COTACOTANI EN LA TERCERA CAMPAÑA DE TERRENO, ABRIL 2015. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	171
FIGURA 12-6. MAPA DE CONCENTRACIÓN DE AS (MG/L) EN LOS PUNTOS DE MUESTREO DE LA TERCERA CAMPAÑA DE TERRENO, ABRIL 2015. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	172
FIGURA 12-7. MAPA DE CONCENTRACIÓN DE FE (MG/L) EN LOS PUNTOS DE MUESTREO DE LA TERCERA CAMPAÑA DE TERRENO, ABRIL 2015. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	172
FIGURA 12-8. MAPA QUE MUESTRA LA CONCENTRACIÓN DE B (MG/L) EN LOS PUNTOS DE MUESTREO DE LA TERCERA CAMPAÑA DE TERRENO, ABRIL 2015. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	173

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1-1. PRINCIPALES MARCOS REGULATORIOS PARA LA CONSERVACIÓN DE LA BIODIVERSIDAD IN SITU. FUENTE: ROVIRA ET AL., 2008.	15
TABLA 2-1. COMPARATIVA DE LOS BALANCES HÍDRICOS REALIZADOS POR DISTINTOS AUTORES Y DISTINTAS ÉPOCAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	30
TABLA 3-1. CÓDIGO DE PARÁMETROS DE TERRENO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	36
TABLA 3-2. MUESTRAS Y MEDICIONES TOMADAS DE LA CAMPAÑA DE AFOROS DE SEPTIEMBRE DE 2014. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	38
TABLA 5-1. FUENTES DE INFORMACIÓN PARA LA DEFINICIÓN DE UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	58
TABLA 5-2. UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS EN LA CUENCA DEL RÍO LAUCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	65
TABLA 6-1. RESUMEN CON LOS BALANCES IÓNICOS DE LAS MUESTRAS TOMADAS EN AMBAS CAMPAÑAS DE MUESTREO HIDROQUÍMICO.	78
TABLA 6-2. LÍMITE DE LA CONCENTRACIÓN (MG/L) DE AS, FE Y B PARA CUMPLIR LAS NORMAS DE CALIDAD DE AGUA POTABLE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	82
TABLA 11-1. CAUDALES AFORADOS EN SEPTIEMBRE Y NOVIEMBRE DE 2014 EN LA BOCATOMA DEL CANAL LAUCA Y EN LA ESTACIÓN FLUVIOMÉTRICA “RÍO LAUCA EN ESTANCIA EL LAGO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	125
TABLA 11-2. CLASIFICACIÓN DE LAS CUENCAS Y SUBCUENCAS DE ESTUDIO EN FUNCIÓN DEL COEFICIENTE DE GRAVELIUS (K_G), FORMA Y TENDENCIA DE CRECIDAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.....	128
TABLA 11-3. PARÁMETROS DE RELIEVE EN LAS CUENCAS Y SUBCUENCAS DE ESTUDIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	129
TABLA 11-4. DISTRIBUCIÓN DE LAS PRECIPITACIONES DURANTE LOS PERIODOS DE DICIEMBRE A MARZO (ÉPOCA LLUVIOSA) Y DE ABRIL A NOVIEMBRE (ÉPOCA SECA). FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	133
TABLA 11-5. FACTOR CORRECTOR QUE RELACIONA LAS PRECIPITACIONES MEDIAS ANUALES CALCULADAS A PARTIR DE LA VARIABLE ALTITUDINAL CON LAS PRECIPITACIONES OBTENIDAS CONSIDERANDO LAS VARIABLES ALTITUDINAL Y ESPACIAL. PERIODO 1984-2013. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA	138
TABLA 11-6. PRECIPITACIÓN PARA EL AÑO PROMEDIO (PERIODO 1984-2013) EN LAS CUENCAS Y SUBCUENCAS DE ESTUDIO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	140
TABLA 11-7. LOCALIZACIÓN DE LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS CON REGISTROS DE TEMPERATURA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	141
TABLA 11-8. EVAPORACIÓN MEDIA ANUAL EN LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS CERCANAS Y DE LA CUENCA DEL RÍO LAUCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	145
TABLA 11-9. EVAPORACIÓN MEDIA MENSUAL EN LAS ESTACIONES METEOROLÓGICAS SELECCIONADAS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	149
TABLA 11-10. CÁLCULO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL MEDIANTE EL MÉTODO DE TURC EN LA CUENCA DEL RÍO LAUCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	153
TABLA 11-11. PRECIPITACIÓN MEDIA Y EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL MEDIA (EN MILÍMETROS) EN LA CUENCA DEL RÍO LAUCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	154

TABLA 11-12. ESTACIONES DE AFORO DE LA DGA DEN LA CUENCA DEL RÍO LAUCA Y EN LA CUENCA DEL LAGO CHUNGARÁ. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	155
TABLA 11-13. CAUDAL MEDIO MÍNIMO, MÁXIMO Y PROMEDIO ANUAL PARA LAS ESTACIONES DE AFORO EXISTENTES EN LA CUENCA DEL RÍO LAUCA. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	162
TABLA 11-14. RELACIÓN ENTRE EL ÁREA DE CAPTACIÓN Y EL CAUDAL PROMEDIO ANUAL. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	163
TABLA 13-1. DATOS DE NOMBRES, COORDENADAS E HIDROQUÍMICA DE TODAS LAS MUESTRAS OBTENIDAS DURANTE AMBAS CAMPAÑAS DE MUESTREO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	175

1 INTRODUCCIÓN

En esta memoria se realiza un estudio hidrogeológico sobre el Sistema Hídrico Parinacota-Cotacotani (SHPC) perteneciente a la cuenca del río Lauca, Región de Arica y Parinacota, Chile. El interés de conocer el funcionamiento del sistema hídrico y aportar al entendimiento del sistema que se desarrolla en esta zona nace de su alta importancia social y medioambiental para la región y el país.

1.1 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

La zona de estudio se ubica en la XV Región, o Región de Arica y Parinacota, localizada en la parte más septentrional del país. Limita al norte con Perú, al sur con la región de Tarapacá, al este con Bolivia y al oeste con el Océano Pacífico (**Figura 1-1**).

La superficie del Sistema Hídrico Parinacota-Cotacotani (SHPC) es de 300 km², y pertenece al sistema regional de la cuenca del río Lauca, que en territorio chileno es de 2.350 km². Todo este sistema desemboca en el altiplano Boliviano, y se hace parte de un sistema de aun mayores dimensiones en el salar de Coipasa.

La región de Arica y Parinacota se caracteriza por ser una zona de extrema aridez. La distribución temporal de las lluvias responde al régimen de precipitaciones provenientes del invierno altiplánico, por tanto los caudales de los cursos superficiales son mayores entre los meses de diciembre a marzo coincidiendo con el invierno altiplánico.

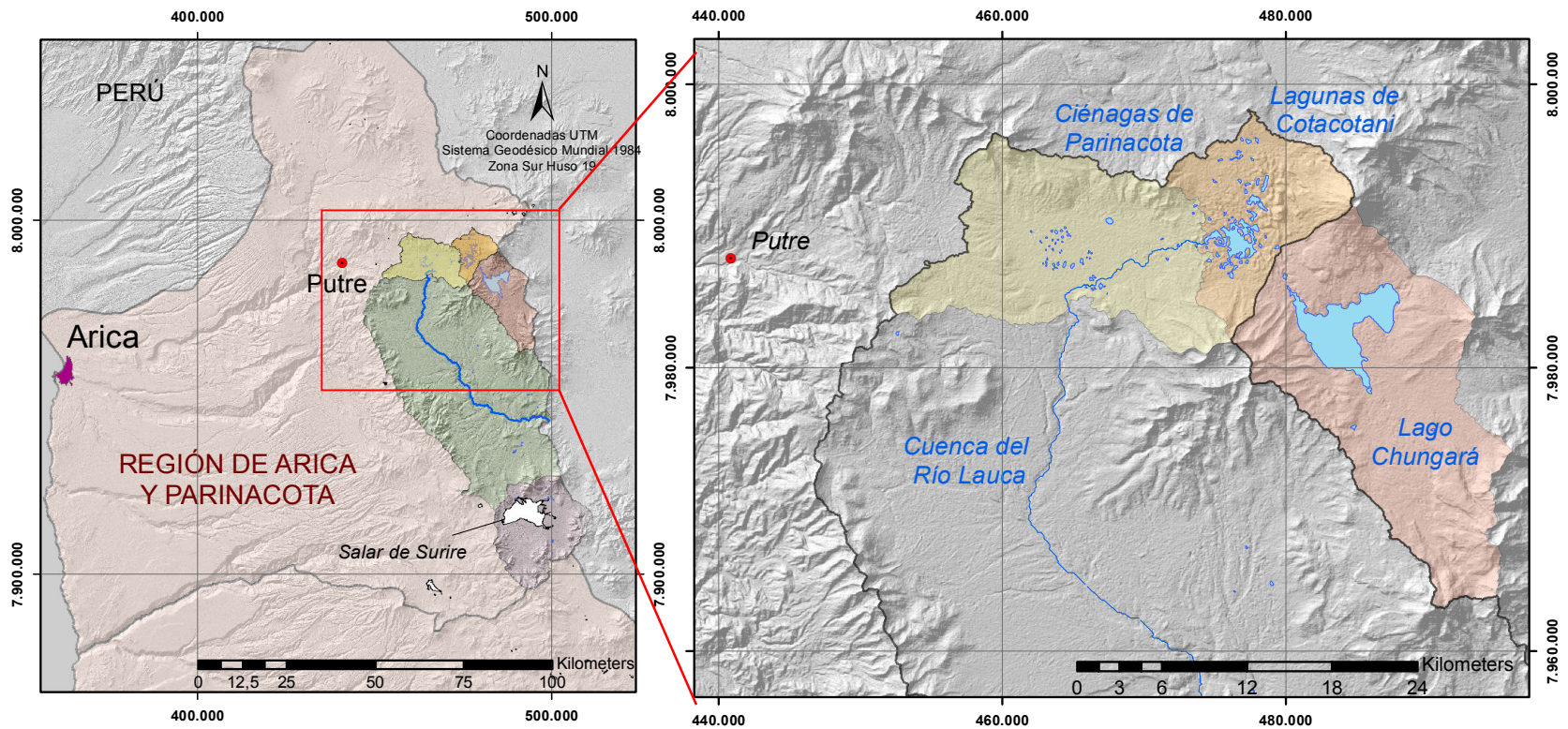


Figura 1-1. Localización de la zona de estudio. A la izquierda un mapa de la XV Región de Arica Y Parinacota; a la derecha un zoom de la región para destacar el área de estudio. Fuente: elaboración propia.

1.2 OBJETIVOS

El objetivo general del proyecto de memoria es el desarrollo de un modelo conceptual del Sistema Hídrico Parinacota-Cotacotani (SHPC) mediante el levantamiento de información hidrogeológica e hidroquímica..

Los objetivos específicos del estudio propuesto son los siguientes:

- Recopilación de todos los antecedentes del sistema, a través de una revisión exhaustiva de la información existente y de estudios anteriores.
- Definición y características de las unidades acuíferas.
- Determinar si el acuífero existente es independiente o si forma parte de una unidad mayor.
- Determinar si el acuífero está conectado al río Lauca aguas abajo.
- Representación y estimación de los flujos de agua subterránea.
- Caracterización de las zonas de recarga y descarga.
- Generación de un modelo conceptual.

1.3 ALCANCE DEL ESTUDIO Y ACTIVIDADES

Los alcances iniciales se complementan con actividades que tienen como finalidad obtener mayor conocimiento del área de estudio. Éstas incluyen el estudio de la conexión hidrogeológica subterránea con el sector de la laguna Chungará.

Existe la posibilidad que el SHPC esté conectado con la cuenca del lago Chungará. Esta conexión han sido estudiada previamente por otros autores. En el caso de la laguna Chungará, estudios recientes basados en hidroquímica han concluido que esta se produciría de forma subterránea a través de depósitos volcánicos brechosos y que representaría el 58% del volumen de agua que alimenta las lagunas de Cotacotani. El 42% restante provendría de los acuíferos que flanquean los volcanes próximos (Herrera *et al.*, 2006).

Se realizaron actividades orientadas a abordar los objetivos específicos de la memoria:

Revisión de antecedentes: Recopilación de información relevante para la comprensión del funcionamiento hídrico de la cuenca del río Lauca, así como su relación con algunas de las subcuencas que la rodean. Se realizará un informe de análisis con todas las referencias analizadas.

Campañas de terreno: Se realizaron campañas de terreno para reconocimiento de la geología, identificación de estaciones fluviométricas, sistema hídrico superficial, obtención de parámetros físico-químicos de terreno y muestras para análisis químico e isotópicos.

Caracterización hidrológica: Caracterización hidrológica del área en función de la altura dentro de la cuenca de estudio. Cálculo de volúmenes de precipitación y aforos en distintos puntos del río Lauca.

Caracterización hidrogeológica: Definición de la hidrogeología de la zona de estudio, descripción de las unidades relevantes del acuífero, geometría y profundidad del basamento, niveles freáticos. Mapas con curvas piezométricas y líneas de flujo de agua subterránea entre otros, para la preparación del modelo hidrogeológico. Niveles freáticos y curvas equipotenciales.

Caracterización hidrogeoquímica: De los recursos hídricos del área a partir de los análisis químicos e isotópicos.

Desarrollo del modelo conceptual: Caracterización del sistema acuífero, sus condiciones de borde y sus zonas de carga y descarga. Representación de flujos principales según las unidades hidrogeológicas identificadas. Análisis de la posible conexión con las cuencas adyacentes.

1.4 METODOLOGÍA

La metodología planteada para este trabajo está orientada a desarrollar un modelo hidrogeológico conceptual mediante el desarrollo de 4 áreas fundamentales para la descripción de un sistema hidrogeológico. La metodología compila estas variables y las integra en un modelo conceptual del SHPC.

Se desarrolla el modelo hidrogeológico conceptual a través de la integración de las siguientes 4 disciplinas:

- Hidrología
- Geología
- Hidrogeología
- Hidroquímica

La metodología compila estas 4 disciplinas y las integra en un modelo conceptual del SHPC. De esta forma, cada una de estas disciplinas describen las principales relaciones en un sistema de recursos hídricos que cambia y es afectado en el tiempo por el ejercicio climático, evolución geológica y la actividad antrópica.

1.5 CONTEXTO SOCIAL Y MEDIOAMBIENTAL

La zona de estudio presenta situaciones de acciones antrópicas singulares, necesarias de describir para contextualizar el estado actual de la región en relación con sus recursos hídricos. Es por esto que, junto a una reseña del funcionamiento del SHPC, se describen cronológicamente las acciones que afectaron y/o afectan al curso natural del agua y, se exponen las diferentes figuras legales y medioambientales de protección que operan en la zona de estudio.

1.5.1 SISTEMA HÍDRICO

El funcionamiento del SHPC nace en las lagunas de Cotacotani, cuyas aguas se canalizan por el río Desaguadero hasta los bofedales de Parinacota (**Figura 1-2**). En estos bofedales o ciénagas nace el río Lauca. La magnitud de la conexión existente entre el lago Chungará y la laguna Cotacotani es analizada en este trabajo.

Lago Chungará

Inmediatamente aguas arriba del SHPC se encuentra la cuenca que alberga al lago Chungará (cota del espejo de agua de 4561 msnm). Este lago está alimentado por el río Chungará que desemboca al lago por su borde este, y por el oeste se separa superficialmente de las lagunas Cotacotani por una colada volcánica de 4 km de ancho. Al norte se encuentra el volcán Parinacota, y al sur el complejo volcánico de Choquelimpie.

Lagunas de Cotacotani

Las lagunas Cotacotani (cota del espejo de agua de 4543 msnm) tienen una superficie aproximada de 6 km², existen numerosos islotes en su interior y su profundidad es de hasta 10 m. La cota de su espejo de agua es de alrededor de 18 m más baja que la del lago Chungará, lo que explicaría en parte su existencia, puesto que es posible una conexión subterránea gracias a este gradiente hidráulico entre ambas lagunas. Superficialmente, las lagunas Cotacotani reciben principalmente aportes desde el río Benedicto Morales al norte y la vertiente El Encuentro al este.

El sistema de lagunas de Cotacotani aporta aguas superficiales hacia el oeste a través del río Desaguadero. Este río se caracteriza por tener una gran pendiente y un corto recorrido hasta la ciénaga de Parinacota.

Ciénagas de Parinacota

La depresión de la ciénaga de Parinacota, de 28 km² de superficie, se extiende al poniente de la laguna Cotacotani a una altura de lámina de agua de 4.395 msnm, se encuentra cubierta en buena parte de bofedales. Por el noroeste queda confinada por cordones volcánicos a través de los cuales el río Lauca la desagua abriéndose camino en un verdadero cañón. Una nota característica en la ciénaga es el elevado número de islas e islotes que interrumpen la continuidad de su espejo de agua y la presencia de cerrilladas de materiales

volcánicos como bloques de andesita y basalto y acumulaciones de cenizas y arenas.

Cuenca del Río Lauca

Hacia la salida de la ciénaga en su extremo suroeste nace el río Lauca, el cual se dirige al oeste y poco después se encuentra con la cordillera Central o Chapiquiña que le imprime un cambio de rumbo hacia el sur - suroeste. La orientación de la traza del río se mantiene relativamente homogénea hacia el sur hasta la confluencia con la quebrada que aloja el caserío de Misitune. En esta zona el drenaje del río Lauca cambia su orientación (más bien adquiere la orientación de la importante quebrada tributaria de Vizcachani) hacia un curso sureste. Esta orientación sureste es la que recorre más kilómetros dentro de la cuenca, y se mantiene hasta poco después de la confluencia con el río Guallatire. La confluencia del Guallatire aporta un caudal significativo al caudal del río Lauca. Aguas debajo de esta confluencia el río Lauca vuelve a cambiar la orientación de su curso que se transforma a oeste-este hasta ingresar en Bolivia y desembocar al salar de Coipasa. A lo largo del tramo chileno el río Lauca recibe aportes de varios ríos tributarios. Los más importantes de estos aportes son por su ribera poniente la quebrada Ancochalloane, el río Vizcachane y Quiburcanca, y por la su lado oriente son los ríos Chusjavida y Guallatire, ambos alimentados desde cumbres con glaciares.

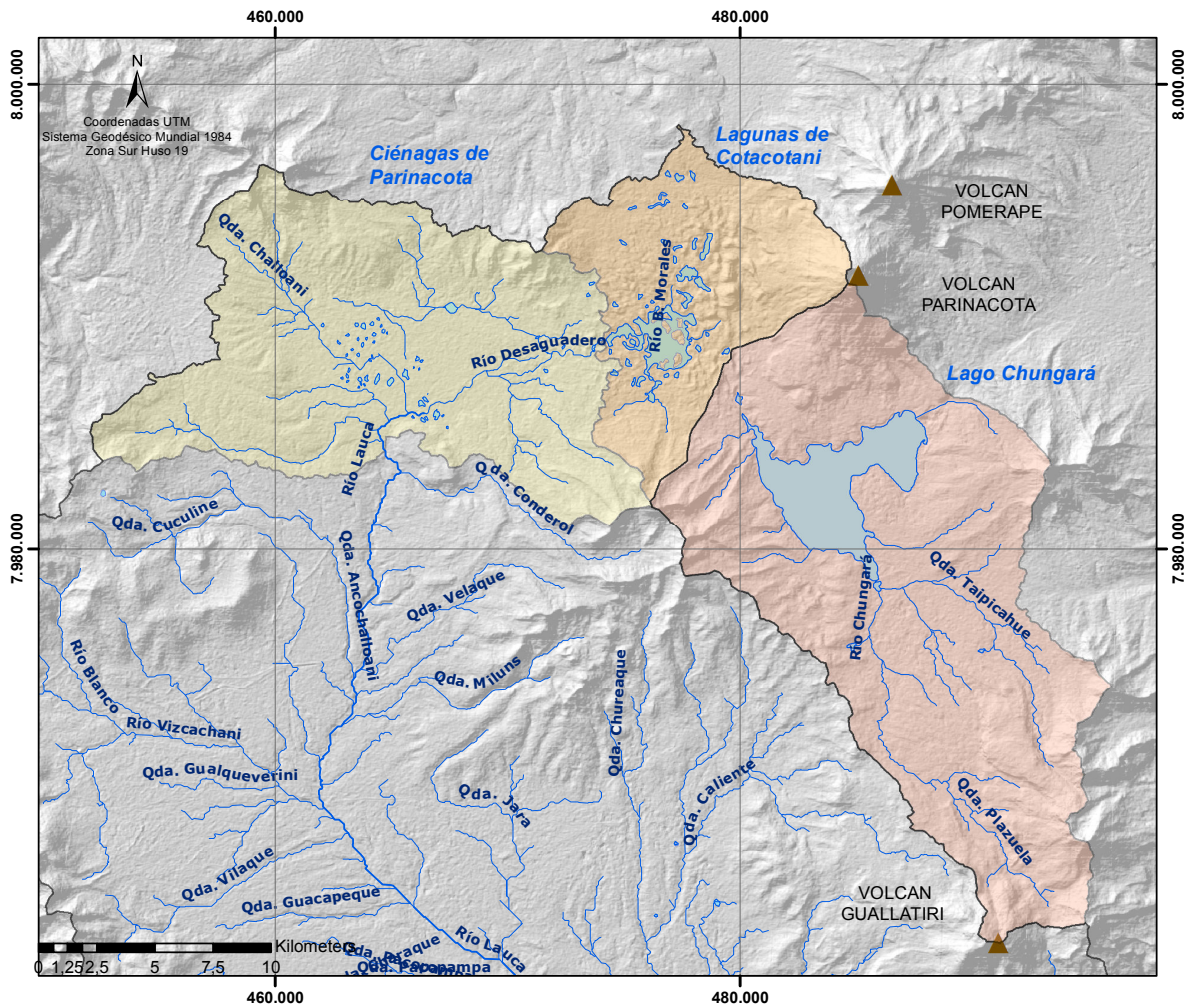


Figura 1-2. Red hídrica de la zona del estudio. Fuente: elaboración propia.

1.5.2 ANTECEDENTES DE LA SITUACIÓN HÍDRICA REGIONAL

El clima de la región tiene una marcada influencia del anticiclón del Pacífico, lo que limita las precipitaciones y produce un déficit hídrico característico de la zona norte del país. Por esta razón, depende altamente de sus recursos hídricos subterráneos.

La disponibilidad de agua actual por habitante es inferior a 1.000 m³/hab/año, umbral considerado internacionalmente como altamente restrictivo para el desarrollo económico (DGA 1996).

La primera obra hidráulica realizada en la cuenca del río Lauca fue la construcción del canal Lauca que se completó en 1962 y que todavía hoy se encuentra en funcionamiento. Este canal suministra parte de los recursos del río Lauca principalmente a la central hidroeléctrica Chapiquiña ubicada en el valle de San José además de beneficiar a las actividades agrícolas de la cuenca vecina.

En 1966 se inició el proyecto "Impulsión Ajata" destinado a bombear el agua del lago Chungará a las lagunas de Cotacotani. Sin embargo, esta obra hidráulica quedó incompleta y no fue hasta diciembre de 1981 cuando el Ministerio de Obras Públicas recibió una nueva propuesta para reactivar el proyecto. En enero de 1983 se reiniciaron las obras y en octubre del mismo año se iniciaba la operación de trasvase entre cuencas. El periodo de duración de esta operación finalizó en agosto de 1985 cuando se declara la suspensión de la extracción de aguas del Chungará mientras se mantenga a ese lago como parte del Parque Nacional del Lauca, es decir mientras no se le excluya del listado de la Unesco de ser Reserva de la Biosfera.

El canal Lauca capta las aguas del río Lauca en la zona de desagüe de las ciénagas de Parinacota a unos 4.250 msnm. y las conduce hasta la quebrada de Chusmiza, afluente del río San José. Fue construido para una capacidad de 2.750 L/s aunque en el registro disponible de caudales de la estación "Canal Lauca en Sifón N°1" no aparecen caudales superiores a 903 L/s. Este registro se inició en 1985 y se disponen de datos hasta 2013. En este intervalo de tiempo el caudal promedio anual ha sido de 762 L/s.

En los años 1992 y 1993 fueron perforados y habilitados 10 pozos en la cuenca del río Lauca y río Vizcachani, por orden del Ministerio de Obras Públicas con la finalidad de extraer aguas subterráneas de la cuenca del río Lauca. Durante las pruebas de bombeo se descartaron los pozos 1, 2 y 3 por no satisfacer las necesidades productivas y la explotación se enfocó en los restantes pozos (4 – 10). El caudal captado por los 7 sondajes ascendería a 280 L/s. Posteriormente en el año 2000, la empresa Ambar S.A. presentó un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) a la Dirección de Riego del Ministerio de Obras Públicas (MOP) para la extracción de aguas subterráneas. La Comisión de Medio Ambiente de la Región de Tarapacá no la aprobó hasta agosto del año 2004 en la Resolución

Exenta de Calificación Ambiental N°000087. Actualmente no se ha iniciado la explotación de los pozos ya que el proyecto se encuentra desistido desde 2005.

En la **Figura 1-3** se muestra la línea de tiempo de las diferentes acciones antrópicas que se han ido realizando en la zona de estudio.

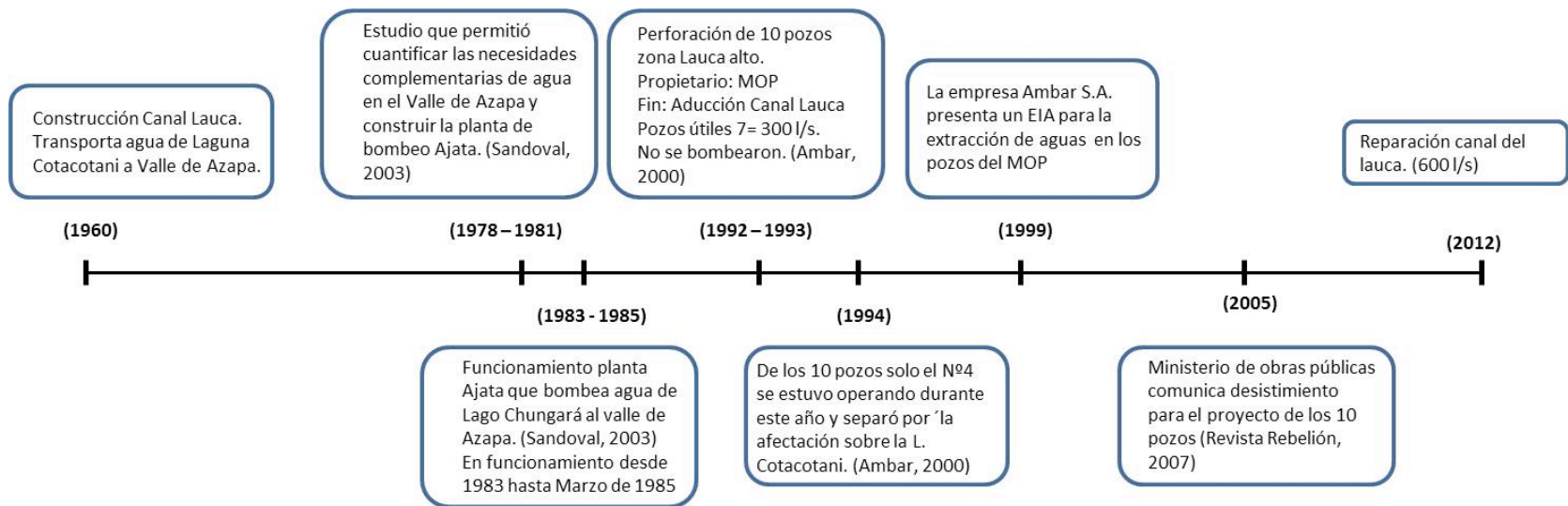


Figura 1-3. Línea cronológica de la situación de las obras realizadas en la zona de estudio. Fuente: elaboración propia.

1.5.3 ÁREAS PROTEGIDAS

Existen áreas protegidas para conservar la biodiversidad natural y cultural. A través de actividades económicas, como el turismo entre otras, muchas áreas protegidas son importantes para el desarrollo sostenible de comunidades locales, especialmente pueblos indígenas que dependen de ellos para su supervivencia. Los paisajes protegidos personifican valores culturales importantes; algunos de ellos reflejan las prácticas sostenibles de la utilización de la Tierra.

El Estado de Chile ha suscrito a varios convenios internacionales en esta línea, según CIREN (CIREN, 2013):

- Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB), Decreto Supremo N° 1963, del año 1994, del Ministerio de Relaciones Exteriores.
- Convención sobre la Conservación de las Especies Migratorias de Animales Silvestres (Convención de Bonn), Decreto Supremo N° 868, del año 1981, del Ministerio de Relaciones Exteriores.
- Convención para la Protección de la Flora, Fauna y las Bellezas Escénicas Naturales de América (Convención de Washington), Decreto Supremo N° 531, del año 1967, del Ministerio de Relaciones Exteriores.
- Convenio Marco sobre Cambio Climático de las Naciones Unidas de 1992 y el Protocolo de Kioto, Decreto Supremo N° 378, del año 2001, del Ministerio de Relaciones Exteriores.
- Convención de las Naciones Unidas de lucha contra la desertificación en los países afectados por sequía grave o desertificación, Decreto Supremo N° 2065, del año 1997, del Ministerio de Relaciones Exteriores.
- Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Flora y Fauna Silvestres (CITES), Decreto Supremo N° 141, del año 1975, del Ministerio de Relaciones Exteriores.
- Convención para la Protección del Patrimonio Mundial, Cultural y Natural, Decreto Ley N° 3056 y Decreto Supremo N° 259, del año 1980, del Ministerio de Relaciones Exteriores.

A lo largo del tiempo se ha ido declarando áreas protegidas como: el Parque Nacional Lauca, la Reserva Nacional Las Vicuñas, el Monumento Natural Salar de Surire, el Sitio Ramsar Salar de Surire, acuíferos protegidos, zonas o centros de interés turístico y Área de Desarrollo Indígena (ADI).

SISTEMA NACIONAL DE ÁREAS SILVESTRES PROTEGIDAS DEL ESTADO (SNASPE) Y SITIO RAMSAR

El área de estudio fue declarado en el año 1965 Reserva Forestal Lauca, con una superficie de 271.300 ha. Posteriormente, en 1970, fue redelimitado y redenominao como Parque Nacional de Turismo Lauca. Finalmente, se le otorgó la

categoría de Parque Nacional Lauca y se le designó su superficie actual de 137.883 ha, el 8 de marzo de 1983. Todo esto, mediante Decretos Supremos del Ministerio de Agricultura (Nº 284, 270 y 29, respectivamente). Adicionalmente, en 1989, el Ministerio de Minería lo declara Área de Interés Científico para Efectos Mineros (D.S. Nº 36). En el Parque Nacional Lauca existen diversos ambientes únicos o representativos de la diversidad ecológica natural del país, no alterados significativamente por la acción humana, capaces de autoperpetuarse, y en que las especies de flora y fauna o las formaciones geológicas son de especial interés educativo, científico o recreativo.

En el año 1983 se incluyen a la Red Mundial de Reservas de la Biosfera el Parque Nacional Lauca, la Reserva Nacional Las Vicuñas y el Monumento Natural Salar de Surire. Posteriormente, en 1984, mediante la Ley 18.362 se crea el Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE) por el Estado, donde se incluyen las áreas protegidas anteriores.

A nivel internacional, en 1996, es definido Sitio Ramsar el Salar de Surire por ser el único lugar de anidación de tres especies de flamencos (**Figura 1-4**).

La Reserva Nacional Las Vicuñas con 209.131 ha de extensión se creó el 8 de marzo de 1983 mediante el Decreto Supremo Nº 29. Los principales objetivos de la Reserva son, según el Plan de Manejo (1998), el desarrollar tecnologías de manejo sustentable de la vicuña en su estado silvestre, compatibilizándolo con el uso tradicional de los recursos naturales de la Reserva por parte de las comunidades locales; desarrollar modelos de manejo que promuevan la participación de las comunidades campesino-andinas. De igual forma, por las potencialidades que presenta la Unidad para la recreación de intereses especiales, el presente Plan incorpora el otorgar facilidades para el desarrollo de uso público.

A su vez, el Parque Nacional Lauca y la Reserva Nacional Las Vicuñas son considerados Sitios Prioritarios para la Conservación y Zonas o Centros de Interés Turístico.

La Corporación Nacional Forestal Región de Arica y Parinacota ha desarrollado un Plan de Manejo en cada área protegida, con sus respectivas particularidades, con el objetivo de lograr la conservación del patrimonio natural y cultural, el desarrollo sostenible de la comunidad indígena inserta y aledaña, la que a su vez ostenta derechos de propiedad reconocidos oficialmente sobre los terrenos privados que conforman cada SNASPE. El Plan de Manejo de cada SNASPE implica que se prohíbe llevar a cabo cualquier actividad que no esté contemplado en este.

En la **Tabla 1-1** se presenta un resumen del marco regulatorio, la entidad reguladora o administradora, la definición y la categoría de cada una de ellas (Rovira *et al.*, 2008).

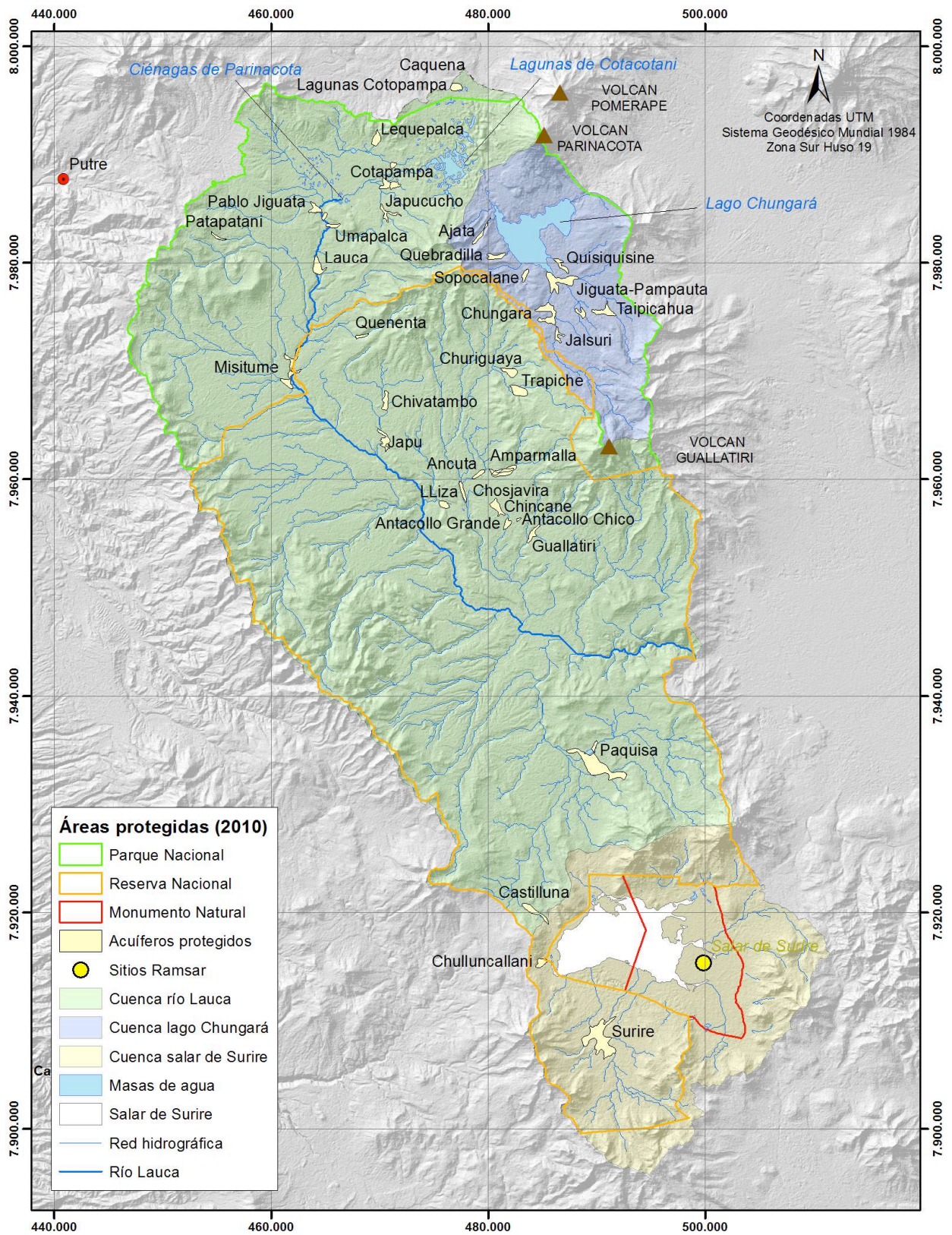


Figura 1-4. Áreas protegidas de la zona de estudio. Fuente: elaboración propia.

Sistema / Marco Regulatorio	Entidad Reguladora	Definición u Objeto del Sistema o Marco Regulatorio	Tipos de Figura (o categoría de manejo)
<p>Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE), la Ley 18.362/84 establecida a partir de decretos de los Ministerios de Relaciones Exteriores (Convención de Washington), de Agricultura y de Bienes Nacionales</p>	<p>Corporación Nacional Forestal (CONAF)</p>	<p>Mantener áreas de carácter único representativas de la diversidad ecológica del país, o lugares con comunidades animales o vegetales, paisajes o formaciones geológicas naturales, a fin de posibilitar la educación e investigación y de asegurar la continuidad de los procesos evolutivos, las migraciones animales, los patrones de flujo genético y la regulación del medio ambiente</p>	<p>Parque Nacional Área generalmente extensa, donde existen diversos ambientes únicos o representativos de la diversidad ecológica natural del país, no alterados significativamente por la acción humana, capaces de autopropagarse</p>
			<p>Monumento Natural Área destinada a la preservación de muestras de ambientes naturales y de rasgos culturales y escénicos asociados a ellos, y, en la medida compatible con esto, la realización de actividades de educación, investigación o recreación</p>
			<p>Reserva Nacional Área de conservación y protección del recurso suelo y de las especies amenazadas de fauna y flora silvestres, la mantención o mejoramiento de la producción hídrica, y el desarrollo y aplicación de tecnologías de aprovechamiento racional de la flora y la fauna</p>

Sistema / Marco Regulatorio	Entidad Reguladora	Definición u Objeto del Sistema o Marco Regulatorio	Tipos de Figura (o categoría de manejo)
Programa Hombre y Biosfera de UNESCO. Convención sobre la Protección del Patrimonio Mundial, Cultural y Natural, ratificada por Chile por el D.S. 259/80 del Ministerio de Relaciones Exteriores	En Chile, las reservas corresponden a unidades del SNASPE, administradas por CONAF	El objetivo de esta Convención es identificar, proteger, conservar, rehabilitar y transmitir a las generaciones futuras el patrimonio cultural y natural, reconociendo que esta función le incumbe primordialmente a los Estados.	Reservas de la Biosfera Las reservas de la biosfera deben cumplir con tres funciones complementarias: una función de conservación para proteger los recursos genéticos, las especies, los ecosistemas y los paisajes; una función de desarrollo, a fin de promover un desarrollo económico y humano sostenible; y una función de apoyo logístico, para respaldar y alentar actividades de investigación y educación. Incluyen zonas de ecosistemas terrestres o costero/ marinos y cuentan con áreas Núcleo, Buffer y de Corredor
Sitios protegidos por la Convención Ramsar. La UNESCO sirve como depositaria de la Convención y su administración está a cargo de la Oficina Ramsar, administrada por la UICN. Fue aprobada como Ley de la República en septiembre de 1980, mediante D.S. 771 de 1981	Regulación intersectorial: Ministerio de Relaciones Exteriores - CONAF, Comité Nacional de Humedales Administración: CONAF, privados.	Entre los objetivos de esta Convención suscrita por Chile se cuenta la protección de los Humedales de relevancia internacional, si cumple con alguno de los ocho requisitos de selección descritas por la Convención.	Sitios Ramsar Protección y conservación de humedales, lo que implica comprometer un Plan de Manejo de Conservación, desarrollo de actividades productivas, en un marco de uso racional y sostenible

Tabla 1-1. Principales marcos regulatorios para la conservación de la biodiversidad in situ. Fuente: Rovira et al., 2008.

HUMEDALES PROTEGIDOS

Los humedales altoandinos son sistemas que se ubican dentro de la región ecológica denominada Puna Árida que posee características únicas que la diferencian claramente de otras regiones ecológicas del Norte de Chile. En la región de Arica y Parinacota hay 57 humedales protegidos, con una superficie aproximada de 206,68 km², equivalentes al 1.23% del total de la superficie regional.

ACUÍFEROS PROTEGIDOS

En el año 1992 la Dirección General de Aguas (DGA) modificó los artículos 58 y 63 del Código de Aguas con el fin de prohibir la exploración y explotación de aguas subterráneas en los acuíferos alimentadores de las vegas y bofedales de las Regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá y Antofagasta. Lo anterior debido a que los acuíferos son el sustento de las actividades agroganaderas y de sobrevivencia de las comunidades andinas. Estos cambios en la legislación permitió establecer medidas de protección de estos ecosistemas únicos y del uso ancestral que las comunidades habían hecho de ellos. Posteriormente, la DGA realiza estudios para identificar y ubicar áreas de vegas y bofedales y delimitar sus acuíferos alimentadores. En 1996 se propugna que en dichas áreas no es posible autorizar exploraciones de aguas subterráneas ni constituir derechos de aprovechamiento de aguas subterráneas si no se cuenta previamente con una evaluación ambiental favorable a través la Resolución DGA N° 909.

ÁREAS DE DESARROLLO INDÍGENA (ADIs)

Las Áreas de Desarrollo Indígena (ADIs) surgen a partir de la aplicación del Art. 26° de la Ley N° 19.253 aprobada en Octubre de 1995. De acuerdo a esta normativa, son definidas como espacios territoriales determinados en los cuales los órganos de la Administración del Estado y deben focalizar su acción para el mejoramiento de la calidad de vida de las personas de origen indígena que habitan en dichos territorios. Los objetivos específicos de estas medidas legales son respetar, proteger y promover el desarrollo de los indígenas, sus culturas, familias y comunidades, además de proteger las tierras indígenas, velar por la adecuada explotación de estas tierras, y velar por el equilibrio ecológico de estas tierras. Posteriormente, el 15 de septiembre de 2009 el Congreso Nacional aprobó el Convenio N° 169, en el cuál se señala que se deberá consultar a los pueblos originarios, mediante procedimientos apropiados y en particular a través de sus instituciones representativas, cada vez que se prevean medidas legislativas o administrativas susceptibles de afectarles directamente.

2 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES

El análisis y recopilación de antecedentes tiene como objetivo compilar los estudios previos sobre recursos hídricos. De esta forma, se realiza una selección y resumen de los estudios considerados como relevantes para la caracterización del medio físico y químico del SHPC y cuenca de la laguna Chungará. Esta información es la base para la interpretación de los datos obtenidos en terreno y la elaboración del modelo conceptual.

Se han revisado diversos estudios e informes de dominio público en instituciones como la Dirección General de Aguas (DGA), Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), Universidades, Centro de Información Recursos Hídricos (CIREN), Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), Servicio de Evaluación de Evaluación Ambiental (SEA), Comisión Nacional de Riego (CNR), Instituto Geográfico Militar (IGM), entre otros. La siguiente información se dispone bajo la estructura que define un modelo hidrogeológico conceptual integrado, según las siguientes disciplinas:

- Hidrología
- Geología
- Hidrogeología
- Hidroquímica e isótopos
- Balance Hídrico

Este trabajo de tesis fue desarrollado en conjunto con un estudio regional de mayor alcance desarrollado por Matraz (sin publicar) para la DGA sobre la disponibilidad hídrica del la Cuenca del Río Lauca. Algunas de las actividades de investigación desarrolladas por Matraz fueron compartidas para la presente investigación, como por ejemplo la campaña de investigación geofísica. El trabajo desarrollado por Matraz no se ha publicado y se ha ejecutado en paralelo con este trabajo de tesis, por lo cual sus aportes no aparecen resumidos en este capítulo, sino que aparece referenciado a lo largo del texto.

2.1 HIDROLOGÍA

Entre los trabajos hidrológicos desarrollados en la cuenca se pueden distinguir dos tipos de escala de estudios: nivel regional y nivel local (**Figura 2-1**).

A nivel regional destacan varios informes entre los que se encuentran dos estudios realizados por la DGA: uno en el año 1986 en el que desarrollan varios métodos para el cálculo de la evaporación desde los salares; y otro en 1992 en el que evalúan las consecuencias de la época de sequía que sufrió la región de Arica y Parinacota. A continuación, ARRAU (Arrau, 1997) realiza la caracterización de los recursos hídricos disponibles en el Sistema Lauca-Azapa.

Posteriormente, AQUATERRA (Aquaterra, 2011) estima la recarga de agua de las principales cuencas que reúnen condiciones altiplánicas o de vertiente pacífica, entre las que se encuentra la cuenca del río Lauca.

A escala local, existen los informes que analizan los recursos hídricos superficiales del río Lauca y lago Chungará, BENÍTEZ (Benítez, 1975), y el *lago Chungará y lagunas Cotacotani*, QUINTANA (Quintana, 1989).

Desde los años 60', la cuenca del Lauca ha servido como fuente de recursos hídricos para los valles precordilleranos. Por este motivo algunos de los documentos analizados recogen información relacionada con ello y buscan estimar las reservas existentes con el objetivo de estimar el caudal explotable en la zona.

El trabajo desarrollado por QUINTANA (Quintana, 1989) describe en detalle las reservas de agua en las lagunas de Cotacotani y el lago Chungará, y el documento de AQUATERRA (Aquaterra, 2011) realiza un estudio hidrológico en detalle de la cuenca del río Lauca donde como principal objetivo se analiza el cálculo de la recarga. Para ello tiene en cuenta como principales factores la recarga efectiva, la evaporación real, el caudal de escorrentía superficial y las extracciones de agua superficial.

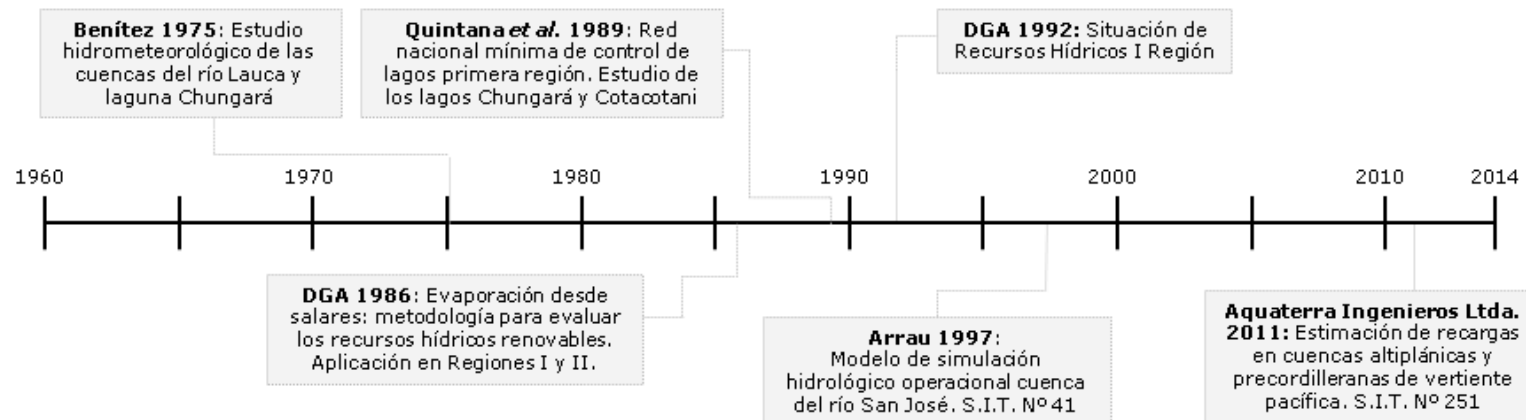


Figura 2-1. Línea de tiempo de estudios hidrológicos en la cuenca de estudio. Fuente: elaboración propia.

2.2 GEOLOGÍA

La geología de la zona ha sido estudiada desde la década de los 70' hasta la actualidad con diferentes objetivos e intereses (**Figura 2-2**).

Los primeros trabajos realizados en la zona corresponden a estudios geológicos del salar de Surire (promovido por sus reservas de boratos). Posteriormente, se amplió el área de estudio a los sectores Chapiquiña-Livilcar-Tignamar; Surire-Quiburcana y río Putani (Muñoz, 1988).

Los estudios realizados en la década de los 90' se enfocan principalmente en la investigación de la historia del Cenozoico. Posteriormente se destacan los estudios de GARCÍA *et al.* (García *et al.* 2000 y 2004) que tratan en detalle los eventos volcánicos explosivos del Mioceno Inferior en la XV Región, y la geología regional mediante de la publicación de la Hoja de Arica; y el trabajo de Wörner *et al.* 2000 quienes dataron las rocas cenozoicas del norte de Chile (18°-22°S) y relacionaron la evolución tectónica de los Andes con el magmatismo terciario y cuaternario. A continuación en el año 2005, se analiza la relación entre el anticlinal de Chucal y la cuenca del río Lauca (Charrier *et al.* 2005) y las deformaciones cenozoicas que sufre la cuenca (Farías *et al.* 2005).

A una escala de investigación más amplia, se publican estudios geológicos como "Los yacimientos de boratos de Chile" (Chong *et al.*, 2000), la Hoja geológica de Arica (García *et al.*, 2004) y The Geology of Chile (Moreno *et al.*, 2007).

A nivel más local, en las investigaciones de POLANCO *et al.* (Polanco *et al.*, 2006) y CLAVERO *et al.* (Clavero *et al.*, 2012) se desarrolla la geología del volcán Parinacota.

En términos hidrogeológicos, el mayor interés reside en las formaciones terciarias y cuaternarias debido a la presencia de estratos sedimentarios con capacidad para el almacenaje y transmisión de agua subterránea. Estos estratos se encuentran dentro de la Formación Lupica, Formación Lauca y los depósitos aluviales actuales. Dentro de estas formaciones también se encuentran estratos asociados con eventos volcánicos de diferentes edades. La clasificación de estas formaciones volcánicas como unidades acuíferas o acuitardos queda inicialmente sujeta a la determinación de su grado de fracturación (permeabilidad secundaria).

Tanto la secuencia como los espesores y estructura de la Formación Lauca y Formación Lupica en la parte central de la cuenca del río Lauca han sido bien caracterizadas por diferentes autores. Sin embargo, esto no sucede en el sector dentro del SHPC, donde no han sido encontrados cortes geológicos o columnas estratigráficas representativas.

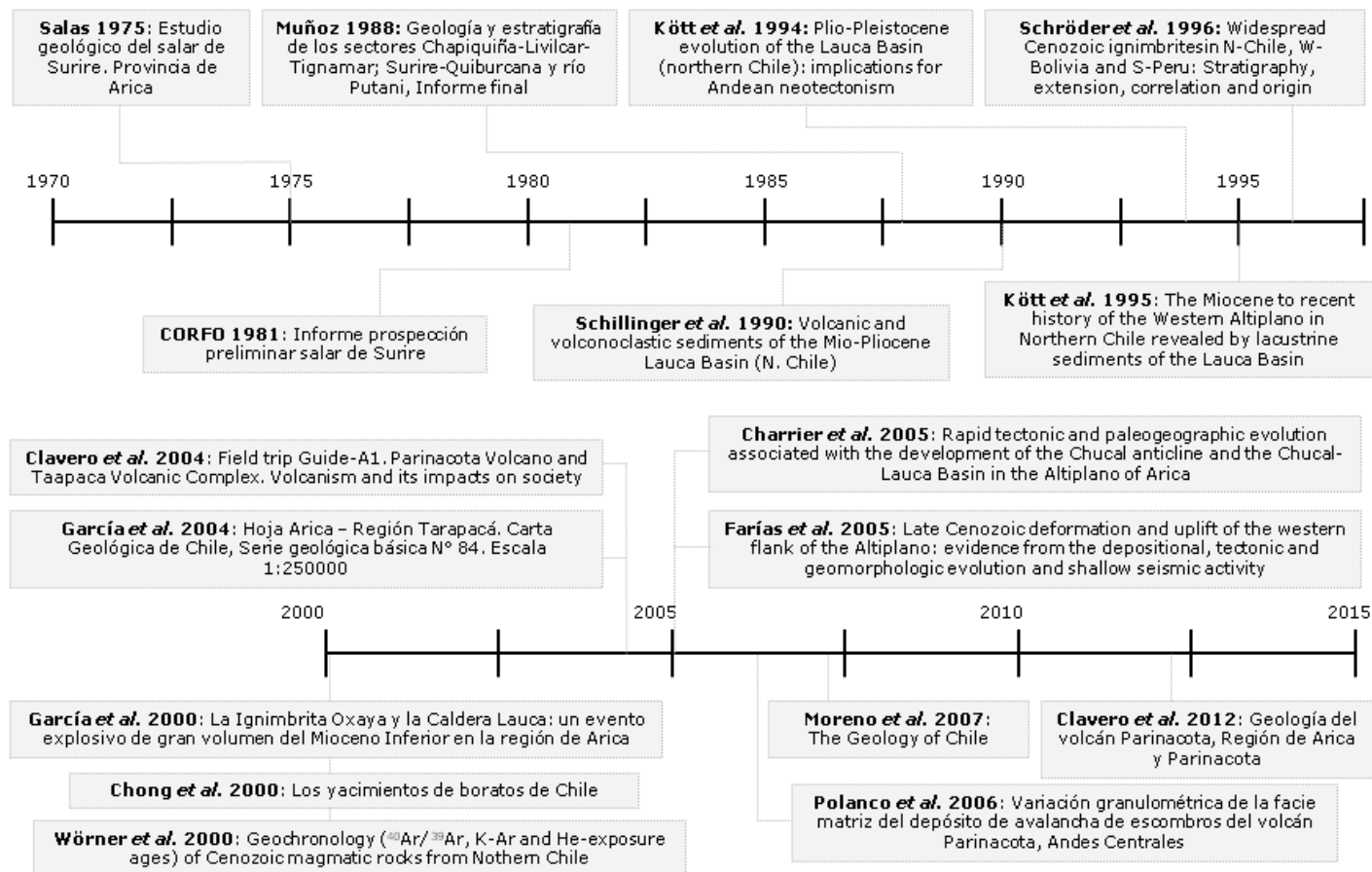


Figura 2-2. Línea de tiempo de estudios geológicos en la cuenca de estudio. Fuente: elaboración propia

2.3 HIDROGEOLOGÍA

Los primeros trabajos hidrogeológicos se remontan a la década de los 70', cuando se realizó un levantamiento general de las características hidrológicas e hidrogeológicas de las cuencas hidrográficas del Norte Grande de Chile por KLOHN (Klohn, 1972). Al año siguiente y centrado únicamente en la cuenca del río Lauca, ABELOVICH (Abelovich, 1973) presentó un trabajo donde describió la ubicación de las capas permeables como posibles unidades acuíferas (**Figura 2-3**).

Posteriormente, con el objetivo de estudiar la viabilidad de explotar las aguas subterráneas de la cuenca del río Lauca, el Ministerio de Obras Públicas solicita estudios para analizar la viabilidad de la extracción de aguas subterráneas en 6 pozos en el río Lauca y 1 pozo en el río Vizcachane, AYALA *et al.*, (Ayala *et al.*, 1994 y 1996), AMBAR (AMBAR, 1996). Esta investigación se complementó con un estudio geofísico y con el análisis hidrogeológico desarrollado por la empresa consultora Álamos y Peralta. En el año 2011, con el mismo propósito, la División de Estudios y Planificación de la DGA realiza el estudio "Evaluación De Recursos Incrementales Aportados Al Valle De Azapa Derivados De Aguas Subterráneas Del Acuífero Del Río Lauca, S.D.T. N° 315", considerando 3 alternativas de extracción de aguas en la cuenca del río Lauca.

En relación con las unidades hidrogeológicas, el primer autor en identificar el potencial hidrogeológico de la Formación Lauca fue ABELOVICH (Abelovich, 1973) que clasificó los estratos de conglomerados presentes en esta formación como las unidades acuíferas más importantes de la cuenca.

Este primer análisis de unidades hidrogeológicas en la cuenca del río Lauca no sería actualizado sino hasta la construcción de 10 pozos de producción para el canal Lauca en el sector de cabecera del río Lauca. La construcción de éstos pozos se transformó en la principal fuente de información para la definición de unidades hidrogeológicas en detalle y la obtención de las propiedades hidráulicas del acuífero.

Una de las características más relevantes observadas en estos pozos fue la condición de surgencia en 3 perforaciones indicando así la existencia de un acuífero inferior confinado. En ensayos de bombeo posteriores se verificó la existencia de una relación río-acuífero directa entre el acuífero superior y las aguas del río Lauca.

El mayor inconveniente relacionado con la información de tipo hidrogeológica disponible es la ausencia de una distribución espacial adecuada para la caracterización de acuíferos. De este modo, las características acuíferas en cuanto a estructura y propiedades hidráulicas son desconocidas en gran parte de la zona.

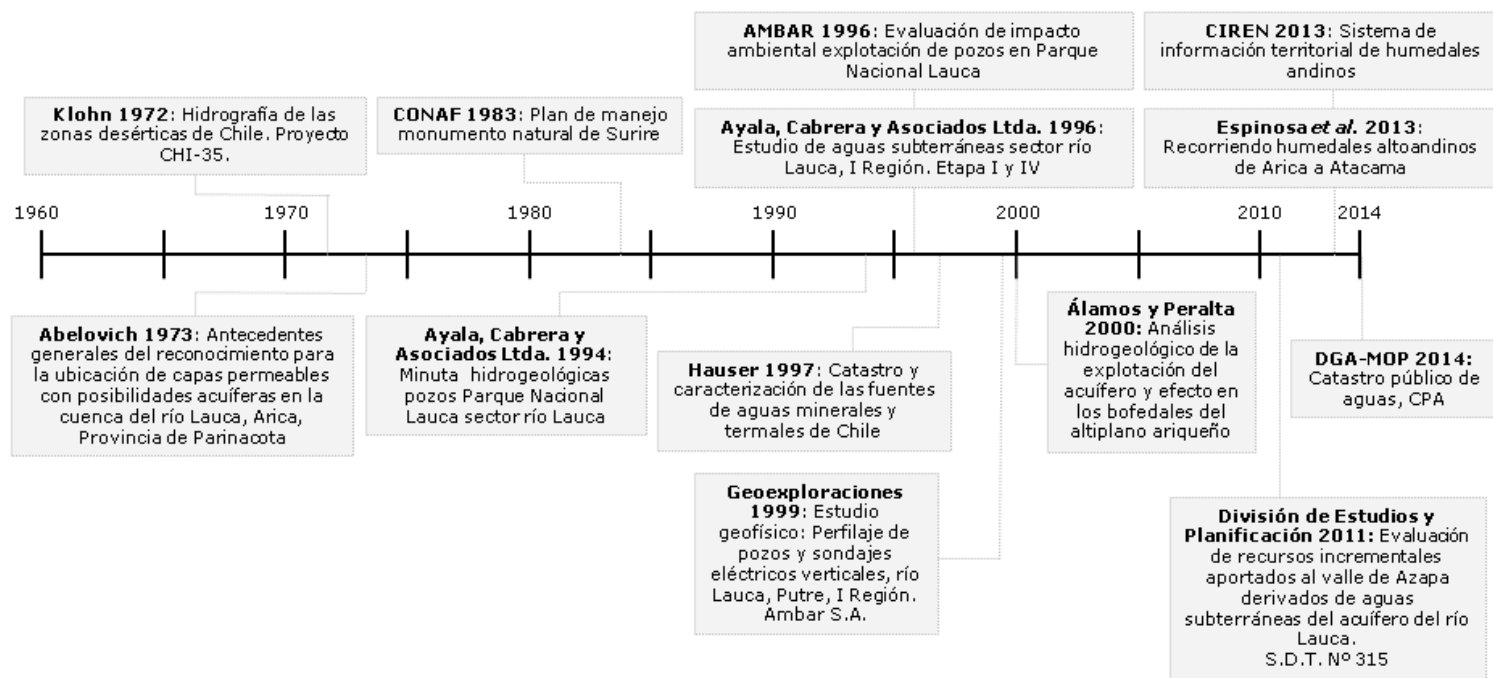


Figura 2-3 Línea de tiempo de estudios hidrogeológicos en la cuenca de estudio. Fuente: elaboración propia.

2.4 HIDROQUÍMICA

Los primeros estudios hidroquímicos se ejecutan durante las décadas de los 70's y 80's, y definen las principales huellas químicas de la zona de estudio. En la **Figura 2-4** se presenta una línea de tiempo que describe la cronología de los estudios.

El lago Chungará se analiza con detalle en el trabajo de Dorador *et al.*, 2003, para detectar posibles variaciones temporales físicas, químicas y biológicas. A continuación se publicaron estudios regionales que analizan diferentes cuencas del norte de Chile, entre las que se encuentran las cuencas de estudio.

En el año 2006 un estudio investiga mediante análisis hidroquímicos la conexión entre la cuenca del lago Chungará y las lagunas de Cotacotani. Este informe complementa el análisis hidroquímico con el isotópico.

Los antecedentes analizados para el conocimiento y análisis de la hidroquímica e isótopos se clasifican según la zona de estudio. Los documentos revisados realizan un análisis hidroquímico de la cuenca del río Lauca con diferente escala de detalle AYALA (Ayala, 1994), RISACHER (Risacher, 1999), HERRERA (Herrera, 2006) y DICTUC (DICTUC, 2009). Los antecedentes más relevantes para este trabajo corresponden al informe realizado por RISACHER (Risacher, 1999) y HERRERA (Herrera, 2006). El informe de RISACHER (Risacher, 1999) orientó la planificación de la campaña de muestreo de aguas superficiales y subterráneas que se realizó en este estudio. Es así como en algunos de estos puntos se volvió a muestrear para determinar posibles variaciones significativas en la composición hidroquímica e isotópica entre el estudio de RISACHER (Risacher, 1999) y la actualidad.

Por otro lado, el informe de HERRERA (Herrera, 2006) es relevante porque aporta un importante conocimiento sobre tres aspectos fundamentales:

- La composición isotópica del agua subterráneas y de la precipitación en el área.
- Las edades de las diferentes líneas de flujo del aguas subterráneas.
- La circulación del agua subterránea a través de los cuerpos volcánicos.

Los puntos de muestreo de este trabajo también fueron considerados para la planificación de la campaña de muestreo hidroquímico y para la caracterización general hidroquímica e isotópica.

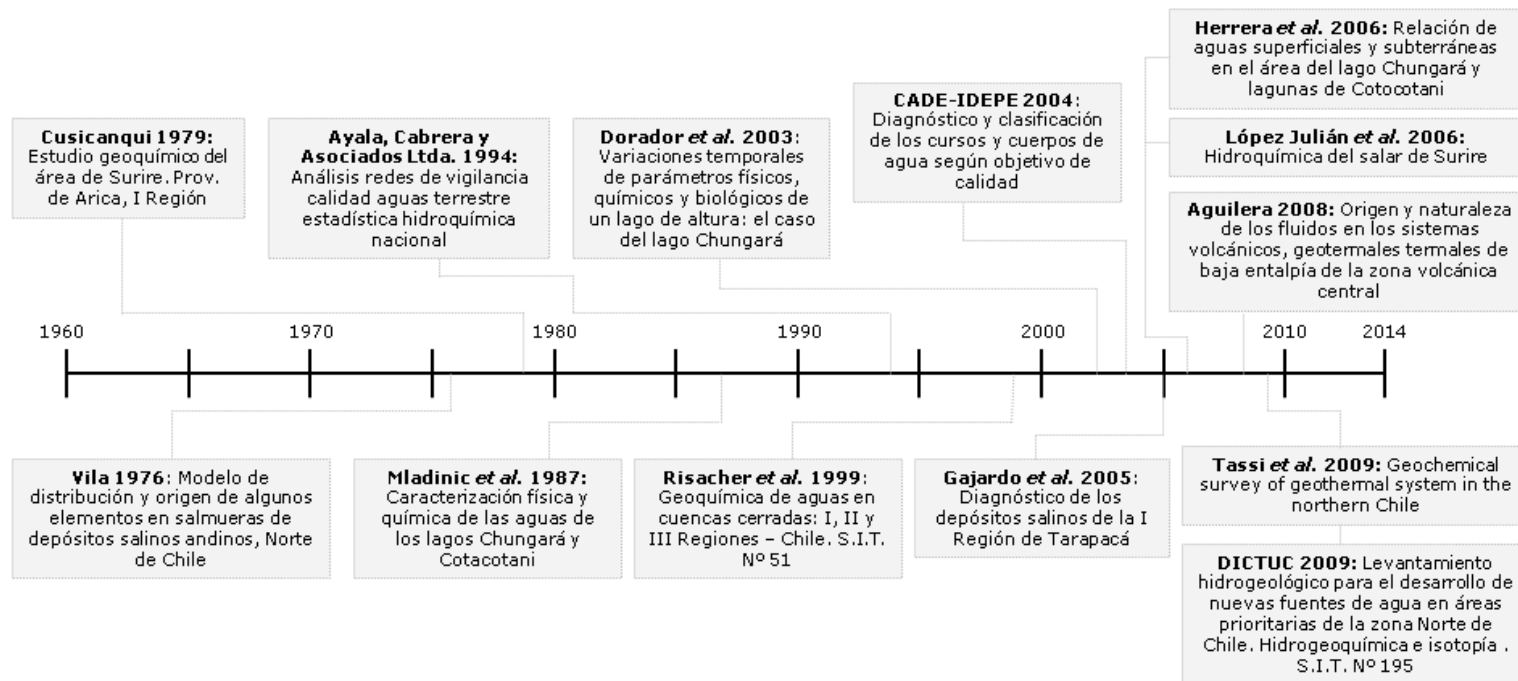


Figura 2-4. Línea de tiempo de estudios hidroquímicos e isotópicos en la cuenca de estudio. Fuente: elaboración propia.

2.5 BALANCE HÍDRICO

El primer trabajo que estima los valores de los caudales de las distintas vertientes existentes en la cuenca del lago Chungará, las lagunas de Cotacotani y las ciénagas de Parinacota se desarrolla en NIEMEYER (Niemeyer,1964), sin embargo no es sino hasta la década de los 90´ cuando se analizan los registros de las redes fluviométricas, redes de calidad de aguas y estaciones meteorológicas de la región de Arica y Parinacota.

El estudio de AYALA *et al.* (Ayala *et al.*, 1994) cuantifica el porcentaje de agua que aporta el acuífero y el río Lauca respectivamente en las pruebas de bombeo en los pozos del MOP. Posteriormente, RISACHER *et al.* (Risacher *et al.*, 1999) realiza el balance hídrico de las lagunas de Cotacotani y el lago Chungará mediante el análisis hidroquímico de las aguas superficiales y subterráneas de dichas cuencas. En el año 2010, se publica el balance hídrico del sector norte de la cuenca del río Lauca para el "Plan de acción estratégica para el desarrollo hídrico de la región de Arica y Parinacota". Un año después AQUATERRA (Aquaterra, 2011) estima la recarga de cuencas altiplánicas entre las que se encuentra la cuenca de estudio, **Figura 2-5.**

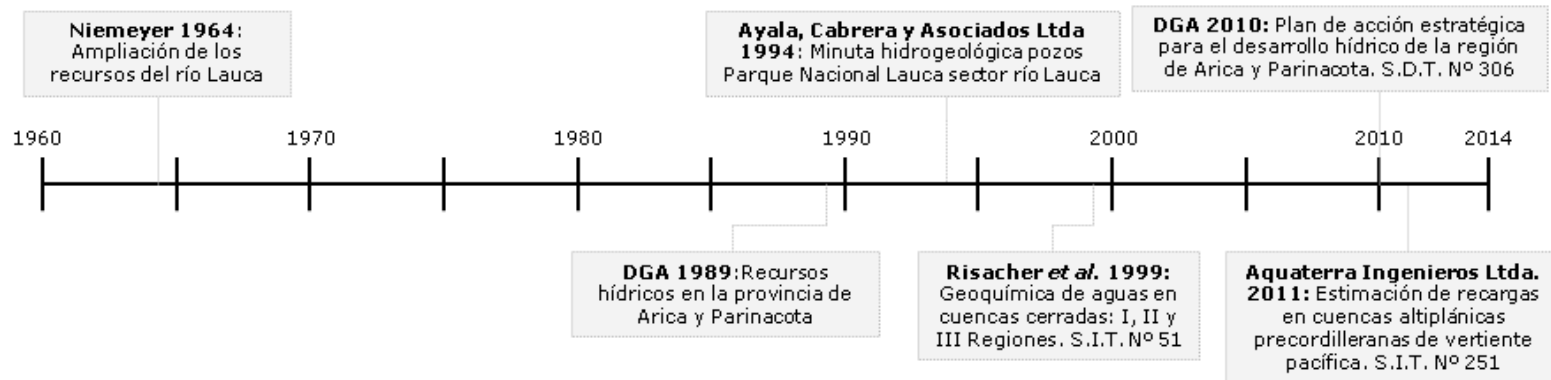


Figura 2-5. Línea de tiempo de estudios de balance hídrico en la cuenca de estudio. Fuente: elaboración propia.

Comparativa de balances hídricos

Se desarrollo una comparativa de los balances hídricos realizados por distintos autores y distintas épocas Tabla 2-1. Comparativa de los balances hídricos realizados por distintos autores y distintas épocas. Fuente: elaboración propia.. La variación de los caudales de una publicación a otra se debe principalmente a los distintos métodos utilizados para el cálculo de los caudales y los años en que se hayan realizado las medidas.

NIEMEYER (Niemeyer, 1964) realizó mediciones periódicas de caudales de todos los cursos de agua comprometidos, muestreos simultáneos y ulterior análisis químico de las aguas del sistema, evaporación al nivel de las lagunas, precipitaciones en los mismos puntos y observación periódica de los niveles del espejo de agua. También se aprovecharon los levantamientos topográficos con curvas de nivel del fondo de las lagunas para obtener las curvas de capacidad.

KLOHN (Klohn, 1972) basa sus datos de caudales en el informe de NIEMEYER (Niemeyer, 1964). Tal y como se observa en la tabla comparativa, los datos son coincidentes en prácticamente en todos los campos. Solo que KLOHN (Klohn, 1972) presenta los valores de época de sequía y de lluvias en alguno de los campos.

RISACHER (Risacher, 1999) utiliza datos químicos para calcular los balances de las lagunas de Cotacotani y Chungará. Tras realizar los análisis utiliza los datos de concentración de cloruros para el cálculo, ya que es el único elemento conservativo que puede utilizar. A su vez, plantea utilizar el Litio también con este fin, pero sus concentraciones son demasiado cercanas al límite de detección analítico.

DGA (DGA, 1989) utiliza la metodología indicada en la **Figura 2-6** para el cálculo de su balance y sitúa los datos en tablas sobre un mapa.

De los estudios realizados que contienen balance hídrico, el más completo sería el de NIEMEYER (Niemeyer 1964). Este informe realizó las medidas directas sobre los distintos ríos y afluentes, dejando un claro registro de los caudales de toda la cuenca de estudio. RISACHER (Risacher 1999) obtiene sus medidas de caudal a través de balances de masa y compara sus resultados con los de NIEMEYER, dando así veracidad a los cálculos que este realiza.

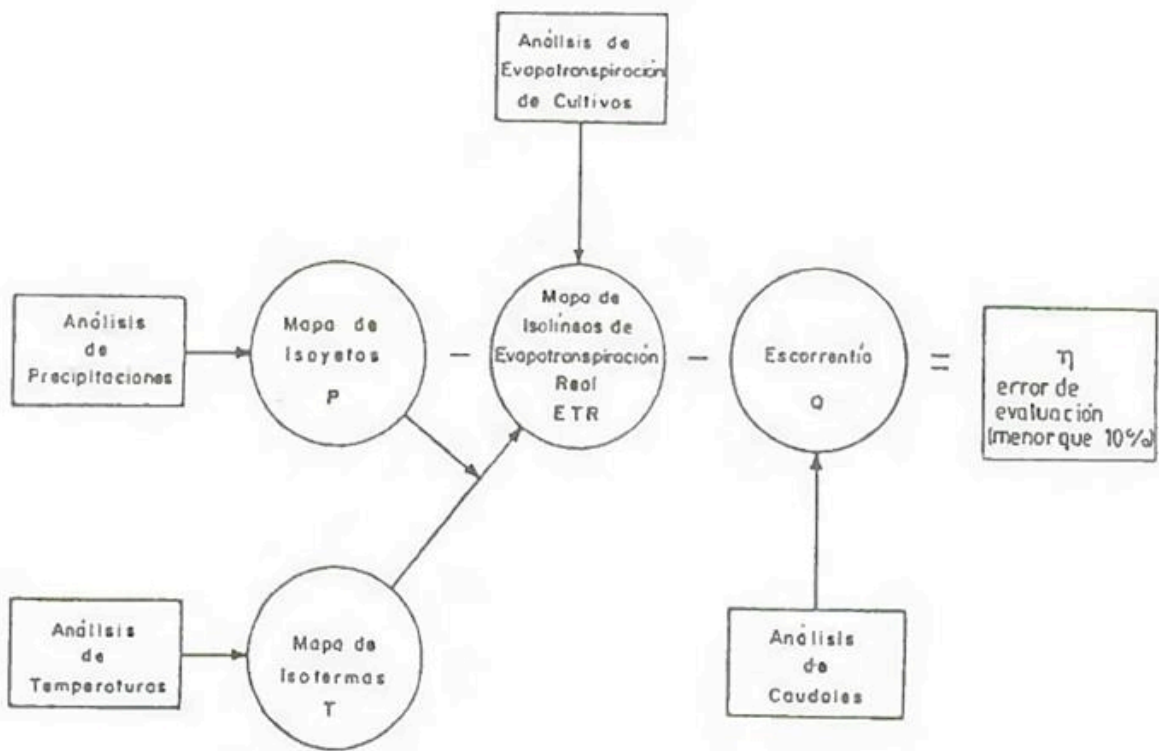


Figura 2-6. Metodología balance hídrico. Fuente: DGA, 1989.

Subcuenca	Componente		Tipo	Niemeyer, 1964 Caudal	Klohn, 1972 Caudal	DGA, 1989 Caudal	Risacher, 1999 Caudal
Chungará	Entradas	Precipitación					241 L/s
		Aportes Subterráneos	Subterránea				669 ¹ L/s
		Río Chungará	Superficial	300-450 L/s	300-500 L/s		
		Estero Sopocolane	Superficial	30-160 L/s	30-160 L/s		
		Vertiente Mal Paso	Superficial	15 L/s	15 L/s		
	Ajata	Superficial	20 L/s	20 L/s			
	Salidas		Subterránea				32 L/s
Evaporación			1200 mm/año			878 L/s	
Cotacotani	Entradas	Precipitación					72 L/s
		Lago Chungará	Subterránea		90-110 L/s		3771 L/s
		Benedicto Morales	Superficial	90-110 L/s			
	Estero El Encuentro	Superficial	20 L/s	20 L/s			
	Salidas	Río Desaguadero	Superficial	260 L/s			245 L/s
		Evaporación		1000 mm/año			204 L/s
Ciénaga de Parinacota	Entradas	Río Desaguadero	Superficial	260 L/s			
		Ojos de Agua	Superficial	150 L/s	150 L/s		
		Chacurpujo	Superficial	40 L/s	40 L/s		
		Copapujo	Superficial	80-100 L/s	80-100 L/s		
		Chubire	Superficial	65 L/s	65 L/s		
		Tudune, Pocroco, Apocucho, Untupujo y Chungarilla	Superficial-termal	40 L/s	40 L/s		
	Salidas	Río Lauca	Superficial	300 L/s	300-1000 L/s		
		Canal del Lauca	Superficial			790 L/s	

Tabla 2-1. Comparativa de los balances hídricos realizados por distintos autores y distintas épocas. Fuente: elaboración propia.

3 ACTIVIDADES DE TERRENO

Se realizaron campañas de terreno con tres objetivos específicos:

- Visita de reconocimiento
- Definición y acompañamiento de de campaña geofísica
- Toma de muestras para hidroquímica e isótopos en época seca y post lluvias

Las muestras para hidroquímica y algunos aforos se realizaron con una temporalidad que pudiera reflejar los cambios estacionales en los caudales de los ríos, tratando de evitar la época de máximas lluvias del altiplano, ya que esto alteraría los resultados de medición.

La recogida de muestras para hidroquímica se realizó con 5 meses de diferencia por el mismo motivo: poder captar si existe estacionalidad en la química de las agua entre la época seca y la húmeda.

3.1 PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

La campaña de prospección geofísica se realizó mediante el método Transiente Electromagnético (TEM). El uso de métodos geofísicos es una herramienta válida como primer levantamiento de información sobre la hidrogeología de la cuenca y la distribución de las unidades subsuperficiales. El método (TEM) se suele ocupar para determinar la posición del nivel freático y el contacto entre diferentes materiales con diferentes respuestas eléctricas.

Para la realización de la medidas TEM se utilizaron dos equipos del instrumento llamado FAST-TEM 48. En general se utilizaron *loops* de 100 x 100 m y 150 x 150 m.

Se realizaron 3 perfiles con un total de 63 puntos de Transiente Electromagnético dentro del área de estudio, en grupos, diseñados para abordar distintos objetivos. La ubicación de los perfiles, y el detalle de los puntos ensayados se muestran en la **Figura 3-1**, Figura 3-2, Figura 3-3, Figura 3-4 y Figura 3-5.

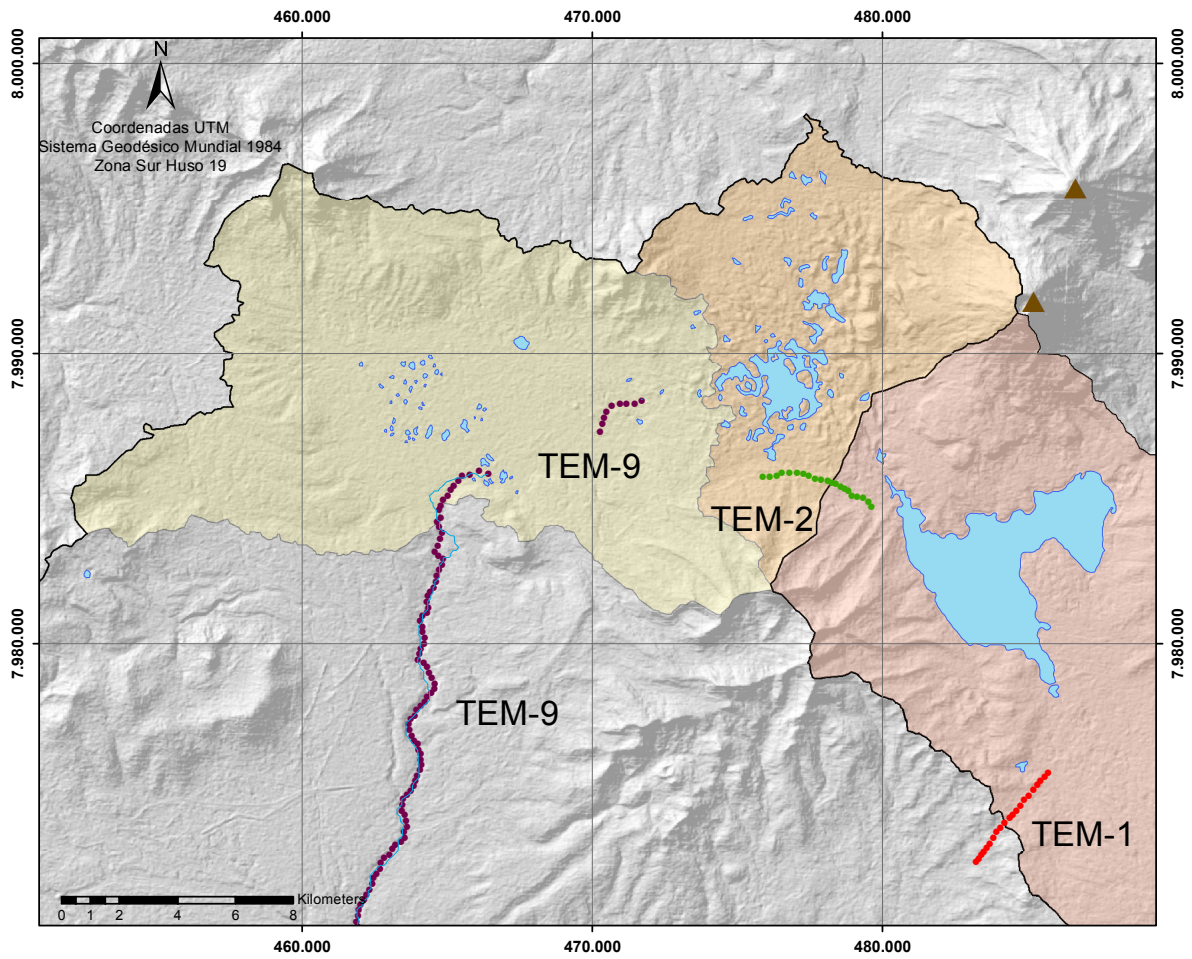


Figura 3-1. Ubicación de los perfiles TEM. Fuente: elaboración propia

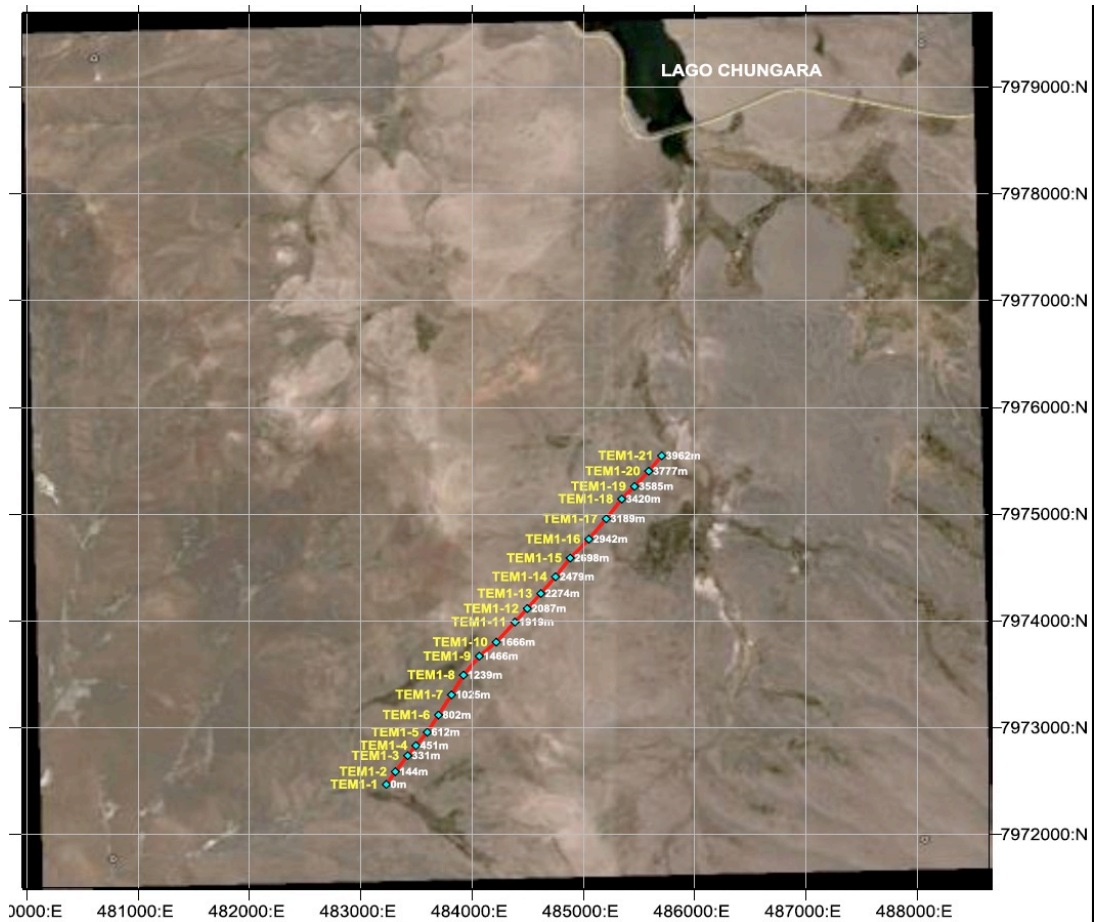


Figura 3-2. Puntos ensayados en el perfil TEM 1. Fuente: elaboración propia

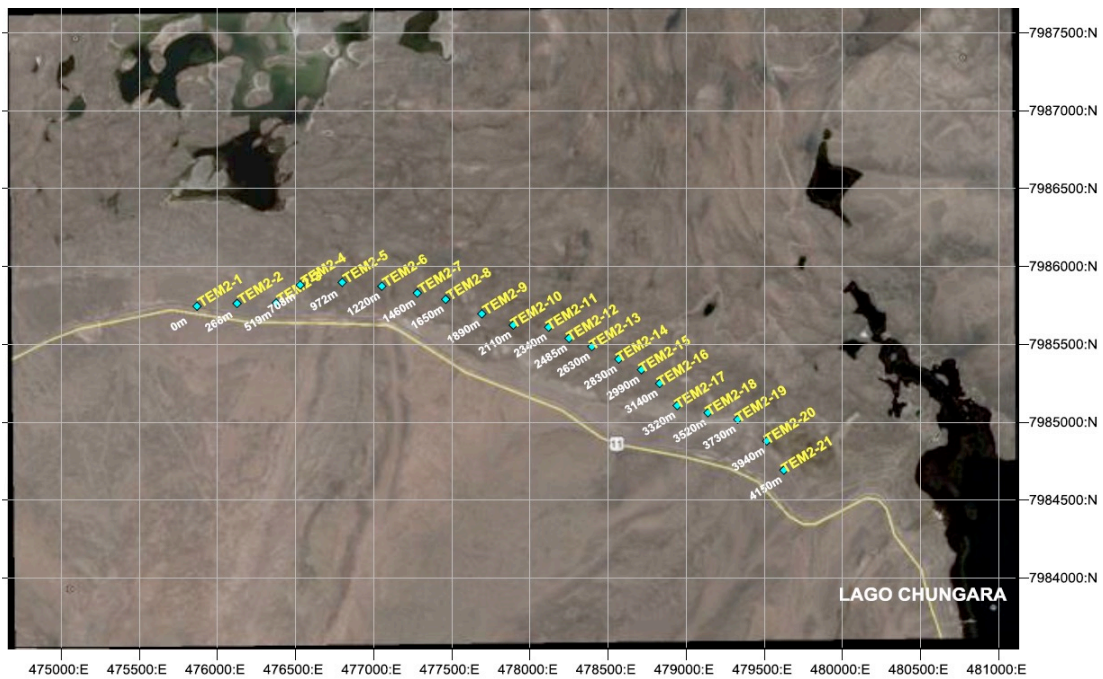


Figura 3-3. Puntos ensayados en el perfil TEM 2. Fuente: elaboración propia

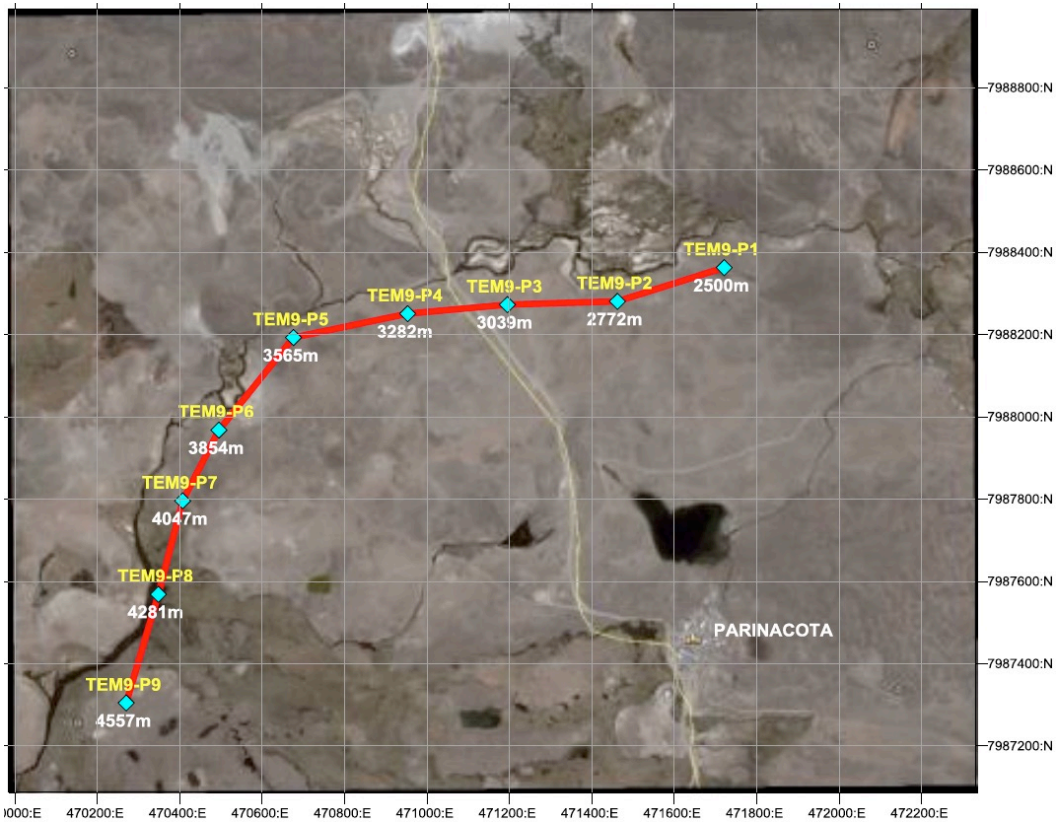


Figura 3-4. Puntos ensayados en el perfil TEM 9. Fuente: elaboración propia

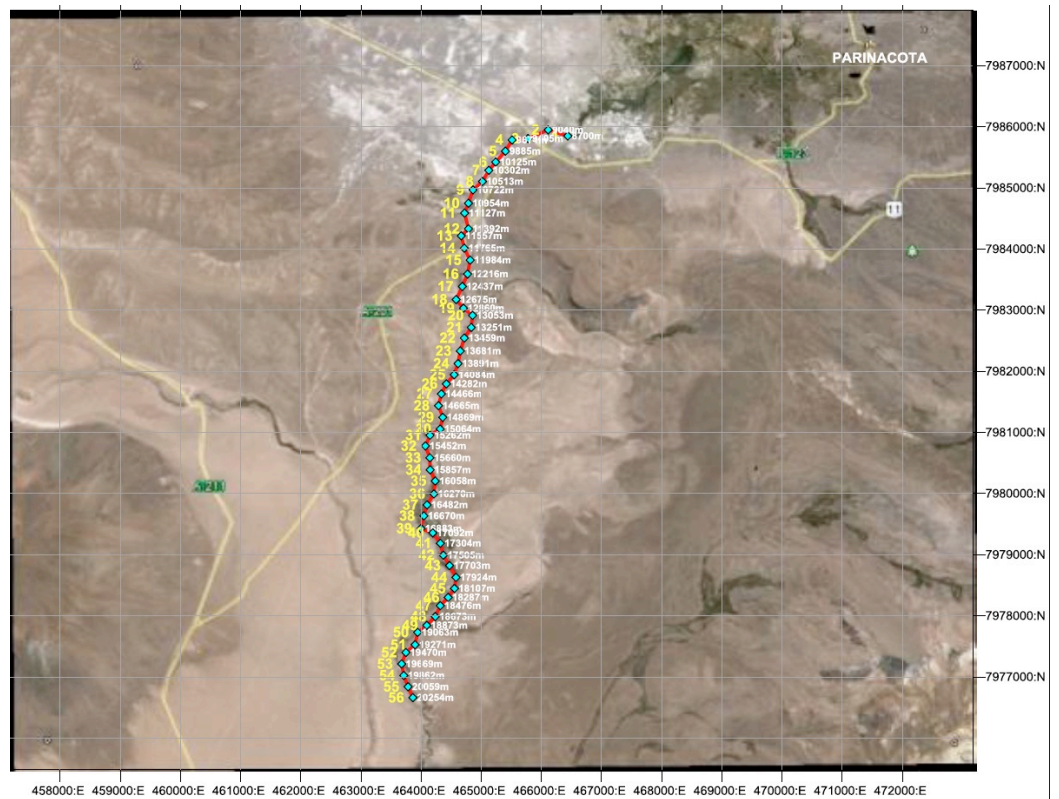


Figura 3-5. Puntos ensayados en el perfil TEM 9. Fuente: elaboración propia

3.2 CAMPAÑA HIDROQUÍMICA

Se realizó un visita previa de reconocimiento, y a continuación se implementó el diseño de las campañas de hidroquímica para predefinir los puntos a muestrear, determinar el protocolo de muestreo de las aguas y seleccionar los laboratorios tanto para el análisis hidroquímico. En el SHPC se realizaron dos campañas de terreno para toma de muestras, y así caracterizar las aguas antes y después de la época de lluvias (enero a marzo).

Se desarrolló un plan de muestreo para definir aspectos específicos acerca de lugares o sitios de muestreo, métodos y técnicas, número de muestras, clases de muestras, volumen del agua, uso de filtros, conservantes, y muestras de garantía de calidad/control de los laboratorios. Los planes de muestreo ayudaron a garantizar que los resultados de las campañas de terreno minimicen sus errores y cumplan con los objetivos del proyecto.

Para la elección de puntos de muestreo se ha utilizado como base de referencia las estaciones de la DGA, estudios de RISACHER (Risacher *et al.*, 1990), HERRERA (Herrera *et al.*, 2006) y AMBAR (Ambar, 1996). De este modo se puede analizar y contrastar la composición hidroquímica y/o isotópica de las muestras obtenidas aquí en relación con los estudios anteriores, y observar las variaciones espaciales y temporales de la hidroquímica en el agua subterránea y superficial. Los sitios de muestreo ubicados en las estaciones fluviométricas de la DGA iluminan la relación entre la composición química de las aguas con los datos hidrométricos de aquellos puntos con registro histórico de caudales.

Las muestras de agua fueron recogidas en 4 botellas distintas. Los laboratorios ANAM (Análisis Ambientales S.A.) proporcionaron 3 envases para el análisis hidroquímico, con un total 1,25 litros de muestra recogidas por separado en: un envase de 250 ml sin aditivos para el análisis de aniones, otro de 1 litro sin aditivos, para el análisis de alcalinidad, carbonato y bicarbonato, conductividad y pH, y un último envase de 100ml para el análisis de cationes con ácido nítrico para su preservación. La solución de ácido nítrico fue preparado por el laboratorio. Tanto las muestras de aniones como de cationes fueron filtradas antes de ser embotelladas con filtros de celulosa de 0,45 μm , salvo alguna muestra que se filtró con un filtro de 1,2 μm .

El muestreo isotópico se realizó en botellas de vidrio de 40 ml para las muestras destinadas a los análisis de ^{18}O - ^2H . Estos envases disponían de cierre a presión además del cierre de rosca simple con lo que en la mayoría de ellas se consiguió un llenado completo sin espacios con aire.

Los códigos de identificación de las muestras en las campañas se muestran en la **Tabla 3-1**, y están constituidos por un número seguido de las siglas LS, LV o LP. El número indica el orden en el que la muestra fue tomada desde el inicio de la campaña mientras que las siglas indican la región geográfica (Lauca) y el origen del agua muestreada: Superficial, Vertiente o Pozo. El último número indica la campaña que fue tomada la muestra. Ejemplo: 14-LV-1, es la

muestra 14 tomada en una vertiente en el río Lauca durante la primera (1) campaña de muestreo.

Código	Nº de Muestra	Tipo de Muestra	Nº de campaña
14-LV-1	28	LS, LV, LP	1

Tabla 3-1. Código de Parámetros de Terreno. Fuente: elaboración Propia

3.2.1 CAMPAÑA SEPTIEMBRE 2014

En la primera campaña de muestreo se ejecutó durante el periodo comprendido entre el día 6 al 13 de octubre de 2014. En el área de estudio se tomó un total de 11 muestras para análisis hidroquímico. Esta campaña tuvo como objetivo realizar un muestreo que permita caracterizar la cuenca hidroquímica e isotópicamente. En el laboratorio se analizaron los cationes Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} y Si^{4+} , los aniones HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- y los elementos menores y traza Al, B, As y Fe junto con la molécula de CO_2 . Estas muestras están distribuidas en la zona de estudio para conseguir una representatividad hidroquímica de cada sector.

La distribución de los puntos de muestreo abarcó toda el área de estudio:

- En el SHPC se han tomado 7 muestras para el análisis hidroquímico.
- Por último, en la cuenca de lago Chungará se tomaron 3 muestras para el análisis hidroquímico más 1 muestra doble para el control de calidad del laboratorio hidroquímico.

En la **Tabla 3-2** se presenta el resumen de las actividades realizadas en la primera campaña de muestreo y la ubicación de cada una de ellas, y en la **Figura 3-6** se muestra la ubicación de las vertientes, aguas superficiales y pozo muestreados durante la campaña.

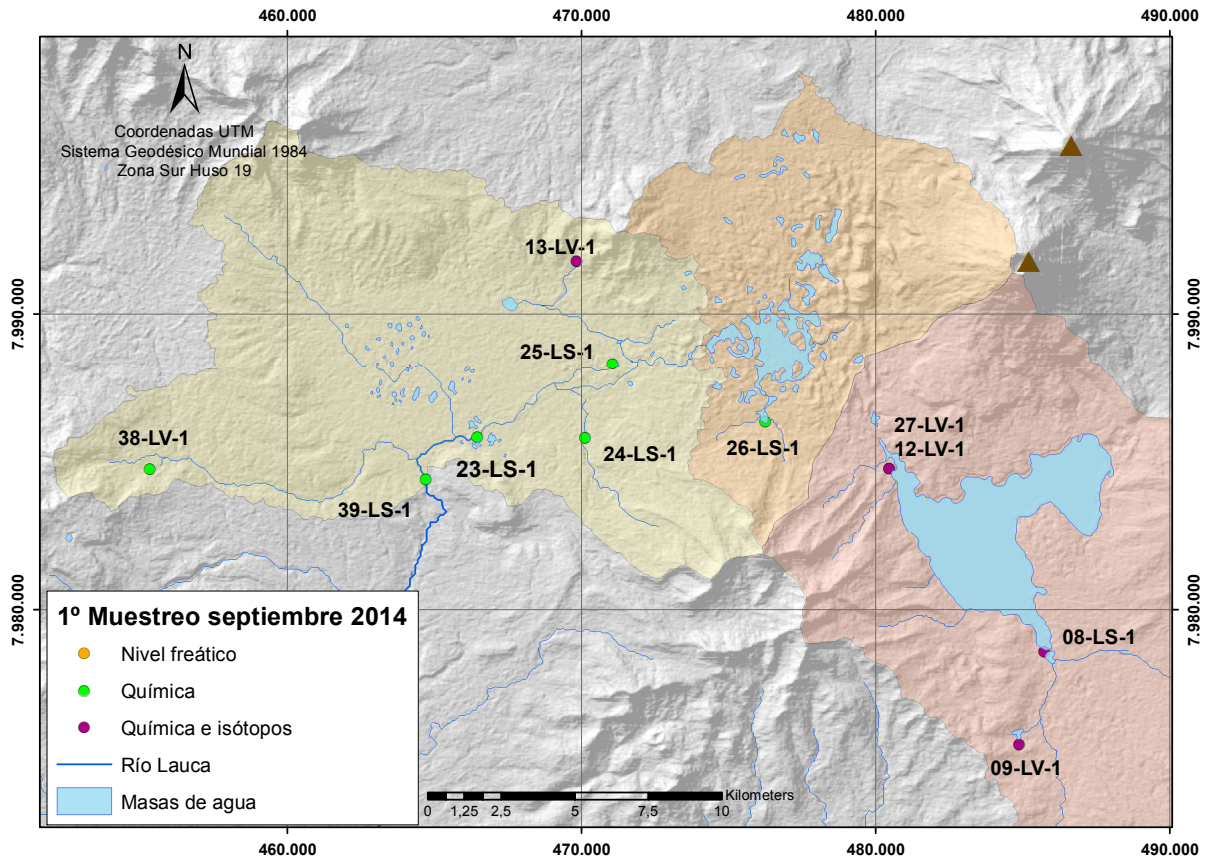


Figura 3-6. Ubicación de las muestras tomadas para el análisis químico e isotópico en la campaña de terreno de septiembre de 2014. Fuente: elaboración propia.

Nombre	UTM WGS 84 H19S		Altitud (msnm)	Fecha	P.T. ¹	Química	Rept. ²
	Este	Norte					
08-LS-1	485.709	7.978.552	4.563	09/10/14	X	X	
09-LV-1	484.854	7.975.408	4.643	09/10/14	X	X	
12-LV-1	480.448	7.984.782	4.563	10/10/14	X	X	27-LV-1
13-LV-1	469.831	7.991.815	4.517	10/10/14	X	X	
23-LS-1	466.460	7.985.840	4.399	10/10/14	X	X	
24-LS-1	470.119	7.985.816	4.431	10/10/14	X	X	
25-LS-1	471.053	7.988.338	4.436	10/10/14	X	X	
26-LS-1	476.247	7.986.356	4.546	10/10/14	X	X	
27-LV-1	480.448	7.984.782	4.563	10/10/14	X	X	12-LV-1
38-LV-1	455.344	7.984.754	4.545	12/10/14	X	X	
39-LS-1	464.715	7.984.414	4.372	12/10/14	X	X	

¹ Medición de parámetros de terreno

² Muestras que son repeticiones para validación de análisis

Tabla 3-2. Muestras y mediciones tomadas de la campaña de aforos de septiembre de 2014. Fuente: elaboración propia.

3.2.2 CAMPAÑA ABRIL 2015

La segunda campaña de muestreo se realizó entre los días 9 al 14 de abril de 2015. Se tomó un total de 6 muestras para análisis hidroquímico. Esta campaña se ha realizado a los 5 meses de la primera campaña de muestreo con el objetivo de analizar la variación estacional de la composición hidroquímica e isotópica en las aguas subterráneas y superficiales. En el laboratorio se analizaron químicamente los cationes Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} y Si^{4+} , los aniones HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- y los elementos menores y traza B, As, Li y Fe junto con la molécula de CO_2 .

En general, la distribución de los puntos de muestreo fue similar a la primera campaña exceptuando la reubicación de algunos puntos para mejorar la cobertura del muestreo hidroquímico e isotópico. El lago Chungará no se volvió a muestrear, ya que se ha identificado el grado de conexión entre estas cuencas y la cuenca del Lauca con los datos de la primera campaña de terreno.

En la **Tabla 3-3** se presenta el resumen de las actividades realizadas en la tercera campaña de muestreo, y en la Figura 3-7 se muestra la ubicación de las vertientes, aguas superficiales. En anexos se encuentra el detalle de esta campaña.

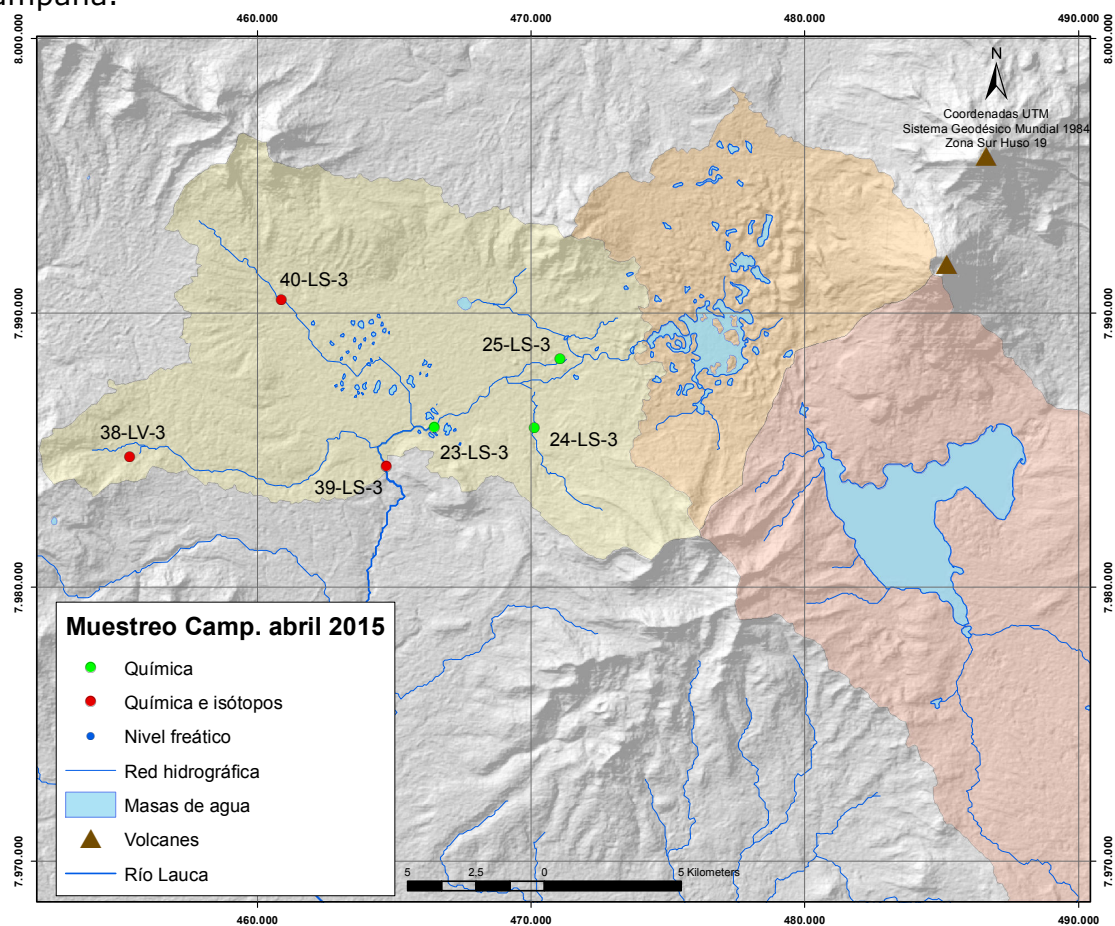


Figura 3-7. Ubicación de las muestras tomadas en la campaña de terreno de septiembre de 2014. Fuente: elaboración propia.

Nombre	UTM WGS 84 H19S		Altitud (msnm)	Fecha	P.T. ¹	Química	Rept. ²
	Este	Norte					
23-LS-3	7.985.840	466.460	4.399	10/04/15	X	X	
24-LS-3	7.985.816	470.119	4.431	10/04/15	X	X	
25-LS-3	7.988.338	471.053	4.436	10/04/15	X	X	
38-LV-3	7.984.754	455.344	4.545	10/04/15	X	X	
39-LS-3	7.984.414	464.715	4.372	10/04/15	X	X	
40-LS-3	7.990.485	460.882	4.424	10/04/15	X	X	

¹ Medición de parámetros de terreno

² Muestras que son repeticiones para validación de análisis

Tabla 3-3. Muestras tomadas para el análisis químico e isotópico durante la campaña de abril de 2015. Fuente: elaboración propia.

4 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA

La descripción de la geología de la zona de estudio se compone de dos secciones principales:

- Secuencia estratigráfica de unidades geológicas: La descripción se desarrolla de forma cronológica a partir de los grandes periodos geológicos que definieron cada una de las litologías que en la actualidad se encuentran presentes en la zona de estudio.
- Estructuras geológicas: se focaliza principalmente en las grandes estructuras geológicas que definen las geomorfologías más características del relieve actual

4.1 ESTRATIGRAFÍA

La secuencia estratigráfica de la zona de estudio puede ser clasificada a partir de los 3 grandes periodos geológicos, que de más antiguo a más moderno son: Precámbrico, Oligoceno-Plioceno y Cuaternario.

El periodo Precámbrico está caracterizado por rocas metamórficas que forman el basamento geológico de la cuenca. A estas les siguen en la secuencia las litologías del periodo Oligoceno-Plioceno que corresponden a rocas sedimentarias, volcánicas y volcano-sedimentarias que constituyen el relleno principal de la cuenca. Por último, en la parte superior se encuentran los depósitos cuaternarios que representan las unidades geológicas más superficiales. Estas también forman parte del relleno de la cuenca y son de tipo sedimentario y volcánico asociados con gran variedad de procesos de geodinámica interna y externa de la historia geológica reciente de la cuenca (**Figura 4-1**).

En el presente capítulo se realiza una descripción de las formaciones y unidades geológicas incluidas dentro de estos grupos generales con especial detalle en las del Oligoceno-Plioceno y Cuaternario. Estos dos grupos se sitúan sobre el basamento Precámbrico y representan el relleno de la cuenca sedimentaria Lauca donde posteriormente se identificarán las diferentes unidades hidrogeológicas de la zona de estudio. Este relleno posee un espesor en el centro de la cuenca de hasta 3.000 m (García *et al.*, 2004).

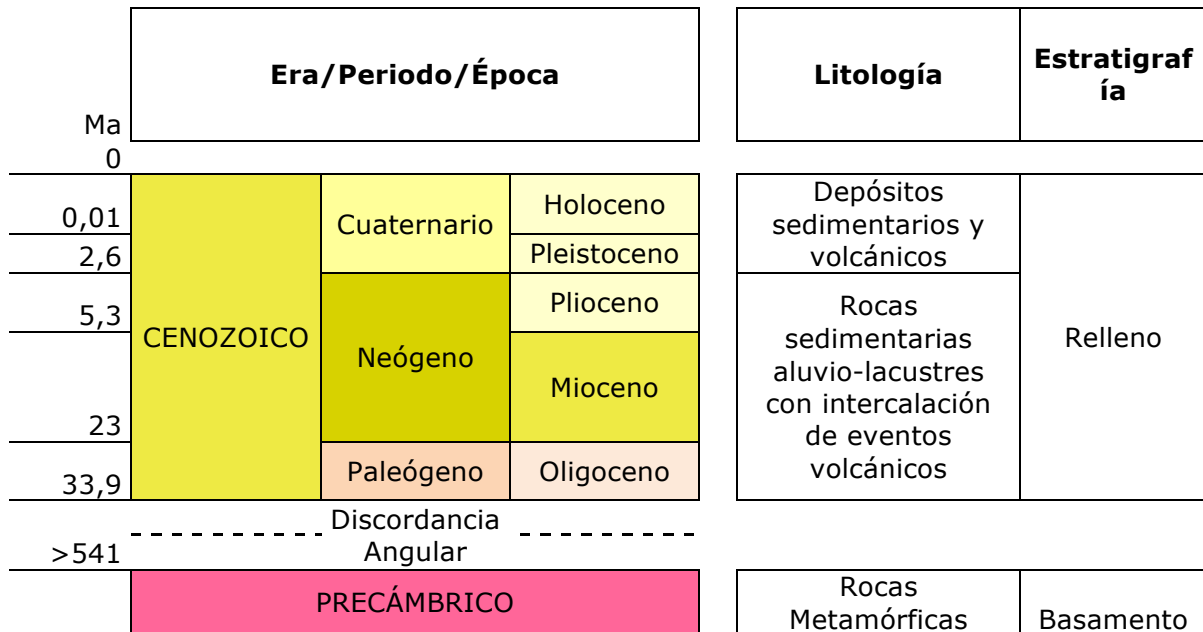


Figura 4-1. Estratigrafía general de la cuenca sedimentaria Lauca. Fuente: elaboración propia.

El mapa geológico que representa de forma más completa, actual y en detalle la distribución de las formaciones geológicas a nivel regional es la Hoja de Arica 1:250.000 (García *et al.*, 2004). Este ha sido el mapa de referencia principal utilizado para la realización de la caracterización geológica (**Figura 4-2** y **Figura 4-3**).

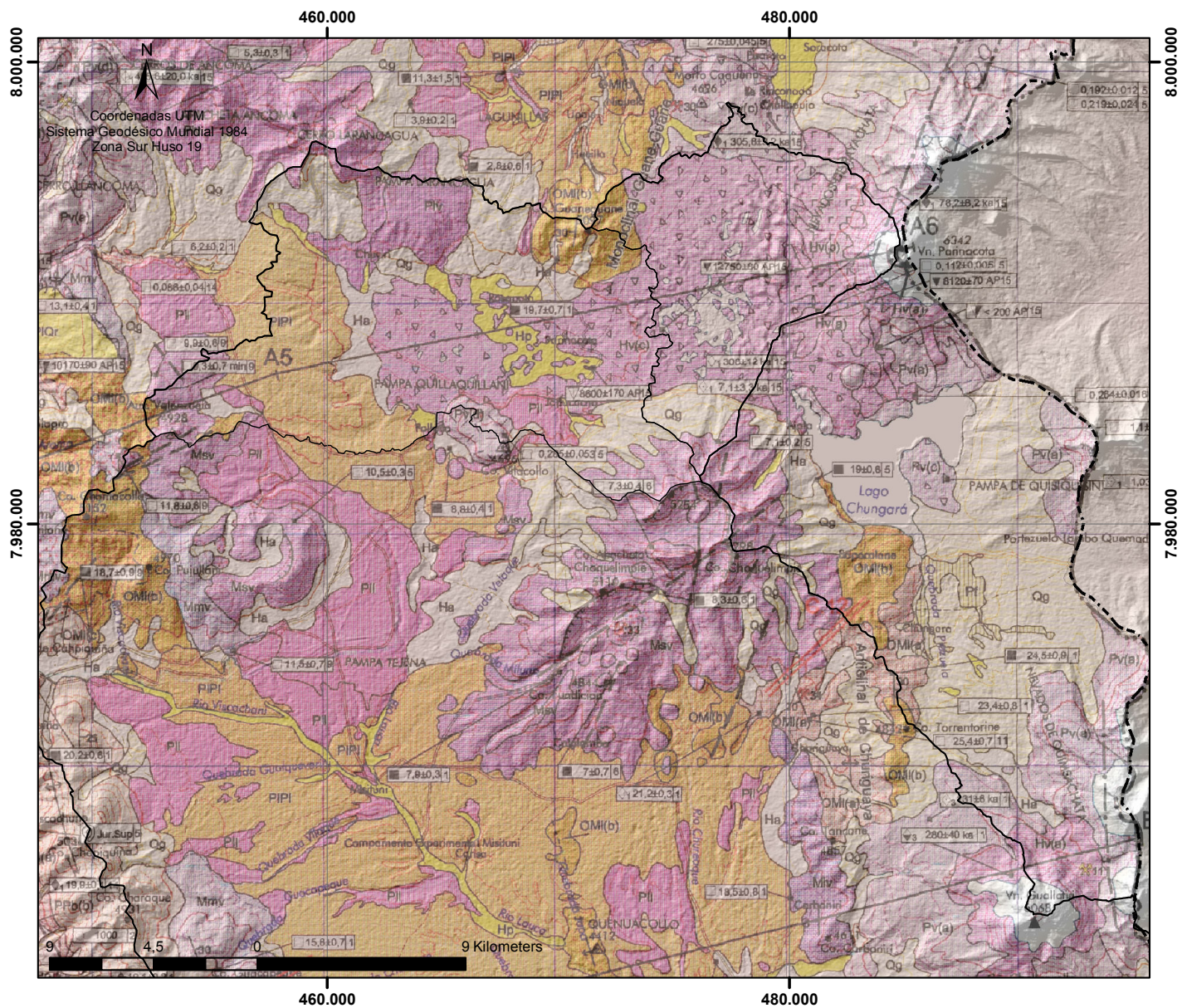
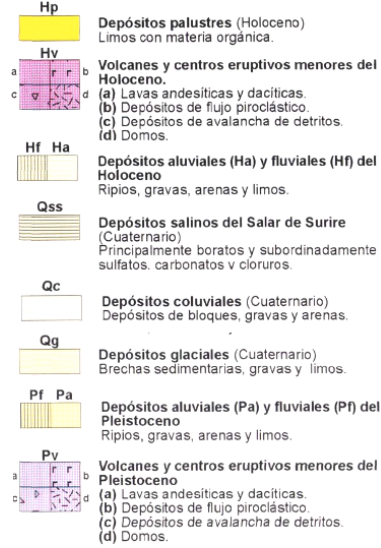
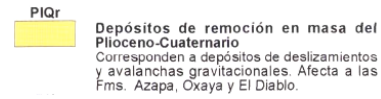


Figura 4-2. Mapa geológico de la zona de estudio. Fuente: modificado de García et al., 2004.

Cuaternario



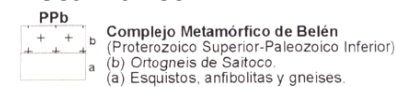
Plioceno-Cuaternario



Oligoceno-Plioceno



Precámbrico



Simbología

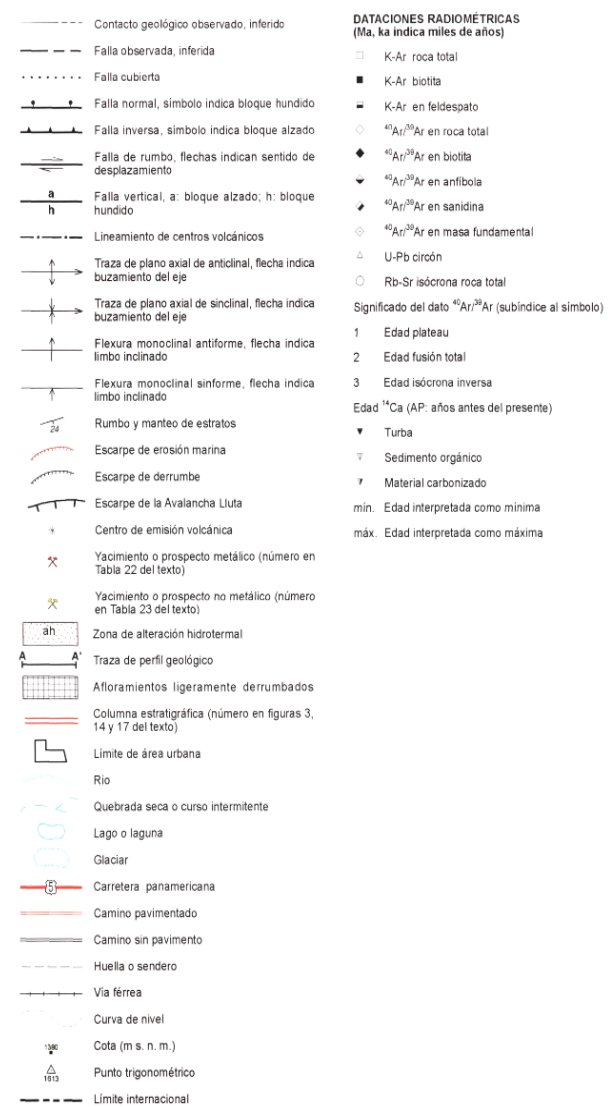


Figura 4-3. Leyenda Mapa Geológico. Fuente: modificado de García et al., 2004.

4.1.1 PRECÁMBRICO

El basamento geológico de la cuenca sedimentaria Lauca lo forman las rocas metamórficas del Precámbrico (>541 Ma) que constituyen el Complejo Metamórfico de Belén (García *et al.*, 2004). Estas rocas no afloran dentro de la zona de estudio aunque existe un afloramiento cercano en las proximidades del pueblo de Belén (Schröeder, 1996).

La litología de esta unidad está formada por dos unidades principales de rocas metamórficas que corresponden, por un lado, con esquistos, anfibolitas y gneises y, por otro, con el ortogneis conocido como Ortogneis de Saitoco (García *et al.*, 2004).

A partir de cortes geológicos realizados en el sector central de la cuenca Lauca, el techo del Complejo Metamórfico de Belén se encuentra a más de 2.000 m de profundidad (García *et al.*, 2004).

4.1.2 OLIGOCENO-PLIOCENO

Por encima del basamento metamórfico de la cuenca geológica Lauca se sitúa en discordancia angular un gran espesor de rocas sedimentarias, volcánicas y volcano-sedimentarias de edad comprendida entre el Oligoceno y el Plioceno.

La estratigrafía particular del periodo geológico Oligoceno-Plioceno está caracterizada por rocas sedimentarias de ambientes lacustres y aluviales con frecuentes eventos volcánicos intercalados entre los que destacan los niveles de ignimbrita y las coladas andesíticas (**Figura 4-4**).

En este periodo geológico se han destacado por su extensión y espesor dos formaciones principales que corresponden con la Formación Lupica y la Formación Lauca, a diferencia del resto de formaciones que presentan una distribución local dependiendo del contexto particular de los diferentes sectores de la cuenca.

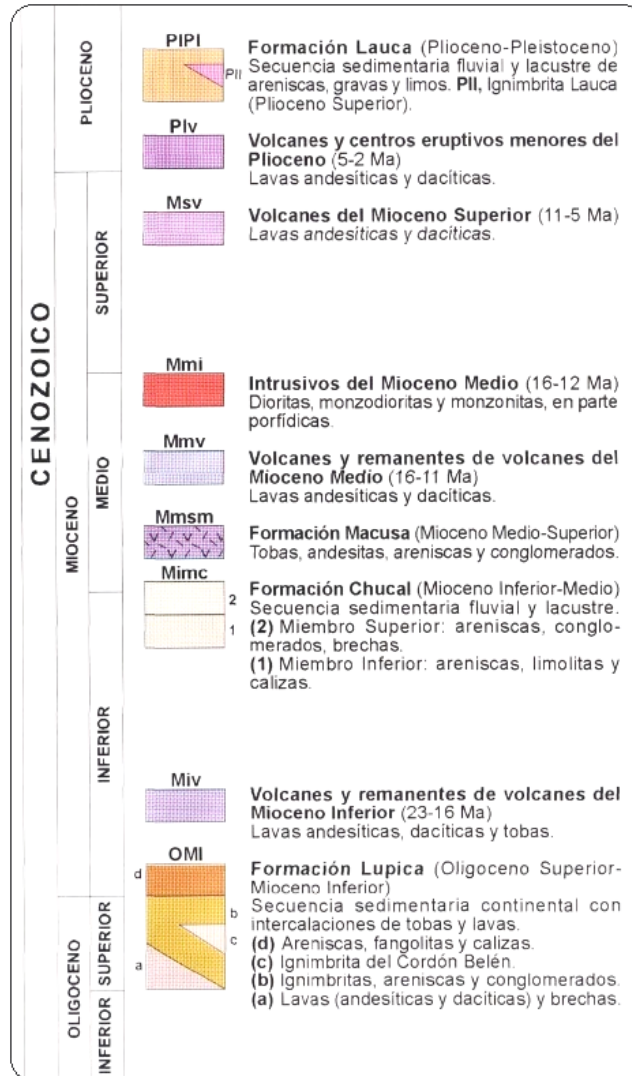


Figura 4-4. Secuencia estratigráfica del periodo Oligoceno-Plioceno de la cuenca Lauca. Fuente: modificado de García et al., 2004.

FORMACIONES PRINCIPALES

En el periodo geológico Oligoceno-Plioceno destacan la Formación Lupica y la Formación Lauca por su extensión y espesor. Estas formaciones se sitúan en la base y techo de este periodo geológico respectivamente.

Formación Lupica

La Formación Lupica comprende desde el Oligoceno Superior hasta el Mioceno Inferior (García *et al.*, 2004) y su estratigrafía se caracteriza por sedimentación continental, vulcanismo andesítico y abundancia de rocas sedimentarias y sedimentos vulcanoclásticos retrabajados (Wörner *et al.*, 2000).

La potente secuencia estratigráfica de la Formación Lupica se diferencia en 4 subunidades de las cuales 3 afloran dentro de la cuenca Lauca. La litología de estas subunidades es la siguiente:

- Lavas (andesíticas y dacíticas) y brechas
- Ignimbritas, areniscas y conglomerados
- Ignimbrita del Cordón Belén

En el tramo intermedio de la Formación Lupica destaca la Ignimbrita del Cordón Belén por su potencia y extensión (García *et al.*, 2000). Esta ignimbrita representa la geología principal que aflora en el cordón Belén donde tiene un espesor de aproximadamente 1.100 m (**Figura 4-5**).

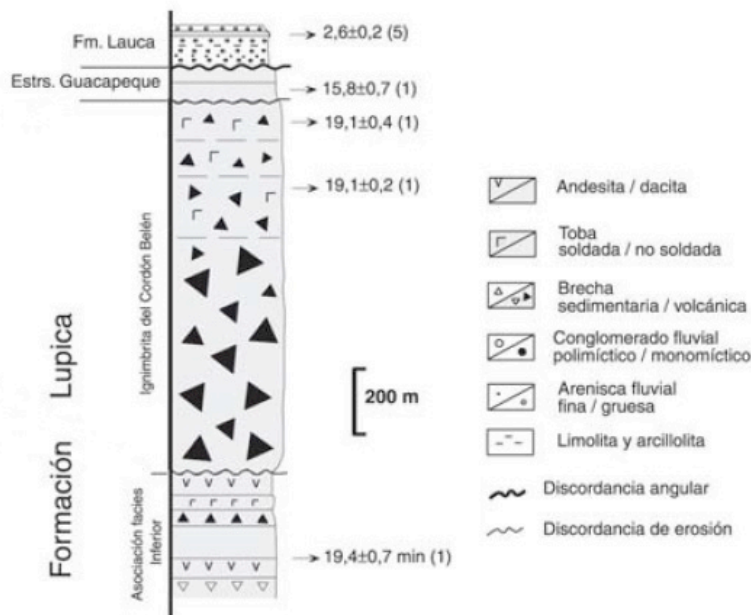


Figura 4-5. Columna estratigráfica de la Formación Lupica en el sector cerro Belén. Fuente: modificado de García *et al.*, 2004.

La estructura de la Ignimbrita del Cordón Belén corresponde con una brecha piroclástica de gran espesor (900-1100 m) (García *et al.*, 2000) y su continuidad hacia oriente dentro de la cuenca Lauca se ve interrumpida por causas estructurales (Anticlinal Queñuacollo) (García *et al.*, 2000).

Formación Lauca

La segunda formación geológica del periodo Oligoceno-Plioceno de relevancia por su extensión dentro de la cuenca es la Formación Lauca. Las litologías de la Formación Lauca afloran extensamente en los sectores central y centro-occidental de la cuenca del río Lauca y se componen principalmente de sedimentos clásticos y vulcanoclásticos entre los que

destaca un nivel ignimbrítico característico del paisaje de la cuenca conocido como Ignimbrita Lauca.

La edad de la Formación Lauca corresponde con Mioceno Superior-Plioceno y presenta un espesor de hasta 150 m de los cuales aproximadamente 40 m corresponden a la Ignimbrita Lauca (García *et al.*, 2004). El ambiente de formación que originó su secuencia estratigráfica es de tipo lacustre (lago Lauca) con presencia de llanuras aluviales en los bordes norte y oeste (Kött *et al.*, 1994) y episodios volcánicos que sirven como buenos datadores de la secuencia (Kött *et al.*, 1995).

Por un lado, las unidades aluviales están asociadas con procesos fluviales en los que predominan las arenas y gravas con matriz limosa. Estas secuencias se pueden reconocer claramente de la zona de estudio donde se intercalan con niveles de ignimbrita (**Figura 4-6**).

La parte superior de la secuencia estratigráfica de la Formación Lauca fue estudiada en detalle mediante la correlación de columnas estratigráficas por KÖTT (Kött *et al.*, 1995) en el sector central de la cuenca (**Figura 4-7**).

En esta correlación estratigráfica, se pueden observar los cambios laterales de facies que presenta la Formación Lauca indicando así su marcada heterogeneidad. Estos cambios laterales de facies se producen tanto entre las unidades aluviales y lacustres como en los niveles de ignimbrita.

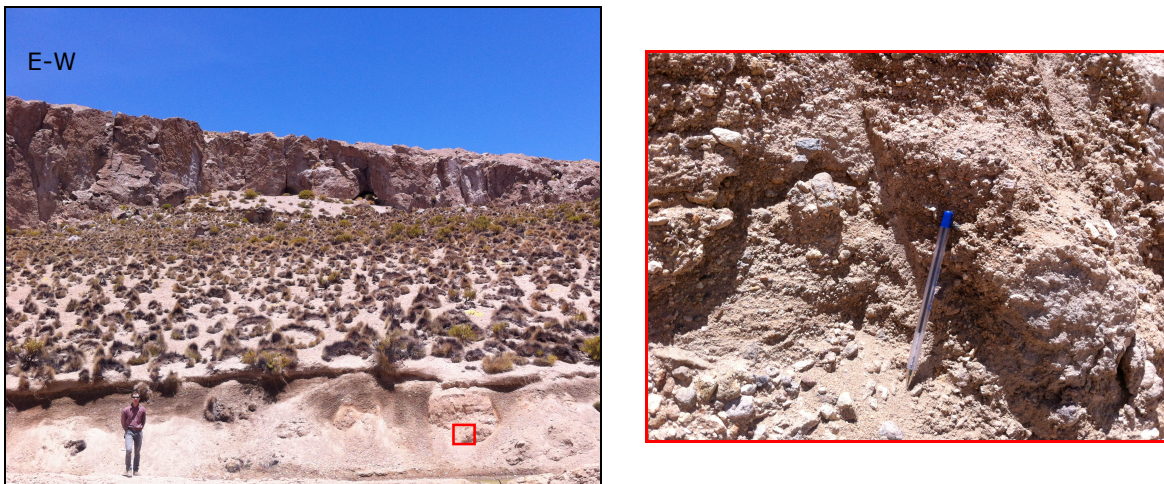


Figura 4-6. Secuencias aluviales de la Formación Lauca situadas por debajo de la Ignimbrita Lauca en el sector Chuba. Fuente: elaboración propia.

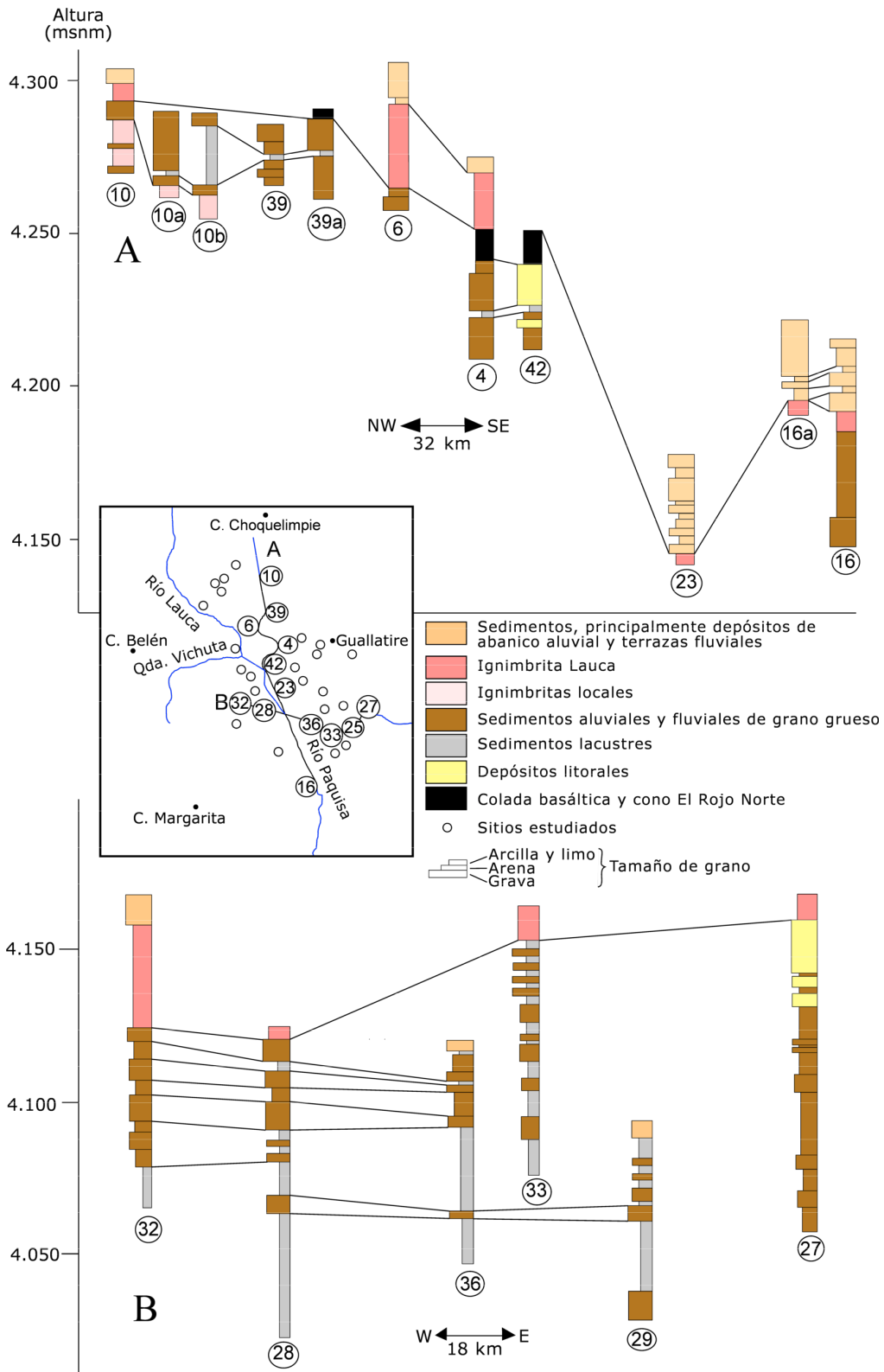


Figura 4-7. Correlación estratigráfica de la Formación Lauca y los sedimentos cuaternarios sobreyacentes en el sector central de la zona de estudio. Fuente: modificado de Kött et al., 1995.

Ignimbritas

Las ignimbritas presentes en la zona de estudio y en especial la Ignimbrita del Cordón de Belén (Formación Lupica) y la Ignimbrita Lauca (Formación Lauca) requieren mención especial debido a su amplia extensión.

Las ignimbritas presentes en este sector del Altiplano pertenecen a una de las provincias silíceas cenozoicas más grandes del mundo cuya extensión abarca además del norte de Chile, el oeste de Bolivia y el sur de Perú (Schröeder y Wörner, 1996).

Aunque el foco emisor de la Ignimbrita Lauca no se conoce con certeza, estudios estructurales y geomorfológicos indican que este se situaría donde hoy se encuentra el complejo estratovolcánico del cerro Condoriri, a unos 12 km al norte del Volcán Parinacota (Schröeder y Wörner, 1996).

La presencia de ignimbritas en la cuenca es también de relevancia a causa de la relación identificada entre la erosión de esta roca y la formación de las rocas sedimentarias que se formaron en ambientes lacustres e incluso los actuales sedimentos aluviales (Schillinger *et al.*, 1990).

A finales del Plioceno, también se formaron depósitos sedimentarios por remoción en masa de formaciones pre-existentes asociados con deslizamientos y avalanchas gravitacionales. Estos tuvieron continuidad durante los inicios del cuaternario y, por este motivo, se describen en la siguiente sección correspondiente a este periodo geológico.

4.1.3 CUATERNARIO

Los depósitos cuaternarios en la zona de estudio se clasifican según su origen: glaciales, aluviales, coluviales, volcánicos, salinos y palustres.

A continuación se realiza una descripción de cada uno de ellos diferenciando los depósitos de origen volcánico de los sedimentarios y, dentro de estos últimos, los depósitos sedimentarios detríticos de los evaporíticos.

DEPÓSITOS VOLCÁNICOS Y VOLCANO-SEDIMENTARIOS

Entre los depósitos volcánicos o volcano-sedimentarios cuaternarios destacan los complejos volcánicos que forman los nevados de Payachata, al norte de la cuenca de la laguna Chungará. Las rocas volcánicas características de estos centros de actividad volcánica reciente corresponden a lavas andesíticas y dacíticas.

El complejo volcánico cuaternario de gran volumen denominado Nevados de Payachata está formado por los volcanes Pomerape y Parinacota.

El volcán Parinacota, en el límite norte de la zona de estudio, es un volcán con actividad reciente que se inició a finales del Pleistoceno (Clavero y Sparks, 2004). En el presente, el volcán Parinacota está considerado como un volcán

“dormido” en cuanto a su grado de actividad aunque durante el Holoceno mostró violentos eventos eruptivos que definieron la geomorfología actual de su cono y de la zona circundante (Wörner *et al.*, 2000).

Las litologías más recientes que caracterizan la estructura del volcán Parinacota corresponden principalmente con rocas vulcanosedimentarias asociadas con depósitos de flujo piroclástico y de avalancha de detritos (García *et al.*, 2004).

DEPÓSITOS SEDIMENTARIOS DETRÍTICOS

Los depósitos sedimentarios detríticos del cuaternario están asociados a procesos de geodinámica externa relacionados con transporte glacial, aluvial o coluvial, deslizamientos y remoción en masa y, por último, formación de suelos en áreas con vegetación (depósitos palustres).

Los sedimentos de origen glacial forman los depósitos sedimentarios cuaternarios más extensos aunque su distribución se limita principalmente a las partes bajas de los Nevados de Quimsachata. La litología de estos depósitos está constituida por brechas polimícticas de mala selección y su secuencia estratigráfica no supera los 100 m de espesor (García *et al.*, 2004).

En el sector de los Nevados de Quimsachata, los depósitos glaciales se localizan al norte de los nevados extendiéndose hasta el margen este de la laguna Chungará.

Los siguientes depósitos sedimentarios detríticos cuaternarios en importancia por su extensión en la cuenca de estudio corresponden a depósitos aluviales, asociados con el transporte de agua y detritos. Entre estos depósitos se diferencian los depósitos aluviales no fluviales de los depósitos aluviales fluviales.

Por un lado, los depósitos aluviales no fluviales están constituidos por gravas clasto-soportadas de semiconsolidadas a no consolidadas y con intercalaciones de arenas, limos y arcillas. Por otro lado, los depósitos aluviales fluviales están formados por gravas clasto-soportadas semiconsolidadas con intercalaciones de arenas y limos y, localmente, diatomitas (García *et al.*, 2004).

Los depósitos aluviales no fluviales más extensos dentro de la cuenca coincidiendo con el interior del valle del río Lauca, entre las ciénagas de Parinacota y la confluencia con el río Vizcachani.

En relación con los depósitos aluviales fluviales, estos se presentan en la cuenca del río Lauca con dos tipos de geomorfología: terrazas fluviales y relleno de depresiones intravolcánicas.

En oposición a los depósitos aluviales, formados por transporte de detritos y agua, los depósitos coluviales, originados por la acumulación de detritos

transportados en seco, representan un depósito menor por su escasa presencia en la zona de estudio.

El más actual de los depósitos sedimentarios detríticos del cuaternario corresponde con suelos formados por limos y turbas de no consolidados a semi-consolidados y que se presentan cubiertos por vegetación de vegas, pantanos y/o bofedales (García *et al.*, 2004).

La presencia de estos depósitos palustres se limita al fondo de algunas quebradas y/o zonas pantanosas. Por otro lado, las zonas pantanosas cubiertas por depósitos palustres en los que se encuentran importantes extensiones de bofedal corresponden principalmente a las Ciénagas de Parinacota

4.2 ESTRUCTURAS

La cuenca hidrográfica del SHPC y río Lauca se enclavan en una cuenca tectónica sedimentaria tipo antepaís en la zona central del orógeno andino. En un marco geológico regional, pertenecen al sistema de cuencas fluvio-lacustres del Plio-Pleistoceno que cubre el Altiplano Boliviano desde el lago Titicaca en el norte hasta el salar de Uyuni situado a más de 800 km al sur (Kött *et al.*, 1994). Dentro de este gran sistema regional de cuencas altiplánicas, el SHPC y río Lauca se sitúan en su parte más occidental separada topográficamente del resto de cuencas por centros volcánicos (Kött *et al.*, 1995).

El corte geológico que mejor describe la estructura de la zona de estudio se encuentra en la carta geológica de la Hoja de Arica (García *et al.*, 2004) (A5-A6, **Figura 4-2**). Este corte representa la principal fuente de información a partir de la cual se ha interpretado la geología estructural de la zona.

4.2.1 LÍMITES DE LA CUENCA

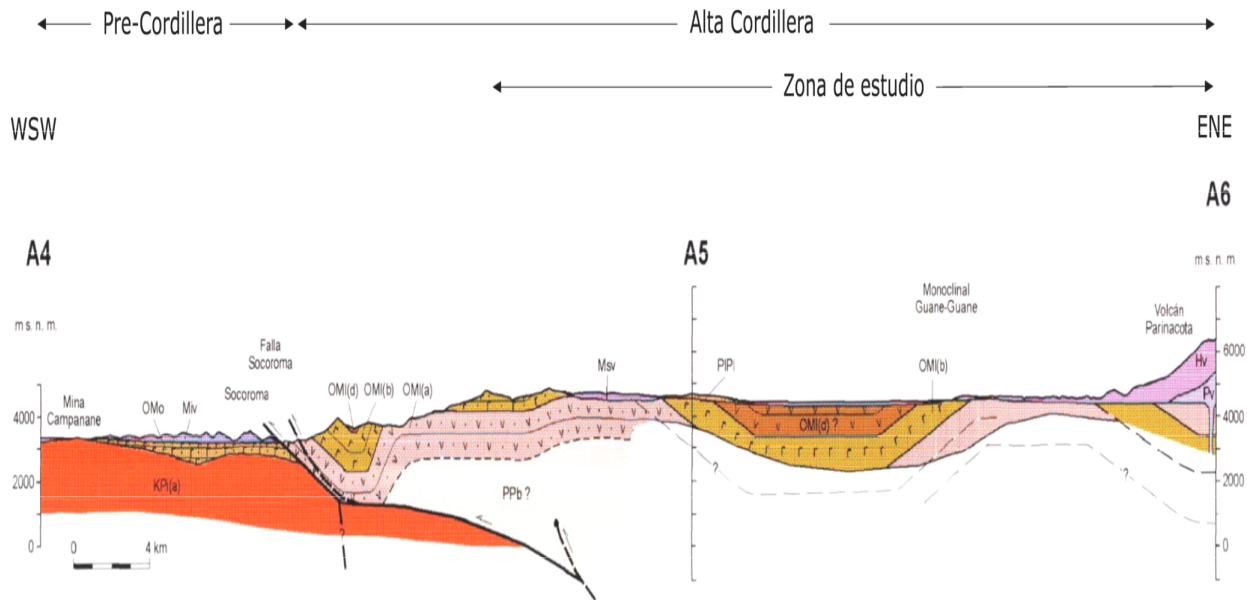
La separación de la cuenca Lauca con las cuencas de vertiente pacífica situadas al oeste se produce a causa del levantamiento topográfico que origina el Cordón Belén. Esta cadena montañosa está asociada al anticlinal de Belén causado por un sistema de cabalgamientos de vergencia principal oeste.

Por lo que respecta al borde norte y oriental de la zona de interés, estas están marcadas por las estructuras volcánicas que tuvieron origen en el Oligoceno y sobre los que posteriormente se construyeron estratovolcanes más jóvenes. Estas estructuras volcánicas son las principales responsables de la separación entre la cuenca del río Lauca y la cuenca de la laguna Chungará además de definir el límite norte de la cuenca del río Lauca.

En el sector norte y oriental, las estructuras volcánicas principales están asociadas a dos lineamientos volcánicos que corresponden respectivamente con el de los Nevados de Payachata, de dirección suroeste-noreste y en el que se emplaza el volcán Parinacota y el de los Nevados de Quimsachata (volcán Guallatire), de dirección norte-sur. Aunque existen varios conos volcánicos

asociados a estos lineamientos, sólo el volcán Guallatire ubicado más al sur presenta cierto grado actividad volcánica tipo fumarolas, mientras que el resto de volcanes en la zona se encuentran “dormidos”.

La estructura del volcán Parinacota, en el límite noreste de la zona de estudio, junto con remanentes volcánicos miocénicos al noroeste definen en gran medida el cierre de la cuenca del río Lauca en su parte norte. En este sector, las litologías de la Formación Lupica y Formación Lauca se encuentran extensamente cubiertas por estas unidades volcánicas (**Figura 4-8**).



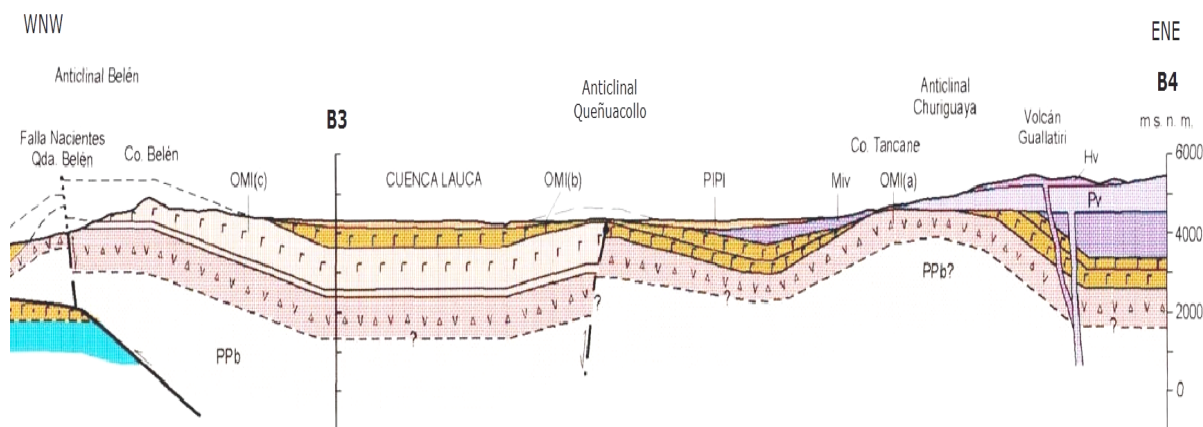
Hv	Lavas andesíticas y dacíticas (Volcanes y centros eruptivos menores)	Holoceno
Pv	Lavas andesíticas y dacíticas (Volcanes y centros eruptivos menores)	Pleistoceno
PIPI	Secuencia sedimentaria fluvial y lacustre de areniscas, gravas y limos (Fm. Lauca)	Plioceno-Pleistoceno
Msv	Lavas andesíticas y dacíticas (Volcanes)	Mioceno Superior
Miv	Lavas andesíticas, dacíticas y tobas (Volcanes y remanentes de volcanes)	Mioceno Inferior
OMI(d)	Areniscas, fangolitas y areniscas (Formación Lupica)	Oligoceno Sup.-Mioceno Inf.
OMI(b)	Ignimbritas, areniscas y conglomerados (Formación Lupica)	Oligoceno Sup.-Mioceno Inf.
OMI(a)	Lavas (andesíticas y dacíticas) y brechas (Formación Lupica)	Oligoceno Sup.-Mioceno Inf.
OMo	Secuencia volcánica principalmente piroclástica (Formación Oxaya)	Oligoceno Sup. Mioceno Inf.
KPi(a)	Intrusivos de Lluta (granodioritas y monzodioritas cuarcíferas)	Cretácico Sup.-Paleoceno
PPb	Esquistos, anfibolitas y gneises (Complejo Metamórfico de Belén)	Precámbrico

Figura 4-8. Perfil geológico del sector norte de la zona de estudio. Fuente: modificado de García et al., 2004.

4.2.2 ESTRUCTURAS INTERNAS

La estructura interior de la cuenca Lauca se caracteriza por el escaso número de estructuras de deformación frágil que afectan a las litologías del relleno de esta cuenca. Esta característica indica la relativamente baja presencia de fuerzas compresivas o extensionales desde el Oligoceno hasta el presente asociadas al levantamiento del orógeno andino en este sector.

La falla más importante se sitúa al sur del SHPC y es de tipo normal originalmente y posteriormente reactivada en inversa (García *et al.*, 2000). Esta reactivación causó la formación del anticlinal Queñuacollo (García *et al.*, 2000) con un plano axial de dirección noroeste-sureste paralelo al plano de falla (**Figura 4-9**).



Hv	Lavas andesíticas y dacíticas (Volcanes y centros eruptivos menores)	Holoceno
Pv	Lavas andesíticas y dacíticas (Volcanes y centros eruptivos menores)	Pleistoceno
PIPI	Secuencia sedimentaria fluvial y lacustre de areniscas, gravas y limos (Fm. Lauca)	Plioceno-Pleistoceno
Miv	Lavas andesíticas, dacíticas y tobas (Volcanes y remanentes de volcanes)	Mioceno Inferior
OMI(b)	Ignimbritas, areniscas y conglomerados (Formación Lupica)	Oligoceno Sup.-Mioceno Inf.
OMI(c)	Ignimbrita del Cordón Belén (Formación Lupica)	Oligoceno Sup.-Mioceno Inf.
OMI(a)	Lavas (andesíticas y dacíticas) y brechas (Formación Lupica)	Oligoceno Sup.-Mioceno Inf.
PPb	Esquistos, anfibolitas y gneises (Complejo Metamórfico de Belén)	Proterozoico

Figura 4-9. Perfil geológico transversal de la zona central de la cuenca Lauca. Fuente: modificado de García *et al.*, 2004.

La falla asociada al anticlinal Queñuacollo tiene implicaciones estratigráficas en la Formación Lupica. Por un lado, esta estructura causa la interrupción de la continuidad de la Ignimbrita del Cordón Belén hacia el este de la cuenca (**Figura 4-10**).

Por otro lado, el levantamiento producido por la estructura anticlinal y la respectiva erosión provocan en este sector de la zona de estudio el afloramiento de los materiales de la Formación Lupica, estratigráficamente por

debajo de formaciones posteriores entre las que destaca la Formación Lauca (**Figura 4-11**).

La estructura general sindeposicional de la Formación Lauca se encuentra levemente modificada por fallas normales de dirección noreste-suroeste que, sin embargo, no llegan a cortar las formaciones superiores cuaternarias. Los saltos de falla individuales respectivos a estas fallas normales no exceden los 4,5 m (Kött *et al.*, 1994).

El bloque hundido de este sistema de fallas normales es el del sureste y una evidencia característica de esta estructura se puede observar en la Ignimbrita Lauca. Este estrato marcador se encuentra en el sector sur de la cuenca 175 m más bajo en la secuencia que en el sector norte (Kött *et al.*, 1994).

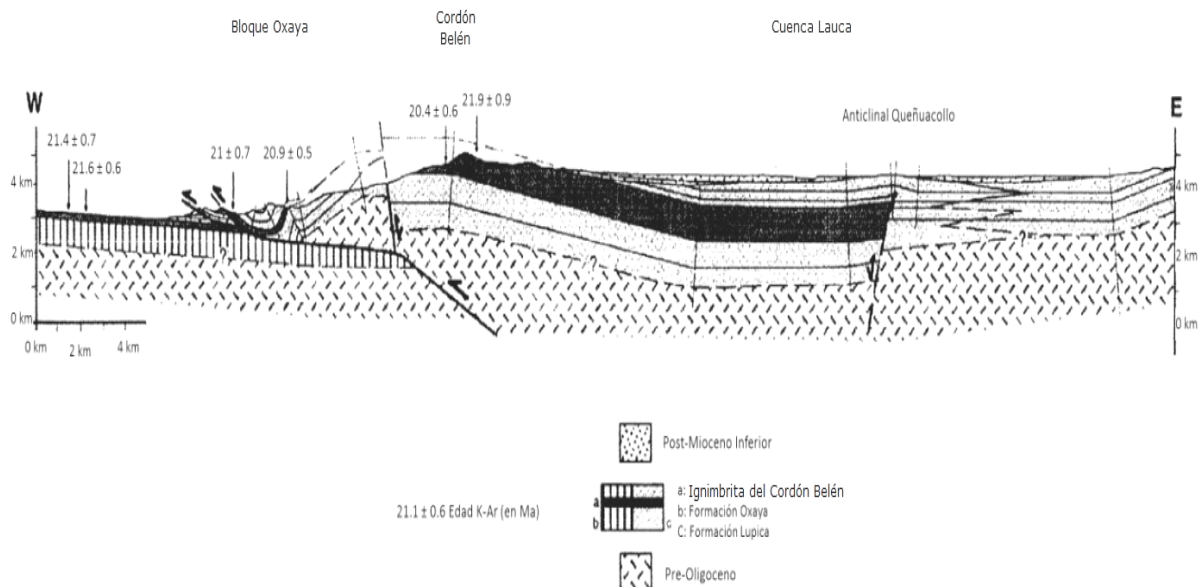


Figura 4-10. Extensión de la Ignimbrita del Cordón Belén en la Cuenca Lauca. Fuente: modificado de García *et al.*, 2000.

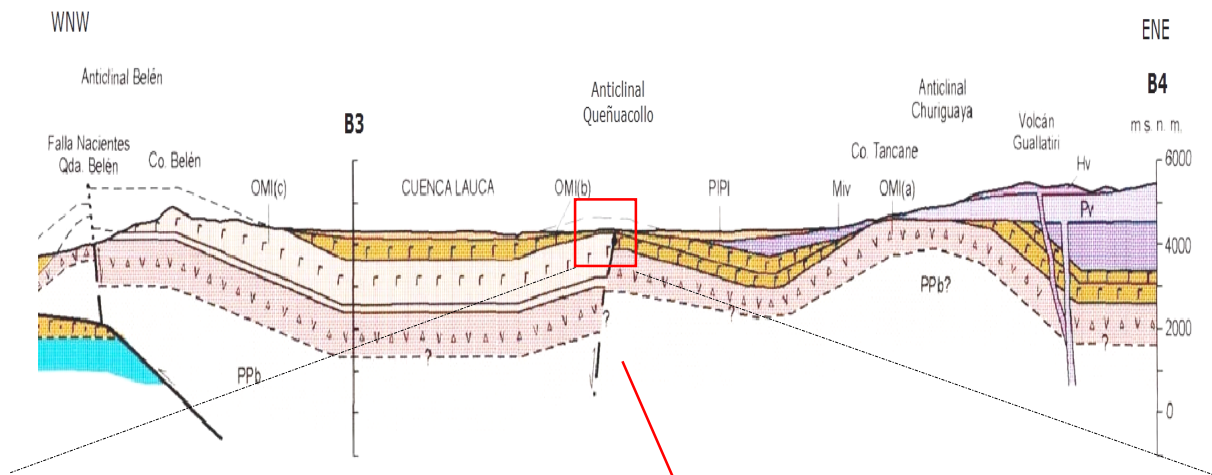


Figura 4-11. Tramo bajo de quebrada Chuba excavado en el contacto entre la Formación Lupica y la Formación Lauca y su relación con el anticlinal Queñuacollo. Fuente perfil: modificado de García, 2004. Fuente foto: elaboración propia.

5 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

Se ha realizado una caracterización hidrogeológica orientada a identificar las principales unidades acuíferas y modelar un mapa preliminar con la superficie piezométrica o curvas equipotenciales.

Se analiza y describe la geología y geomorfología de la cuenca, los procesos que dan origen a formaciones. La definición de unidades hidrogeológicas y su geometría se realiza a partir de los datos estratigráficos, geofísicos y de estudios geológicos existentes en la zona. Estos fueron complementados con los resultados de los datos de medición geofísica obtenidos en terreno en el estudio de Matraz (sin publicar). Los datos hidroquímicos representan también una herramienta de caracterización hidrogeológica ya que permiten identificar la evolución y mezcla de las aguas con distinto origen.

A partir del análisis de estos datos hidrogeológicos, se establece una sectorización hidrogeológica general de las zonas acuíferas de la cuenca del río Lauca, cuenca mayor a la que pertenece el SHPC, que abarca el área desde las lagunas de Cotacotani hasta la estación fluviométrica Río Lauca en Estancia El Lago (**Figura 5-1**).

5.1 UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS

Desde un punto de vista hidrogeológico la interpretación de las formaciones geológicas permite determinar las unidades hidrogeológicas. Esta determinación es el primer paso para la identificación de las unidades acuíferas así como su condición: libre, semiconfinada o confinada. Por otro lado y en consecuencia, también se identifican las unidades hidrogeológicas que no forman acuífero, es decir, aquellas que forman acuitardos o acuícludos.

5.1.1 CLASIFICACIÓN

La determinación de las unidades hidrogeológicas se realizó a partir de la base de datos obtenida por las investigaciones llevadas a cabo en la zona de estudio. Esto se obtuvo mediante técnicas de exploración basadas en prospección geofísica y caracterización geológica (**Tabla 5-1**). La distribución espacial de estas fuentes de información se dispone de forma longitudinal en la cuenca, próximas en general al río Lauca (**Figura 5-2**).

Tipo	Método	Fuente
Caracterización Geológica y Geofísica	Secciones geológicas	García <i>et al.</i> , 2004
	Correlación estratigráfica	Kött <i>et al.</i> , 1995
	Observaciones de terreno	Este trabajo
	Geofísica TEM	Matraz 2015

Tabla 5-1. Fuentes de información para la definición de unidades hidrogeológicas. Fuente: elaboración propia.

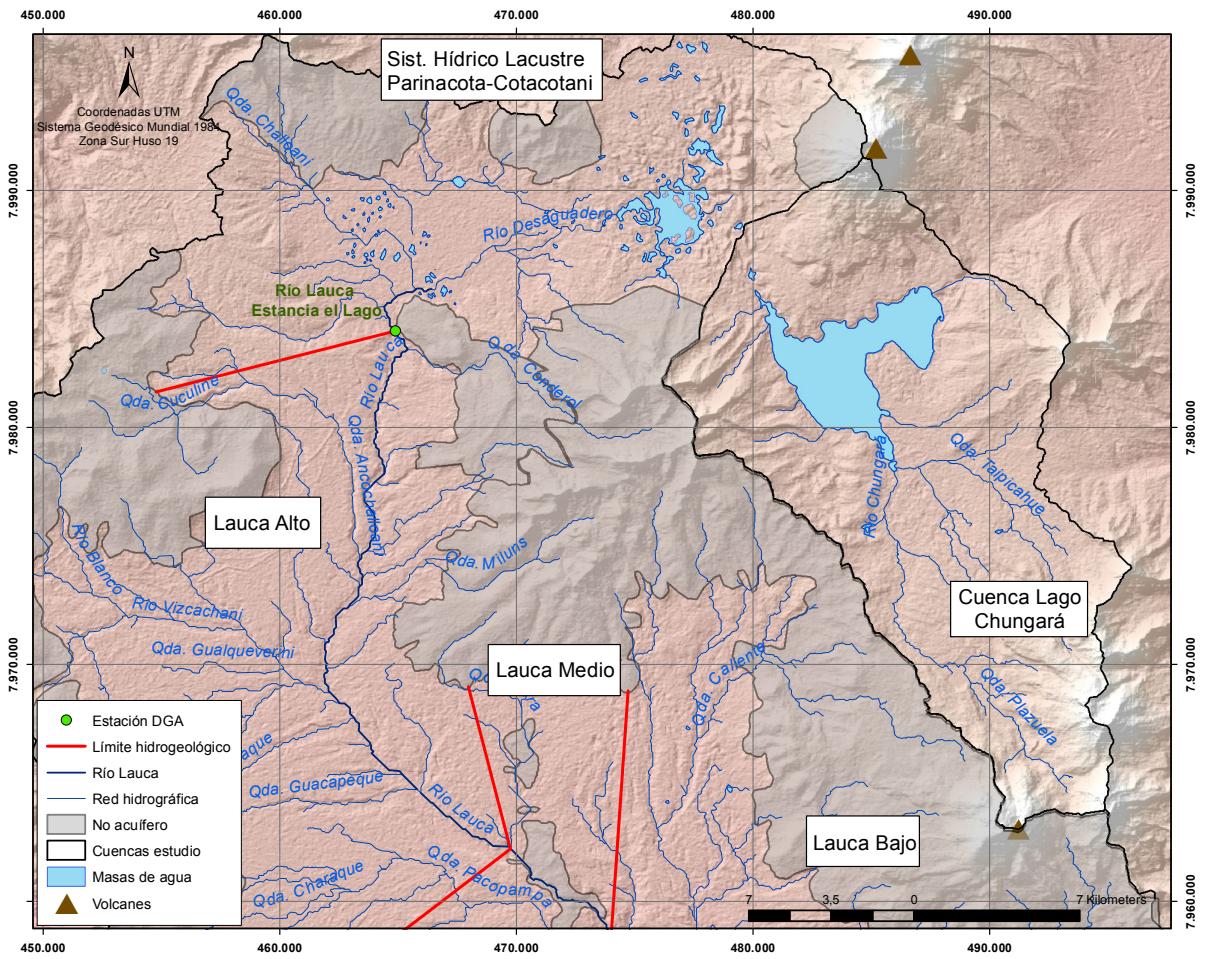


Figura 5-1. Sector hidrogeológico del SHPC. Fuente: elaboración propia.

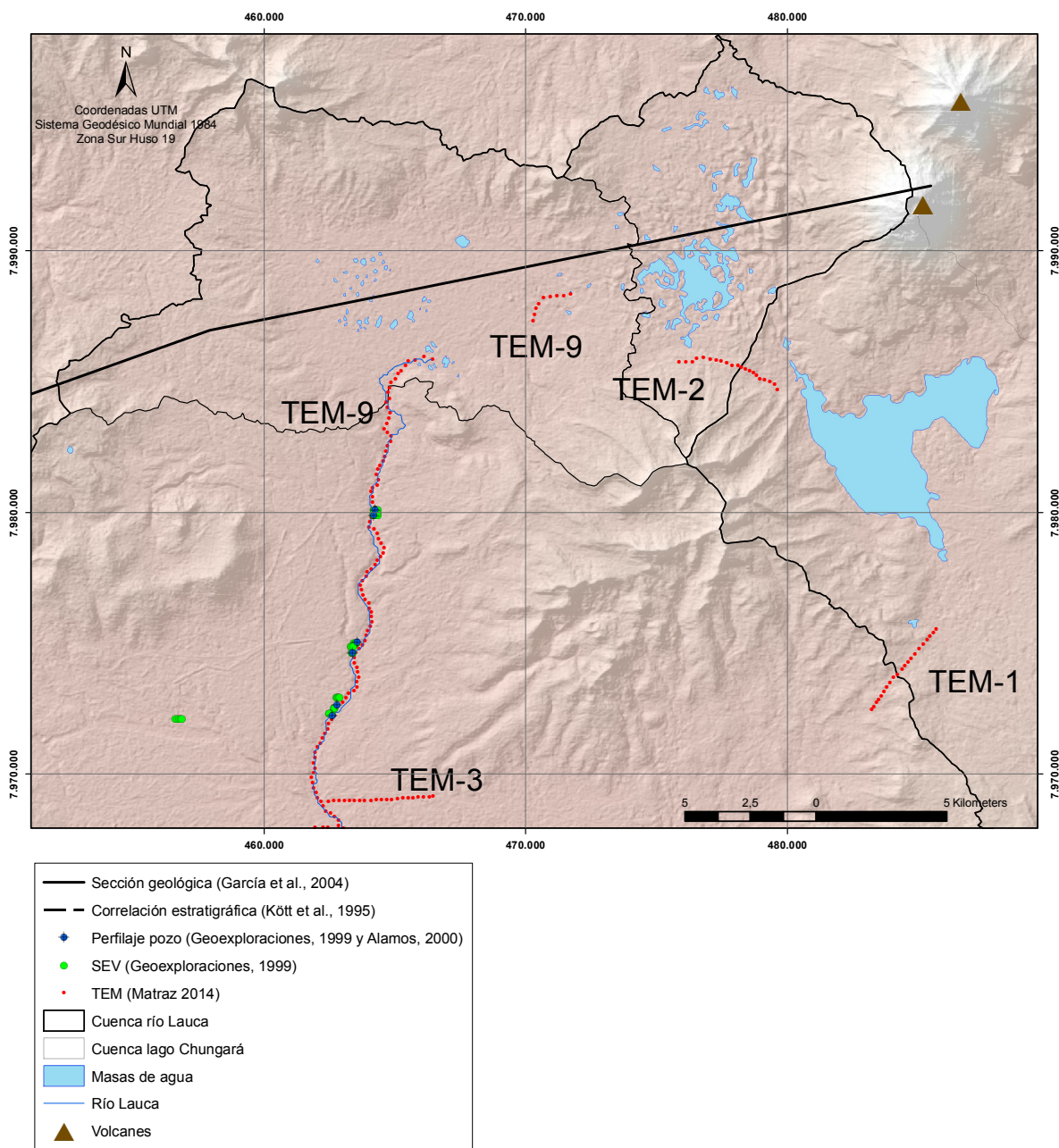


Figura 5-2. Fuentes de información para la determinación de unidades hidrogeológicas. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 5-3, Figura 5-4, Figura 5-5 y Figura 5-6 se muestra los valores de resistividad eléctrica de los perfiles TEM que fueron utilizados para apoyar la interpretación de unidades hidrogeológicas en subsuperficie.

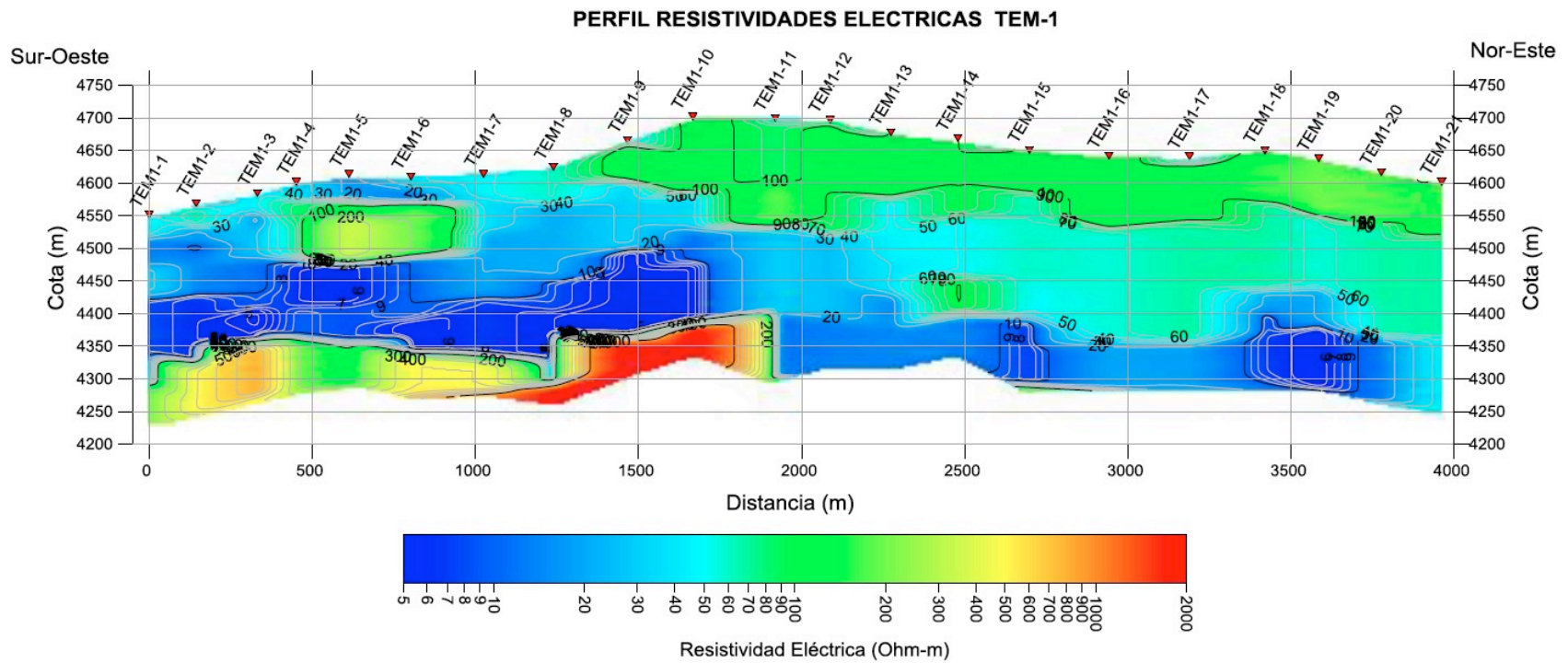


Figura 5-3. Perfil TEM-1: interpretación de campo de resistividades asociados a los puntos TEM ensayados en el perfil TEM-1. Fuente: elaboración propia.

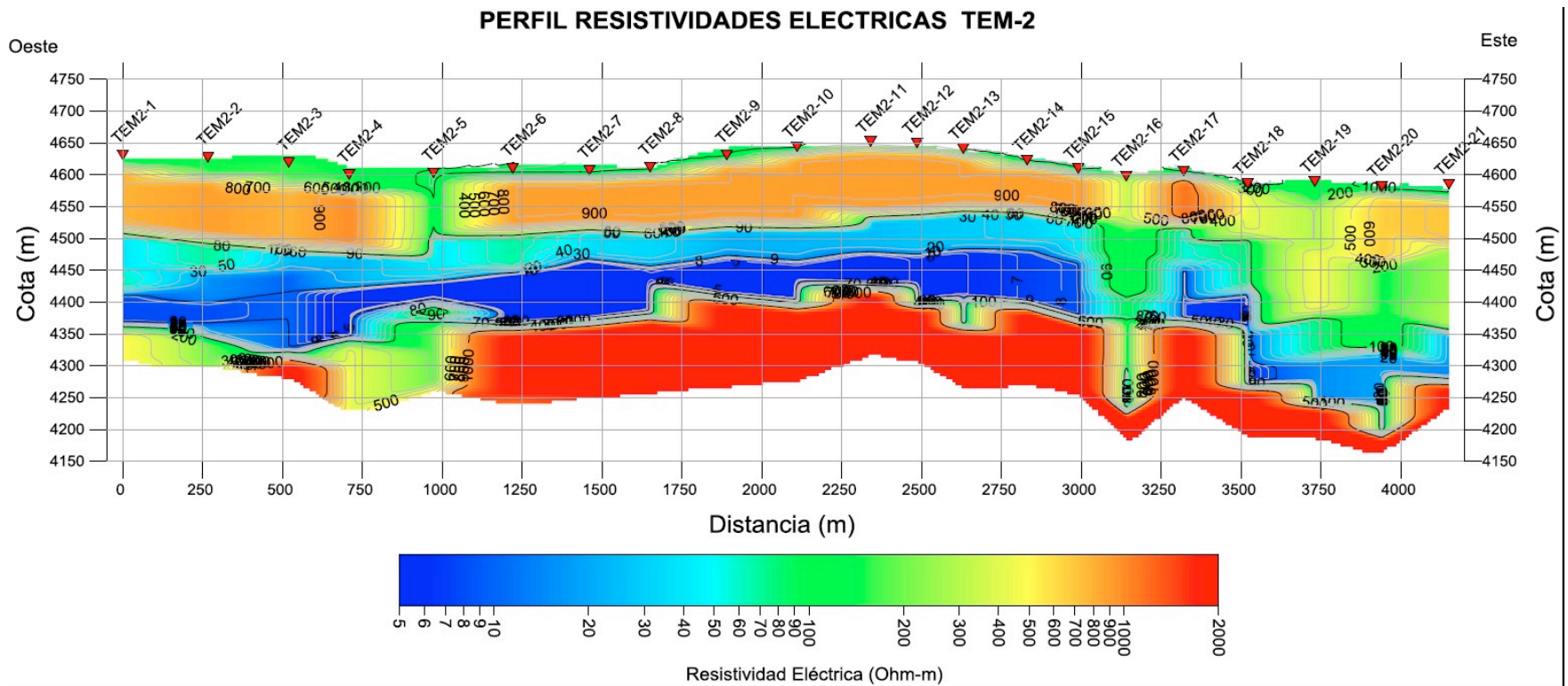


Figura 5-4. Perfil TEM-2: interpretación de campo de resistividades asociados a los puntos TEM ensayados en el perfil TEM-2. Fuente: elaboración propia.

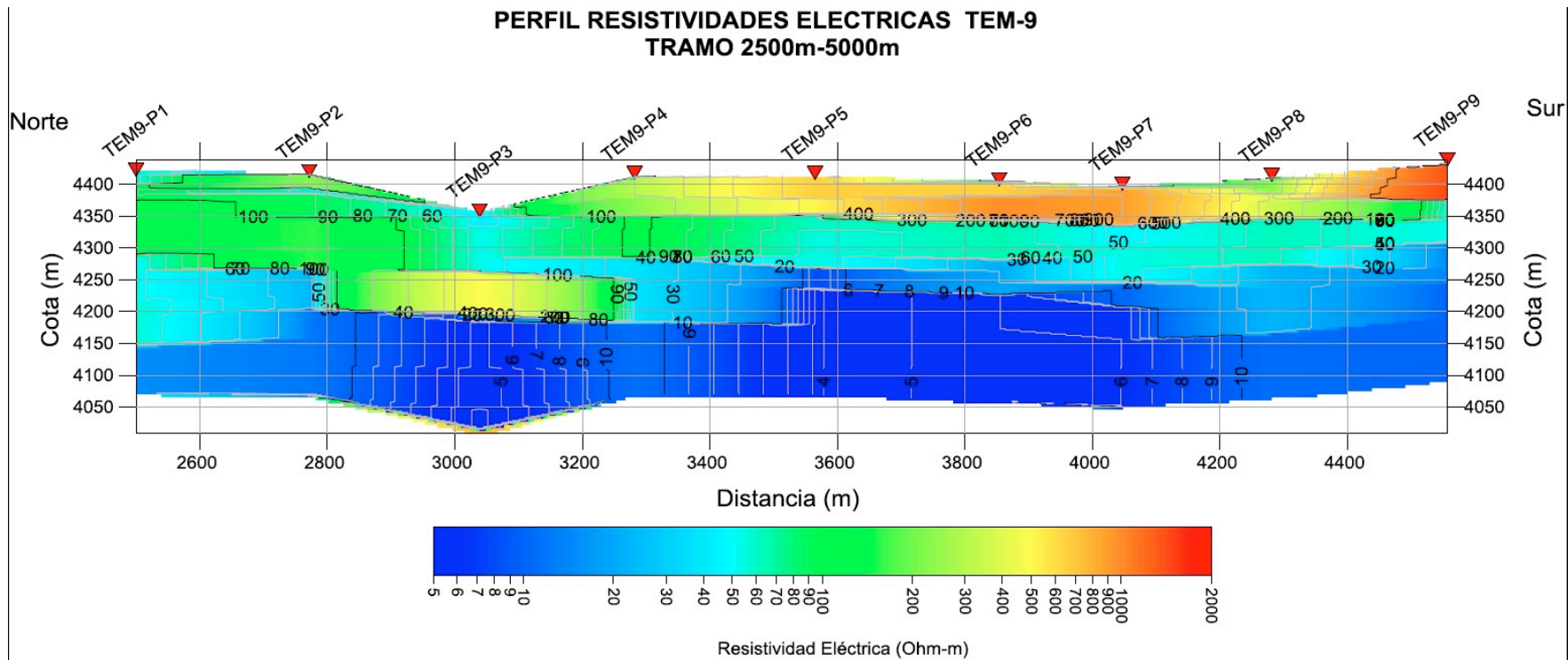


Figura 5-5. Perfil TEM-9, tramo 2.500-5.000m: interpretación de campo de resistividades asociados a los puntos TEM ensayados en el perfil TEM-9. Fuente: elaboración propia.

**PERFIL RESISTIVIDADES ELECTRICAS TEM-9
TRAMO 8700m - 20000m**

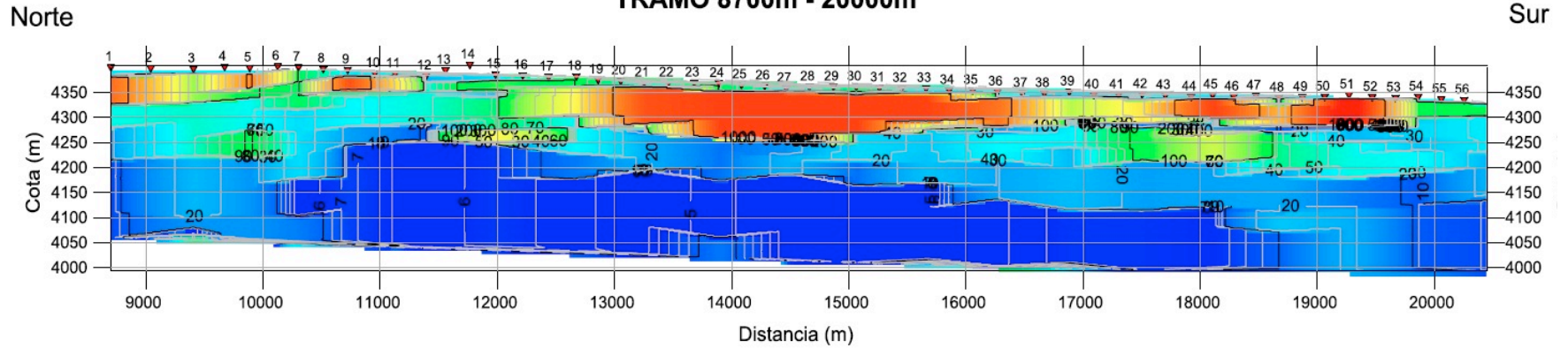


Figura 5-6. Perfil TEM-9, tramo 8.700-20.000m: interpretación de campo de resistividades asociados a los puntos TEM ensayados en el perfil TEM-9.. Fuente: elaboración propia.

Las unidades hidrogeológicas en la zona de estudio se han clasificado en 4 tipos en función del comportamiento hidráulico de las diferentes formaciones geológicas. Los tipos de estructuras internas de estas formaciones se clasifican en dos categorías según el tipo de porosidad: primaria o secundaria.

Las formaciones con porosidad primaria son aquellas en cuya matriz existen poros bien conectados donde existe la posibilidad de transmitir y almacenar las aguas subterráneas. Por otro lado, la transmisión y el almacenamiento de agua subterránea en las formaciones geológicas con porosidad secundaria se produce a través de una red de fracturas abiertas y conectadas. En este tipo de formaciones, la matriz es impermeable, es decir, no existiría porosidad primaria relevante.

Las 4 unidades hidrogeológicas principales en la zona de estudio corresponden con: acuíferos de porosidad primaria (UH1), acuíferos de porosidad secundaria (UH2), acuitardos de porosidad primaria (UH3), acuitardos de porosidad secundaria (UH4) y no acuíferos (UH5) (**Tabla 5-2**).

Unidad	Tipo	Porosidad	Descripción	Ejemplo
UH1	Acuífero	Primaria	Depósitos sedimentarios de granulometría media a gruesa poco o no consolidados	Depósitos cuaternarios aluviales Facies aluviales de la Formación Lauca
UH2	Acuífero	Secundaria	Rocas cristalinas con alto grado de fracturación	Formaciones volcánicas miocénicas
UH3	Acuitardo	Primaria	Depósitos sedimentarios de granulometría fina	Suelos actuales Facies lacustres de la Formación Lauca
UH4	Acuitardo	Secundaria	Roca de matriz impermeable y leve fracturación	Ignimbrita Lauca
UH5	No acuífero	-	Rocas competente sin fracturación o fracturas cerradas	Formación Lupica (b)

Tabla 5-2. Unidades hidrogeológicas en la cuenca del río Lauca. Fuente: elaboración propia

La UH1 representa la unidad que constituye los principales acuíferos en la zona de estudio. Estos son **acuíferos en depósitos sedimentarios** y se encuentran asociados a diferentes tipos de unidades geológicas. Por un lado, esta categoría incluye depósitos aluviales, fluviales y coluviales cuaternarios. Por otro lado, incluye los depósitos detríticos aluviales de la Formación Lauca que en el sector del Lauca Alto, junto con las formaciones sedimentarias de la Formación Lupica (d) también UH1, representan el acuífero principal en este sector de la cuenca.

La unidad UH2 corresponde con los **acuíferos en roca fracturada**. Estos son los acuíferos secundarios en la cuenca, ya que tienen una menor extensión y capacidad de almacenamiento en comparación con los acuíferos que tienen lugar en UH1. Este tipo de acuíferos están relacionados con coladas volcánicas o volcano-sedimentarias fracturadas. Una misma formación geológica cristalina impermeable en una zona de la cuenca, en otra puede llegar a convertirse en unidad acuífera donde se generan fracturas que se transforman en una importante fuente de porosidad secundaria

La UH3 tiene lugar en formaciones de porosidad primaria de menor conductividad hidráulica que UH1. Por este motivo, UH3 se ha considerado como un **acuitardo**, no obstante sería capaz de comportarse como acuífero en ciertos niveles y en función de la demanda a la que sea sometida. Estas formaciones incluyen los depósitos palustres cuaternarios típicamente asociados a los bofedales y los depósitos lacustres.

La unidad UH4 está asociada con formaciones rocosas de porosidad secundaria que presentan bajo número de fracturas abiertas y conectadas. El grado de fracturación de esta unidad no permite el suficiente flujo de las aguas subterráneas para fines productivos, su almacenamiento también es significativamente menor y, por este motivo, se clasifica como **acuitardo en roca fracturada**. La formación geológica más importante que constituye UH4 es la ignimbrita Lauca que en el sector Lauca Alto de la cuenca actúa como unidad semiconfinante.

La unidad hidrogeológica UH5 hace referencia a todas aquellas unidades geológicas que prácticamente no almacenan aguas subterráneas ni la transmiten, es decir, serían casi **impermeables**. Esta unidad hidrogeológica se conoce como acuícludo o basamento impermeable hidrogeológico cuando coincide con la unidad hidrogeológica basal. En la zona de estudio, este basamento está representado por unidades geológicas formadas por roca competente del tipo sedimentario y/o volcánico. Las características litológicas que determinan la impermeabilidad de estas rocas corresponden tanto a una escala micro-estructural como macro-estructural.

En la Figura 5-7 se presenta un mapa hidrogeológico preliminar del área de estudio. Se puede observar que la gran mayoría del área está cubierta por la UH1, sólo existe un área relativamente pequeña en donde aparece la unidad UH3. Las áreas más oscuras corresponden a la unidad UH5 que representa el basamento o áreas de no-flujo.

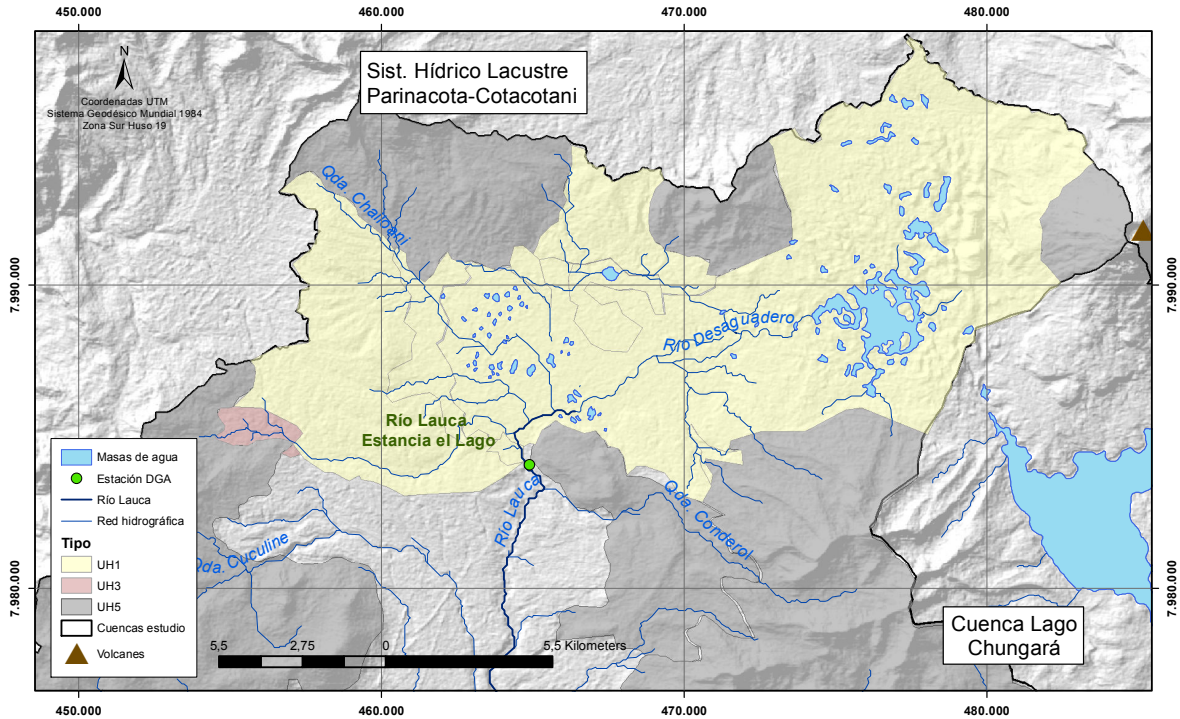


Figura 5-7. Mapa hidrogeológico preliminar del SHPC. Fuente: elaboración propia.

5.2 MAPA PIEZOMÉTRICO

A continuación se presenta el mapa piezométrico de la cuenca del río Lauca (**Figura 5-8**). Hay que tener en cuenta que los mapas piezométricos son interpretaciones que representan el estado de las cargas hidráulicas en un determinado tiempo. Los niveles a lo largo del tiempo pueden variar dependiendo de la época del año y sobre todo por episodios climatológicos.

Para definir una superficie piezométrica es necesario disponer de abundantes puntos con información del nivel piezométrico. En el caso del SHPC, para confeccionar el mapa piezométrico se utilizaron datos indirectos: estos permiten orientar la interpretación en aquellas zonas con escasa o nula información disponible. De esta forma, también se utilizaron datos de cotas y coordenadas de las zonas donde la piezometría corta la topografía (vertientes y nacimientos de ríos), zonas de humedal, y aforos en el río que indican que parte de éste es ganador o perdedor. Se consideraron también para la realización de la piezometría los resultados de la campaña de geofísica (TEM) de los cuales se puede deducir la profundidad del nivel piezométrico además de las observaciones realizadas en las diferentes campañas de terreno. De esta forma, los puntos empleados corresponden a la unidad acuífera superficial UH1.

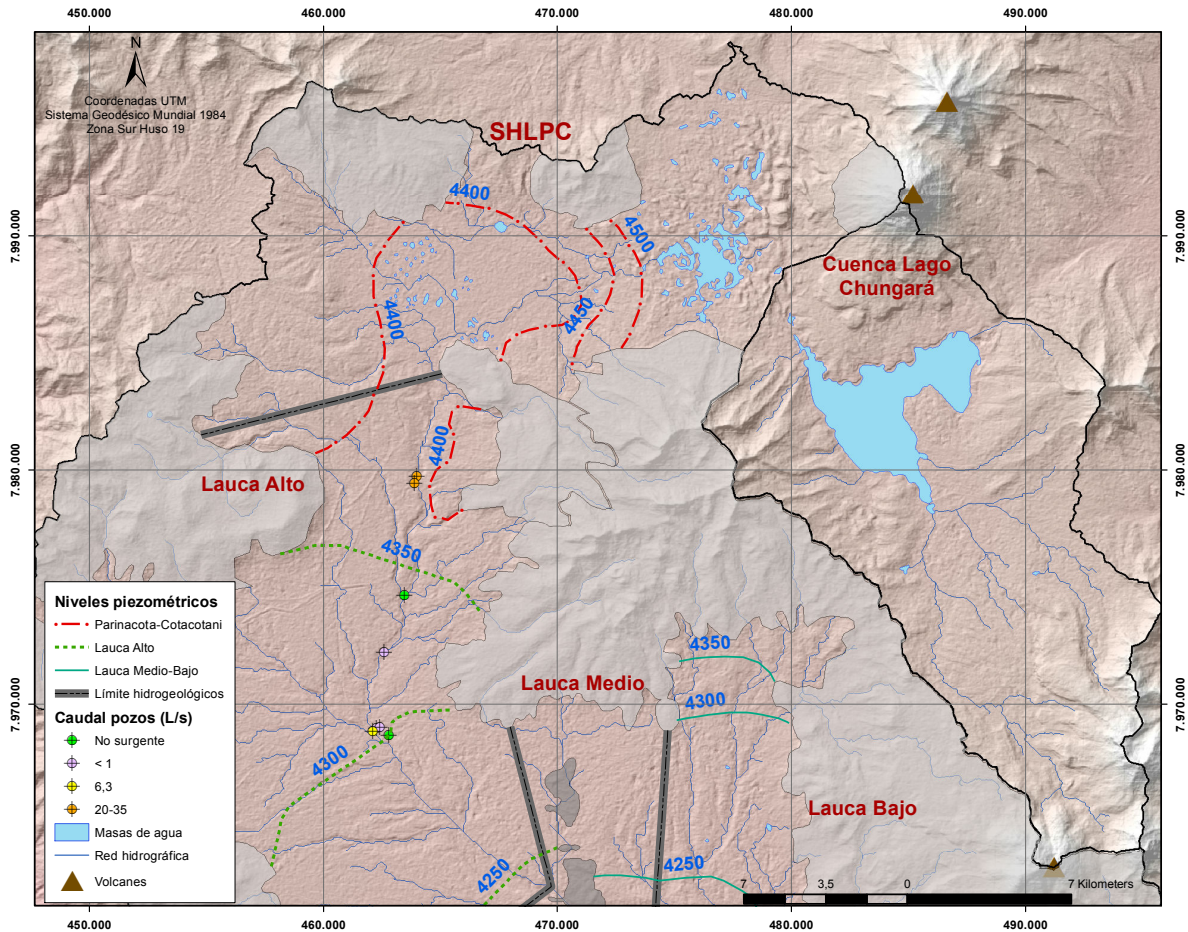


Figura 5-8. Mapa piezométrico de la zona de estudio. Fuente: elaboración propia.

En el SHPC, en la parte más alta de Cotacotani existe una sola unidad acuífera tipo libre. Esta unidad se divide en dos hacia la zona de las ciénagas de Parinacota por la aparición de la ignimbrita Lauca, que actúa como unidad hidrogeológica tipo UH4 de carácter semiconfinante. Estos dos acuíferos se constituyen en unidades hidrogeológicas tipo UH1. A partir de este altura en la cuenca, el anterior acuífero libre único se transforma en un sistema dual formado por un acuífero superior libre y un acuífero inferior semiconfinado. La piezometría en este sector de la cuenca se realiza de forma general sobre la unidad acuífera libre más superficial a causa de la mayor disponibilidad de datos y por representar la unidad acuífera principal.

Las zonas no acuíferas (zonas grises en **Figura 5-8**) se sitúan en las partes más altas que rodean la cuenca. Estas zonas que no constituyen acuífero son interpretadas como zonas no saturadas que, en la mayoría de los casos, se asocian con UH5. Eventualmente estas áreas se podrían interpretar como UH2 o UH4, permitiendo así un nivel de infiltración variable según el sector. Otras áreas que no contienen aguas subterráneas son las relacionadas con rocas impermeables.

En términos generales, la piezometría de la cuenca es de menor gradiente en el sector Parinacota-Cotacotani. El nivel piezométrico alcanza una altura aproximada de 4.500 msnm en su parte alta y desciende hasta los 4.400 msnm en la salida.

6 CARACTERIZACIÓN HIDROQUÍMICA

Se realizaron dos campañas de muestreo hidroquímico. Estas campañas permiten obtener datos de análisis químicos mayoritarios y minoritarios. El objetivo es realizar una caracterización de las aguas superficiales y subterráneas, y facilitar la comprensión de las relaciones hidrogeológicas.

Se ejecutaron dos campañas de muestreo: La primera campaña se realizó en septiembre del 2014, y la segunda campaña en abril del 2015. La primera campaña tuvo como objetivo realizar un levantamiento general e identificar aquellos elementos singulares. La planificación de la segunda campaña utilizó la información de la primera campaña y estuvo orientada a repetir algunos puntos para determinar cambios estacionales, y a levantar nuevos puntos considerados relevantes a la luz de los resultados y avances del proyecto.

La caracterización hidroquímica se utiliza para construir parte del modelo hidrogeológico conceptual, y le da coherencia a las relaciones entre los demás elementos fundamentales de la modelación como son la geología, hidrología e hidrogeología de la cuenca.

Este capítulo se compone de 4 secciones:

- Parámetros fisicoquímicos obtenidos durante el recogido de las muestras directamente en terreno: temperatura (°C), pH (laboratorio) y conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$).
- Análisis de los datos mediante la representación gráfica en diagramas del tipo Schöeller-Berkaloff.
- Calidad ambiental de las aguas, en donde se presenta la concentración de algunos metales (As y Fe), y de boro respecto de la norma chilena de agua potable(NCh 409).
- Modelo hidroquímico conceptual de la zona de estudio.

En la **Figura 6-1** se muestra la ubicación de las vertientes, aguas superficiales y pozo muestreados durante la primera campaña de terreno en septiembre de 2014 mientras que **Figura 6-2** presenta la ubicación de las aguas recogidas durante abril de 2015.

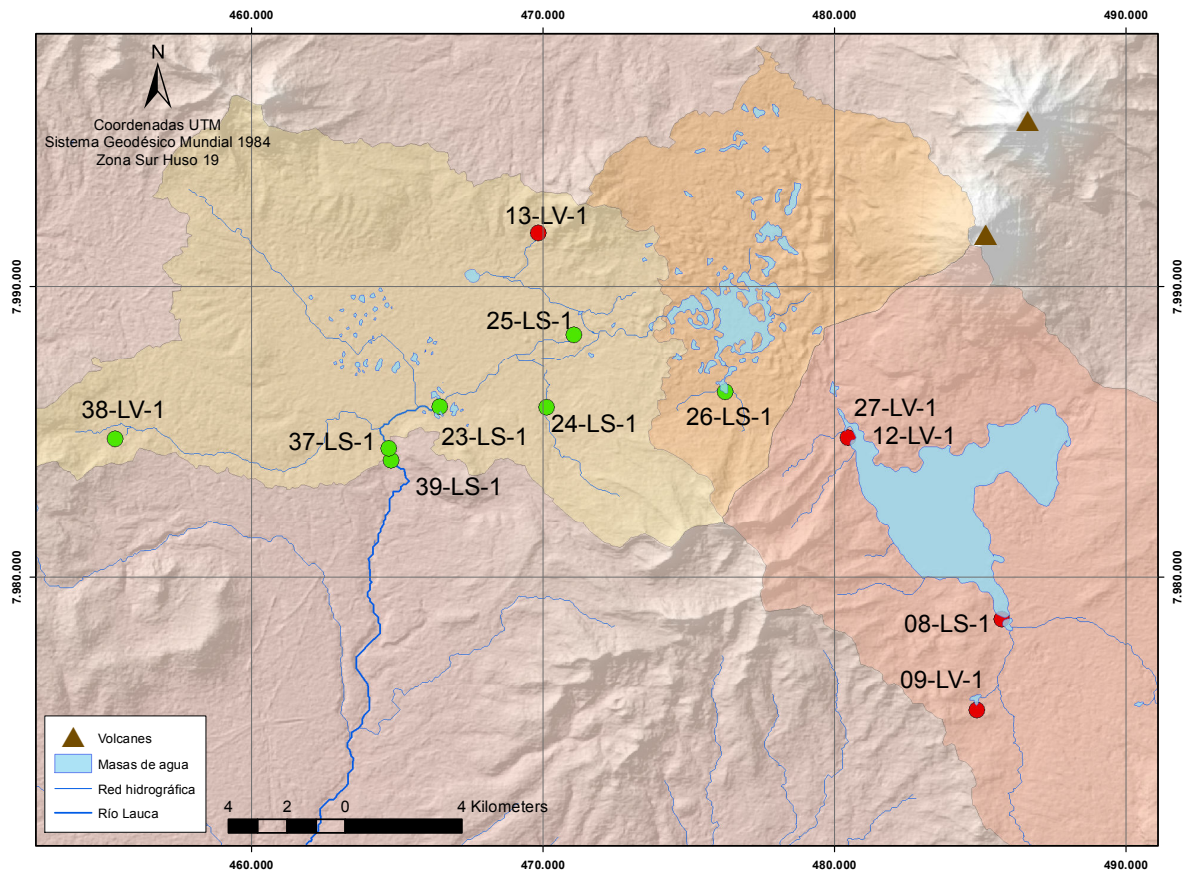


Figura 6-1. Ubicación de las muestras tomadas para el análisis químico en la campaña de terreno de septiembre de 2014. Fuente: elaboración propia.

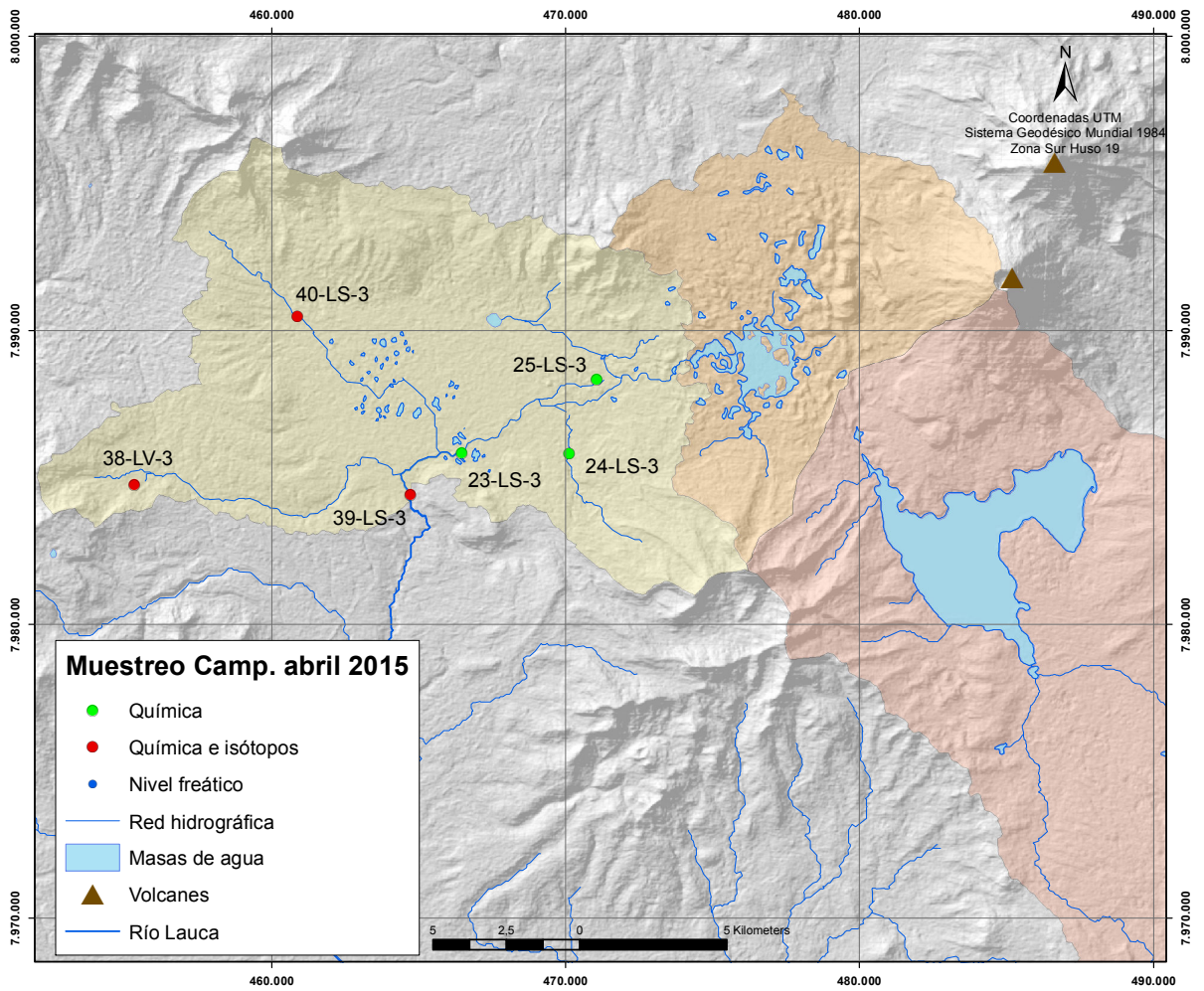


Figura 6-2. Ubicación de las muestras tomadas para el análisis químico en la campaña de terreno de abril de 2015. Fuente: elaboración propia.

6.1 PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS

Se presenta la distribución estadística y la distribución espacial de los parámetros temperatura (°C), pH y conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) recogidos en aguas superficiales y subterráneas. Las muestras de aguas subterráneas se muestrearon tanto en pozos como en vertientes, registrados en septiembre de 2014 y en abril de 2015.

6.1.1 RANGO DE TEMPERATURA

El rango de la temperatura medida en el terreno de septiembre de 2014 varía entre 8,1 a 26 °C. El valor mínimo corresponde al río Chungará en su desembocadura al lago (08-LS-1) y la máxima temperatura a la vertiente al sur del lago Chungará. Las temperaturas registradas durante abril de 2015 oscilan entre 6 y 11 °C.

Las aguas superficiales en ambas campañas presentan temperaturas más bajas debido principalmente a dos factores: por un lado la temperatura del aire en esta zona de estudio es muy baja (la temperatura media registrada en las estaciones meteorológicas Chungará-Ajata y Parinacota son 4 y 2,8 °C respectivamente), y por otro lado parte del agua superficial proviene de la fusión de la nieve o precipitaciones. Otros factores que pueden condicionar esta diferencia son la radiación solar, la dirección y fuerza del viento, la proximidad de masas de agua, entre otros.

En la Figura 6-3 se muestra la distribución de las temperaturas influenciadas por estos factores, ya que en las zonas con mayor altitud y donde se producen más precipitaciones se registran las temperaturas más bajas de la zona de estudio (septiembre de 2014). Las temperaturas más bajas se ubican en los sistemas lagunares.

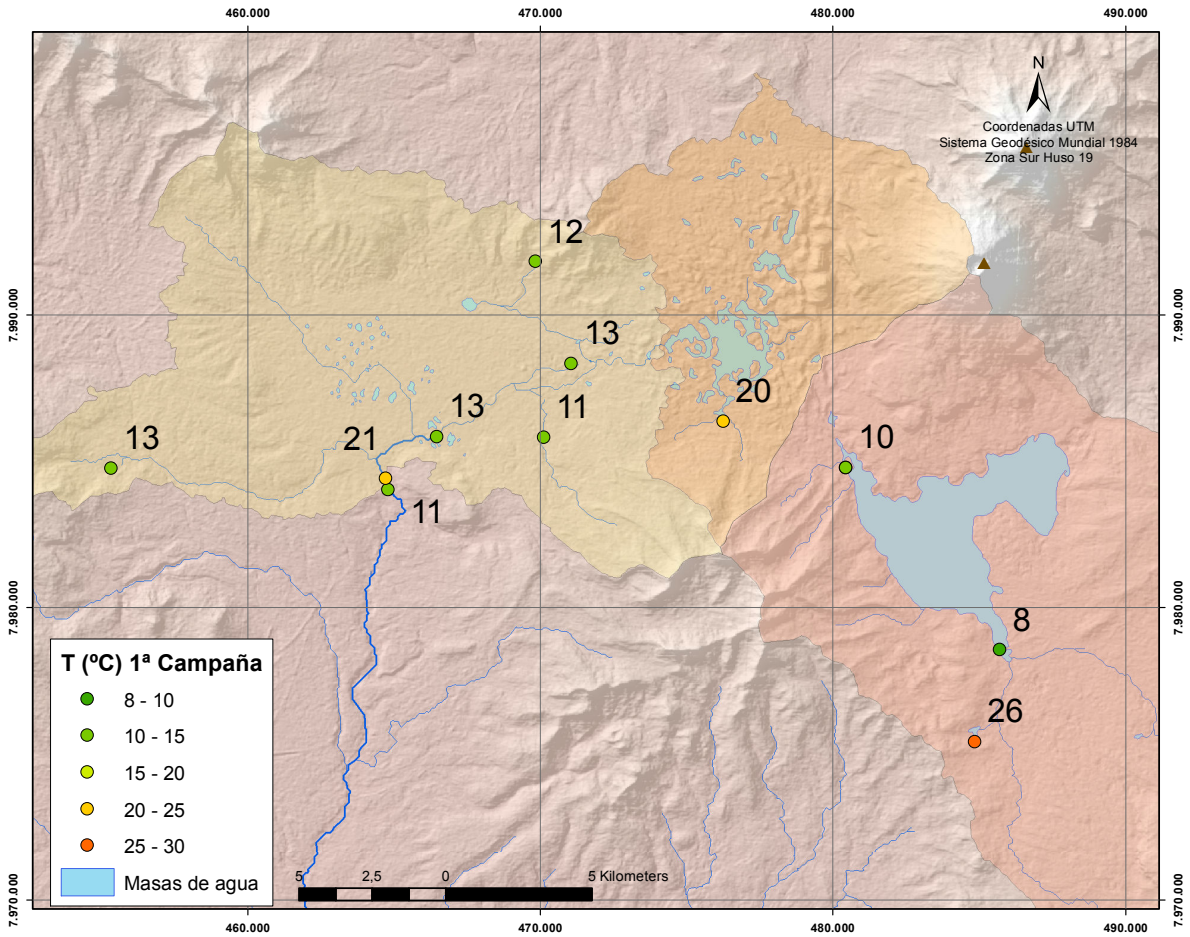


Figura 6-3. Mapa de los valores de temperatura (°C) medidos en la primera campaña de terreno, septiembre 2014. Fuente: elaboración propia.

6.1.2 RANGOS DE pH

El valor de pH (laboratorio) registrado durante septiembre de 2014 varía entre 6,4 y 9,1, que corresponde a un rango de aguas neutras a alcalinas. Las aguas recogidas en abril de 2015 presentan un pH que oscila entre 7,2 y 8,8. Es destacable mencionar que en ambas campañas los valores más alcalinos de pH se localizan en las lagunas de Cotacotani, el río Desaguadero, la cabecera del río Lauca. En la Figura 6-4 se presenta la distribución espacial del pH registrado en septiembre de 2014.

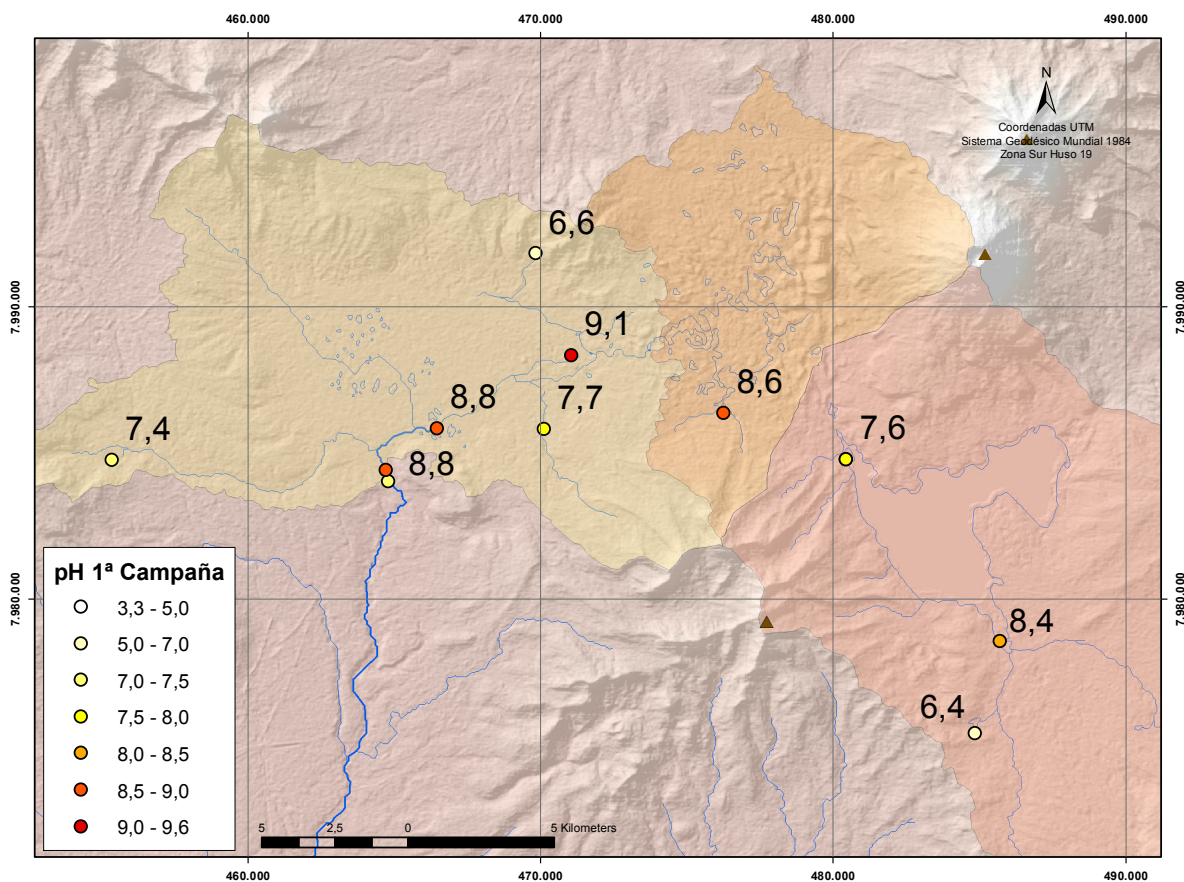


Figura 6-4. Mapa de los valores de pH medidos en la primera campaña de terreno, septiembre 2014. Fuente: elaboración propia.

6.1.3 RANGOS DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

En general, el rango de variación de la conductividad eléctrica medida en terreno es estrecho. En las aguas tomadas en septiembre de 2014 la gran mayoría de las muestras corresponden a aguas frescas cuya conductividad eléctrica varía entre 47 y 917 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figura 6-5).

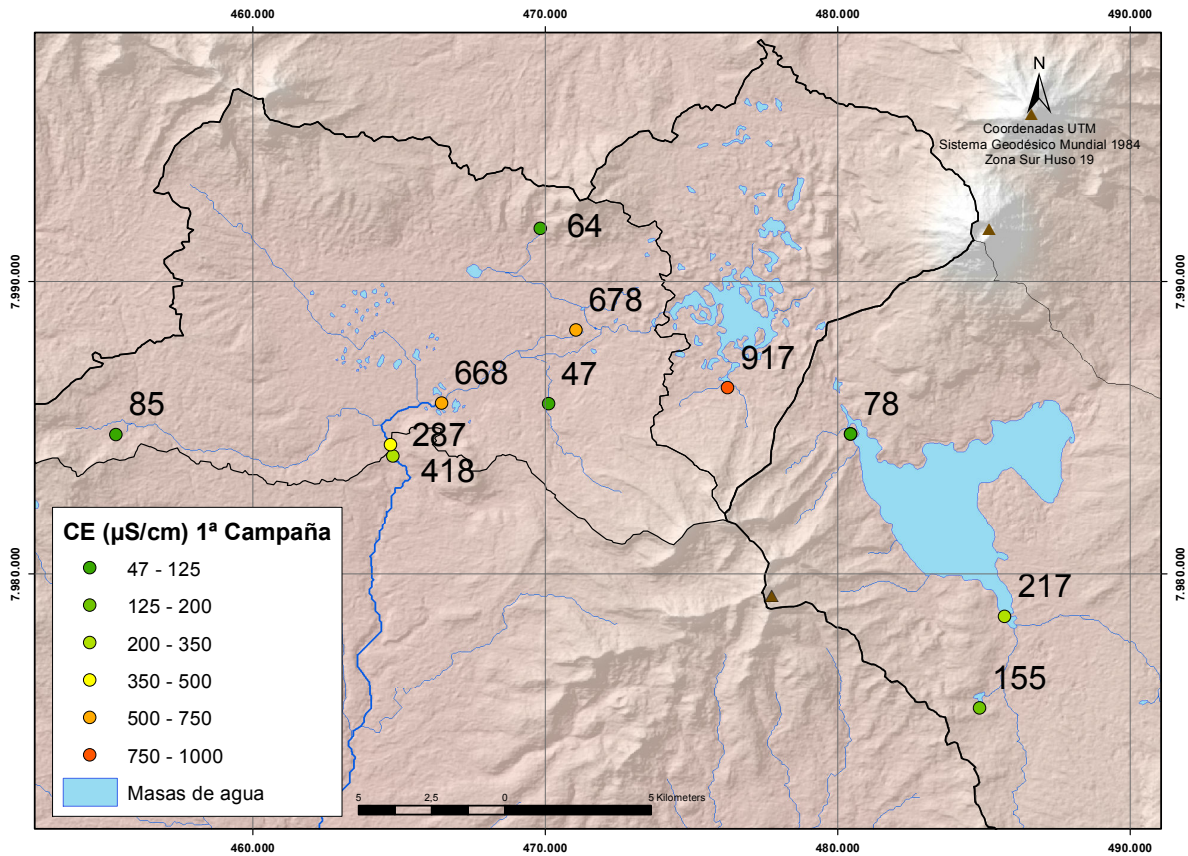


Figura 6-5. Mapa de los valores de conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) medidos en la primera campaña de terreno, septiembre 2014. Fuente: elaboración propia.

6.2 ANÁLISIS HIDROQUÍMICO

A continuación se describe el desarrollo del análisis hidroquímico que se ha estructurado dos partes: Balance Iónico y Análisis de Elementos Mayores.

La composición hidroquímica de las aguas de la zona de estudio se obtiene a partir del análisis del laboratorio de las muestras recogidas durante las dos campañas de terreno. En primer lugar, para controlar la calidad y precisión del proceso de análisis del laboratorio, se enviaron muestras duplicadas y por otro lado, se calculó el balance de aniones y cationes.

Una vez verificado los resultados del laboratorio, se realizan los diagramas de Schöeller. Se este modo se clasifican las aguas según el contenido relativo de las especies disueltas, obteniendo aguas de tipo cálcica, sódica, magnésica, clorurada, potásica, sulfatada, carbonatada y bicarbonatada.

Los diagramas de Schöeller representan las concentraciones de los elementos mayoritarios en miliequivalentes por litro (meq/L). Los iones se disponen en ejes verticales, a la derecha los cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} y a la izquierda los aniones Cl^{-} , SO_4^{2-} , HCO_3^{-} , igualmente separados y divididos en una escala logarítmica. Una vez calculadas las concentraciones de estos elementos, se unen mediante una línea los puntos de los elementos de una muestra. Este trazo presenta una forma geométrica que refleja la composición del agua de esa muestra. Este tipo de gráficos permite interpretar varias muestras a la vez, por lo cual es apropiado para estudiar evoluciones temporales de aguas en un mismo punto y variaciones composicionales en muestras de diferentes localidades. Por otro lado, se pueden comparar muestras de salinidad muy diferente en el mismo gráfico. El inconveniente de este tipo de gráficos es que no se aprecian las pequeñas variaciones de concentración en los iones entre diferentes muestras.

6.2.1 BALANCE IÓNICO

La precisión de los análisis químicos se controla mediante diferentes métodos, entre éstos el balance iónico. El balance iónico debe verificar que la suma de miliequivalentes de aniones (-) sea igual a la suma de miliequivalentes de cationes (+), como se indica en la Ecuación 6-1.

$$\sum \text{cationes} \left(\frac{\text{meq}}{1}\right) = \sum \text{aniones} \left(\frac{\text{meq}}{1}\right) \times \quad \text{Ecuación 6-1}$$

Una vez se realiza este balance se toma como error el porcentaje calculado con la **Ecuación 6-2**.

$$Error (\%) = 100 \frac{\sum cationes - \sum aniones}{\sum cationes + \sum aniones}$$

Ecuación 6-2

El porcentaje de error obtenido de la última ecuación debe ser inferior al 5% para mostrar un equilibrio entre las cargas eléctricas de sus especies disueltas. Los casos con error superior al 5% se descartan para el análisis por ser menos fiables o se utilizan únicamente como referenciales. Las muestras que presentan un error negativo en el balance indican que la concentración de alguna/as de sus especies aniónicas han sido sobreestimadas o se han subestimado la concentración de alguna/as especies catiónicas.

Los porcentajes de error del balance iónico de las muestras tomadas durante la primera campaña de terreno en septiembre de 2014 varían entre -4,55 y 3,47%. Los valores de los error del balance iónico en la pareja de muestras dobles 12-LV-1 y 27-LV-1 el error es -4,55 y 3,55% respectivamente. Los valores del error de las aguas tomadas en abril de 2015 oscilan entre 0,72 y 3,67% (Tabla 6-1).

Muestras Sept.2014	Error balance (%)	Muestras Abril 2015	Error balance (%)
08-LS-1	-1.39	23-LS-3	3.45
09-LV-1	1.53	24-LS-3	0.79
12-LV-1	-4.55	25-LS-3	3.12
13-LV-1	3.47	38-LS-3	0.72
23-LS-1	-2.06	39-LS-3	3.67
24-LS-1	-4.37	40-LS-3	2.73
25-LS-1	-4.34		
26-LS-1	-4.14		
37-LS-1	-2.90		
38-LV-1	-2.18		
39-LS-1	-2.76		

Tabla 6-1. Resumen con los balances iónicos de las muestras tomadas en ambas campañas de muestreo hidroquímico.

6.2.2 ANÁLISIS DE ELEMENTOS MAYORES

Se representa la composición química de las muestras de agua a partir de las concentraciones de los compuestos mayoritarios en los diagramas de Schöeller, con el fin de clasificar las aguas en cálcica, sódica, magnésica, clorurada, potásica, sulfatadas, carbonatadas y bicarbonatadas de las aguas recogidas durante la campaña de terreno efectuada en septiembre de 2014 y en abril de 2015.

Los diagramas utilizados tiene como objetivo conseguir la visualización gráfica de la composición hidroquímica, y a la vez identificar el grado de concentración de los solutos en el agua. Los diagramas de Schöeller permiten interpretar varias muestras a la vez, por lo cual es apropiado para estudiar variaciones composicionales en muestras de diferentes localidades.

Se presentan inicialmente las conclusiones en un formato simplificado con el objetivo de destacar la interpretación que aporta el análisis hidroquímico por sobre el detalle de la huella química de cada muestra individual. A continuación de las conclusiones se presenta la descripción detallada de las muestras individuales de acuerdo a los datos entregados por el laboratorio. Algunas muestras se repiten en varios diagramas para poder ver con mayor claridad la evolución espacial de las aguas.

En la Figura 6-6 se muestran las ubicación y el anión predominante de las aguas superficiales y subterráneas recogidas en septiembre de 2014.

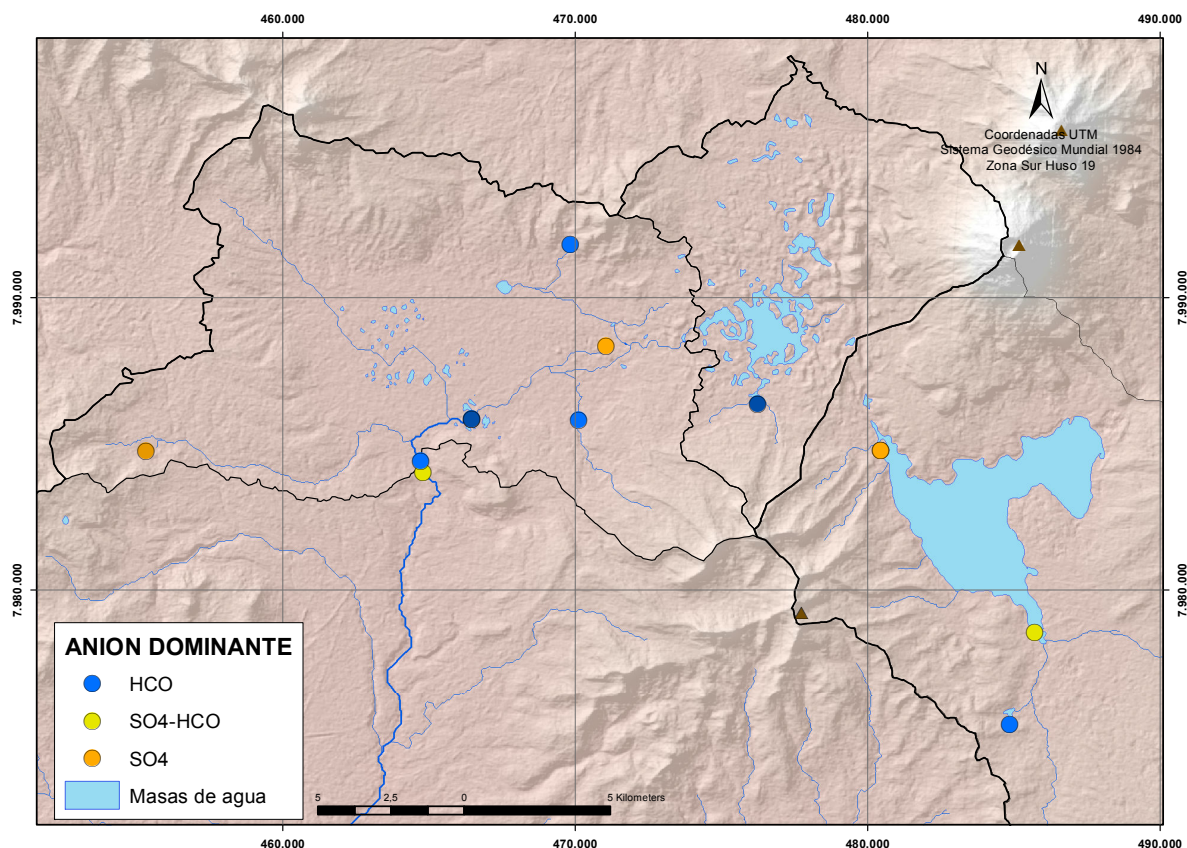


Figura 6-6. Mapa de las muestras recogidas en septiembre de 2014. Fuente: elaboración propia.

En el área que engloba las lagunas de Cotacotani y las ciénagas de Parinacota, hasta la bocatoma del canal Lauca, se tomaron 5 muestras de agua para el análisis hidroquímico en septiembre de 2014 y 4 muestras en abril de 2015.

En la Figura 6-7 se presenta el diagrama de Schöeller y el mapa con la ubicación de las muestras 26-LS-1, 25-LS-1, 13-LV-1, 24-LS-1 y 23-LS-1 tomadas en la primera campaña. Observando los gráficos de cada muestra se puede identificar 3 grupos de aguas según la concentración de los elementos mayoritarios:

- Aguas bicarbonatadas sódico cálcicas ($\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+-\text{Ca}^{2+}$) y muy diluidas (0,03-0,5 meq/L). Las aguas de la vertiente norte de la cuenca (13-LV-1) y las de una vertiente en las ciénagas de Parinacota (24-LS-1) son $\text{HCO}_3^-/\text{Na}^+-\text{Ca}^{2+}$. La muestra 24-LS se analizó en ambas campañas y no refleja cambio en la composición hidroquímica.
- Aguas con concentración relativamente alta de elementos mayores (1-6 meq/L). Las lagunas de Cotacotani (26-LS-1) y las aguas del río Lauca en la bocATOMA del canal (23-LS-1) son de tipo $\text{HCO}_3^-/\text{Mg}^{2+}-\text{Na}^+$, mientras que las aguas del río Desaguadero (25-LS-1) son $\text{SO}_4^{2-}/\text{Mg}^{2+}$. La muestra 23-LS-3 no varía hidroquímicamente en la segunda campaña, sin embargo la muestra tomada en el río Desaguadero (25-LS-3) presenta un predominio del ión HCO_3^- y Mg^{2+} similar al agua de la bocATOMA del canal Lauca.
- Aguas sulfatadas concentración intermedia de elementos mayores (<2 meq/L). La muestra tomada en la quebrada Challoaní (40-LS-3), al noroeste de la cuenca, es de tipo $\text{SO}_4^{2-}/\text{Ca}^{2+}$. Destaca su baja concentración de cloruros.

Estas diferencias hidroquímicas entre los tres grupos indican que las aguas bicarbonatadas muy diluidas son aguas jóvenes, con un corto recorrido por el acuífero. Este tipo de aguas corresponden a vertientes que alimentan el sistema de la cuenca.

En el segundo grupo, las aguas más concentradas representan aguas con mayor evolución química que las anteriores. Este patrón de huellas químicas indicaría que existe una mezcla de aguas muy frescas (las vertientes), con aguas más evolucionadas asociadas a tiempos de residencia más largos de permanencia en los cuerpos de agua superficial.

Destaca la alta concentración relativa de cloro (1 miliequivalente por litro) en las aguas de las lagunas de Cotacotani, el río Desaguadero y el nacimiento del río Lauca, en ambas campañas. Mientras que las aguas de las vertientes presentan un valor muy bajo de cloruros. Lo anterior puede estar asociado a la recirculación de parte del volumen embalsado en las lagunas y ciénagas, provocando evaporación y acumulación de cloruros.

Sector Parinacota-Cotacotani (Septiembre 2014)

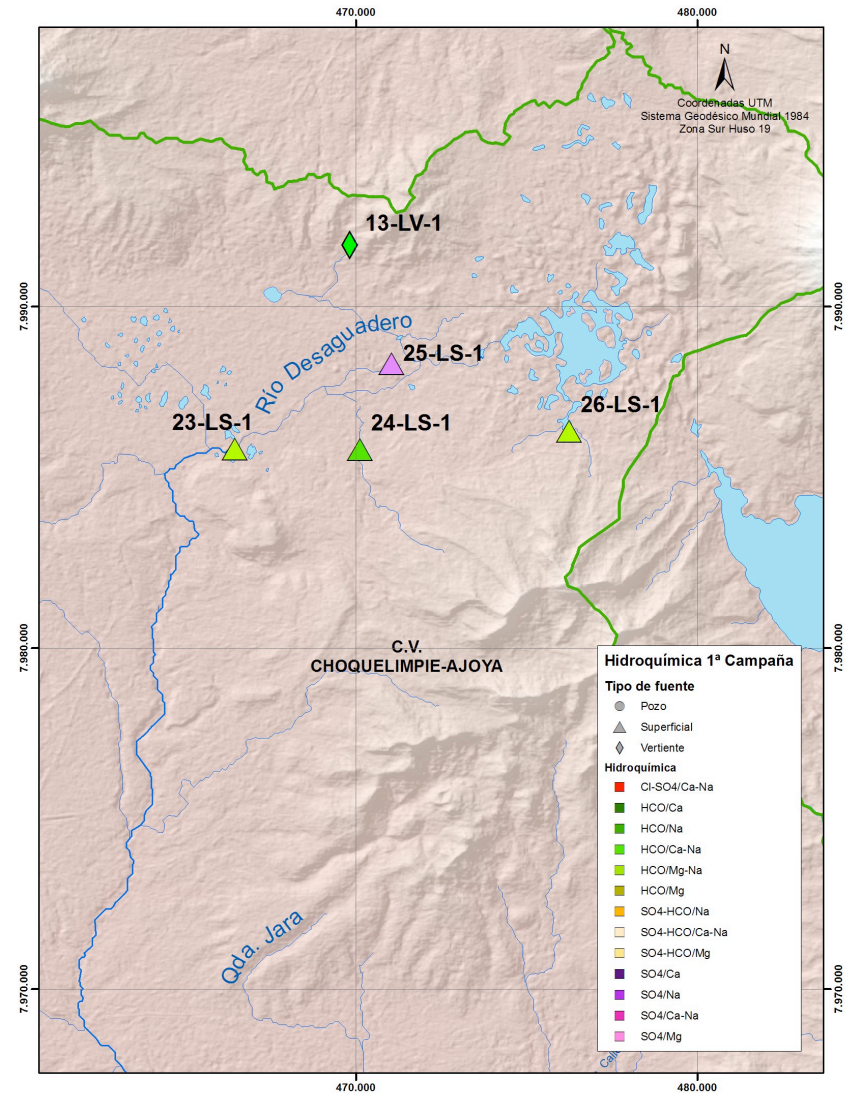
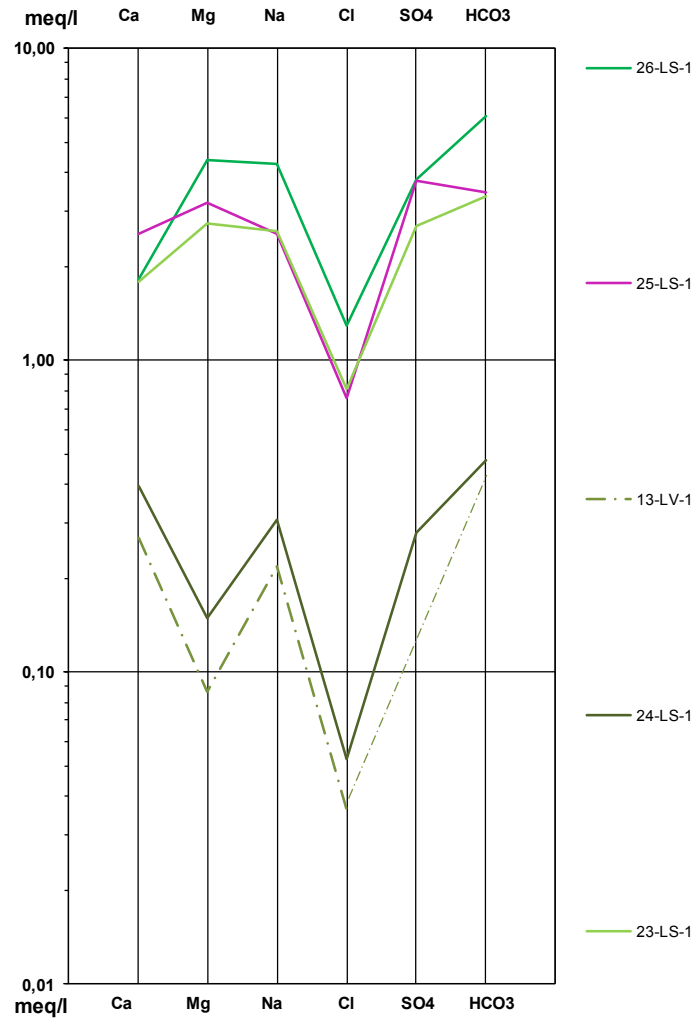


Figura 6-7. Diagrama Schöeller y mapa de ubicación de las muestras en el sector Parinacota-Cotacotani en la primera campaña de terreno, septiembre 2014. Fuente: elaboración propia.

6.3 CALIDAD DE LAS AGUAS

Se analizan las concentraciones de componentes químicos del agua según los límites establecidos en normas de agua potable: norma chilena NCh 409/1 Of. 2005 (**Tabla 6-2.**). A partir de este análisis se detectan los puntos de agua muestreados que presentan riesgo para la salud por superar la concentración permitida de metales Arsénico (As) y Hierro (Fe), mientras que el Boro (B) se compara con la norma de calidad del agua potable de la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2008).

Elemento	Concentración límite (mg/L)	Norma de calidad
Arsénico	0,01	NCh 409/1 Of. 2005
Hierro	0,3	NCh 409/1 Of. 2005
Boro	0,5	OMS, 2008

Tabla 6-2. Límite de la concentración (mg/L) de As, Fe y B para cumplir las normas de calidad de agua potable. Fuente: elaboración propia.

6.3.1 CONCENTRACIÓN DE ARSÉNICO

En la Figura 6-8 se muestran los mapas de la zona de estudio con los rangos de los valores de las concentraciones de As analizados. El color verde indica que el valor de concentraciones de As es inferior a 0,01 mg/L que es el límite establecido por NCh 409/1 of. (2005), mientras que los colores amarillo, naranja y rojo indican que se supera dicho valor. Las muestras que superan el límite determinado en la norma chilena entre 0,01 y 0,1 mg/L corresponde a la laguna de Cotacotani (26-LS), la vertiente del norte de la cuenca (13-LV), el río Desaguadero (25-LS). Por encima de estos valores se encuentran las aguas del río Lauca y del pueblo de Ancuta.

Es significativo que no exista variaciones entre las concentraciones detectadas de arsénico en las aguas analizadas entre septiembre de 2014 y abril de 2015, lo que indicaría que las concentraciones de As no sufren de influencia estacional significativa.

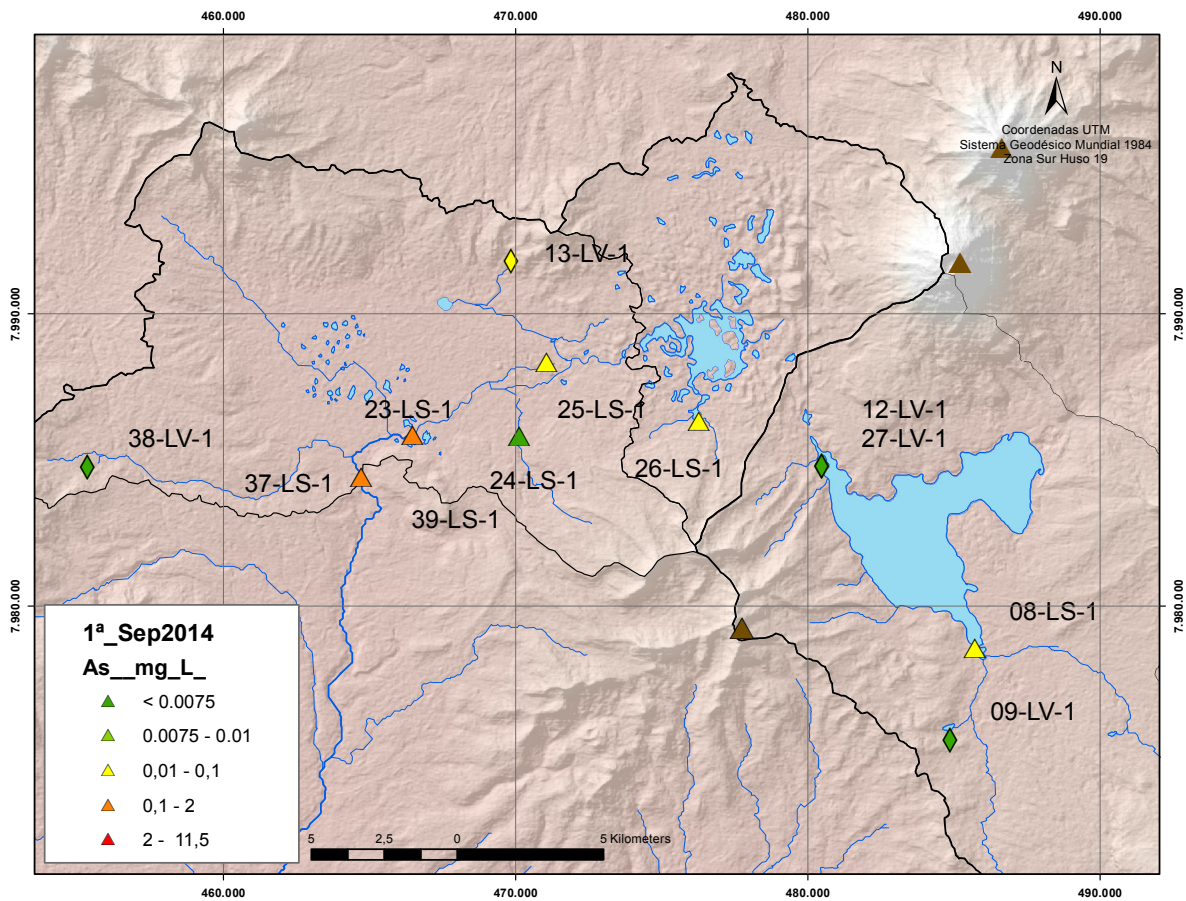


Figura 6-8. Mapa que muestra la concentración de As (mg/L) en los puntos de muestreo de la primera campaña de terreno, septiembre 2014. Fuente: elaboración propia.

6.3.2 CONCENTRACIÓN DE HIERRO

Una concentración de Fe en el agua inferior a 0,30 mg/L la dispone dentro de la norma de agua potable, según las normas de *NCh 409/1 of. (2005)*. En la Figura 6-9, los puntos muestreados que dominan no sobrepasan el límite señalado de Fe. En color naranja y rojo, las muestras que superan este valor definido son las aguas de la vertiente del norte de la cuenca (13-LV-1) la qda. Challoani (40-LS-3). La vertiente al suroeste del lago Chungará (09-LV-1) presenta la mayor concentración de Fe: 11,37 mg/L. En general, en ambas campañas las concentraciones hierro son similares.

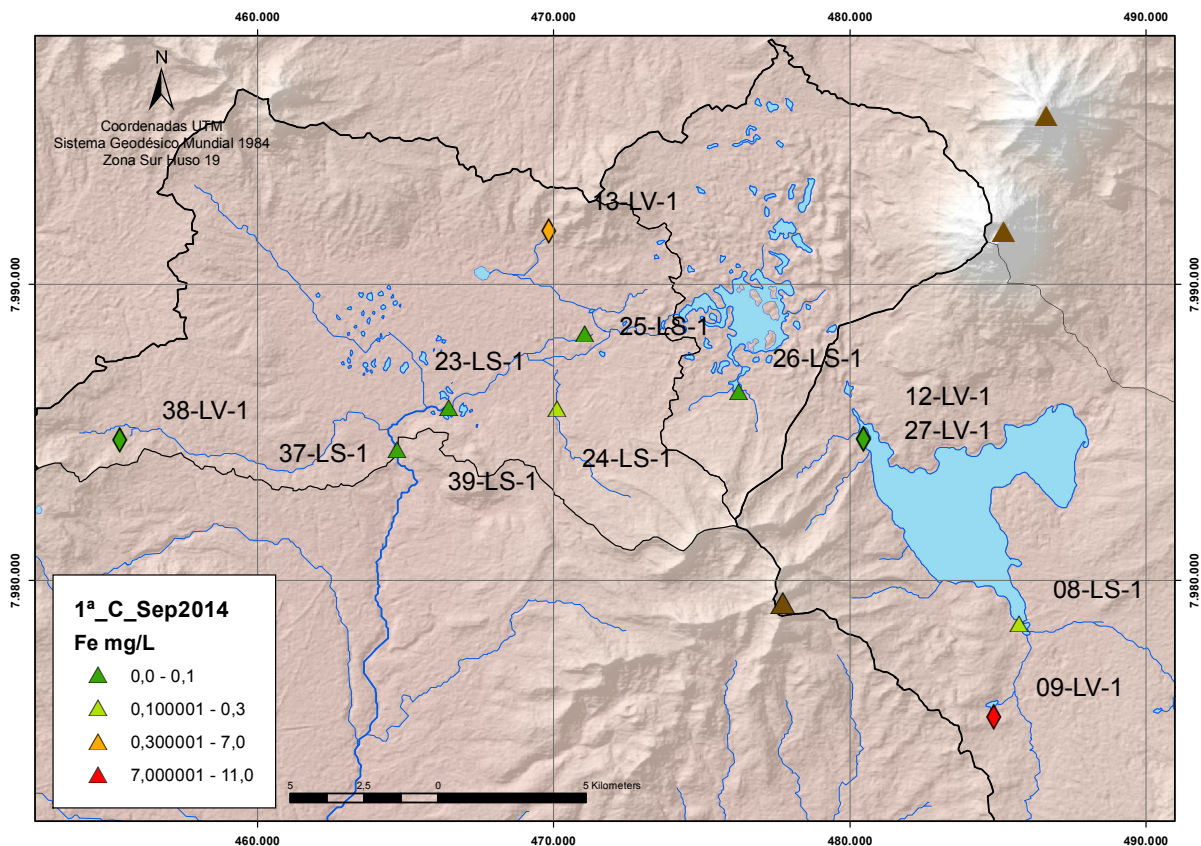


Figura 6-9. Mapa que muestra la concentración de Fe (mg/L) en los puntos de muestreo de la primera campaña de terreno, septiembre 2014. Fuente: elaboración propia.

6.3.3 CONCENTRACIÓN DE BORO

Todas las muestras recogidas en la primera campaña de terreno de septiembre 2014, tienen valores de concentración de boro por encima del límite establecido por la norma de calidad del agua potable de la Organización Mundial de la Salud (*OMS, 2008*): 0,5 mg/L., exceptuando la muestra tomada en el noroeste del lago Chungará (12-LV-1), Figura 6-10. Muy cerca de 1 mg/L se encuentran las aguas superficiales tomadas en el Sifón N°1 del canal Lauca (37-LS-1).

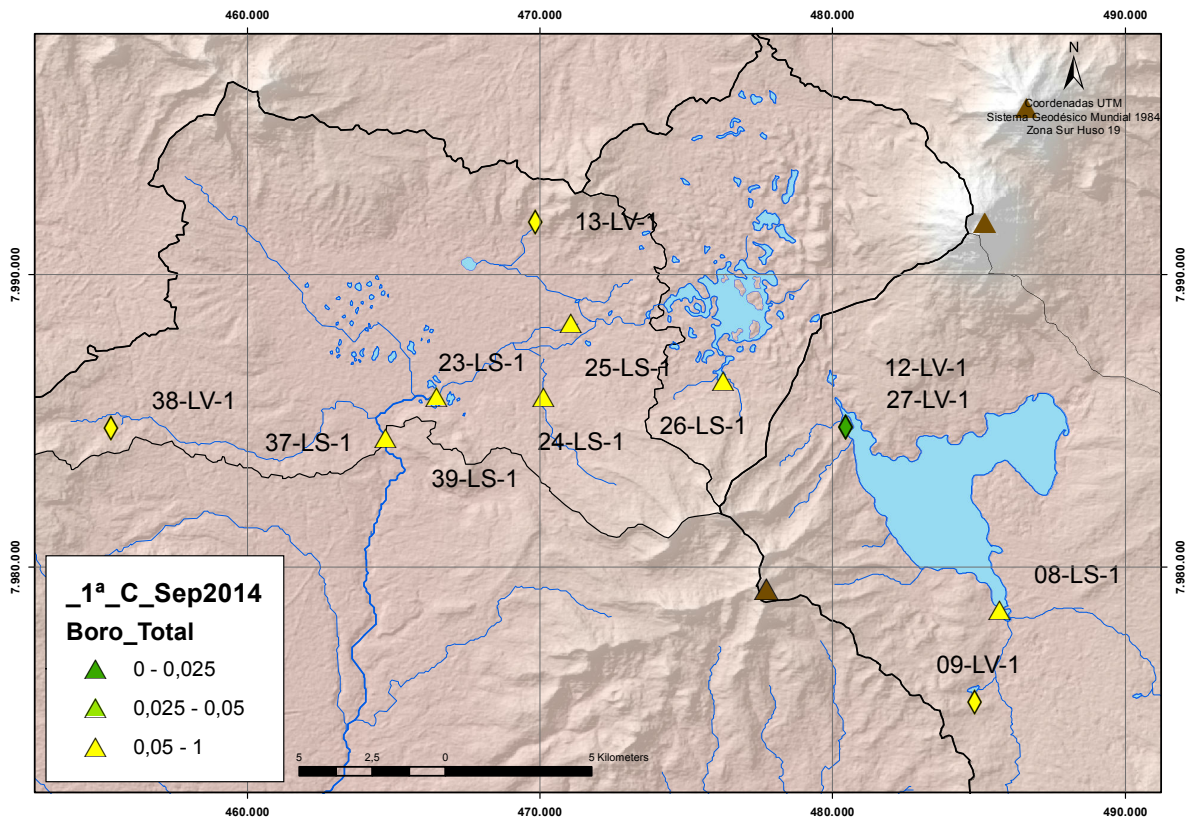


Figura 6-10. Mapa que muestra la concentración de B (mg/L) en los puntos de muestreo de la primera campaña de terreno, septiembre 2014. Fuente: elaboración propia.

6.4 MODELO HIDROQUÍMICO CONCEPTUAL

La caracterización y el análisis de la hidroquímica del agua superficial y subterránea de la cuenca es una herramienta para la contribución del diseño del modelo conceptual del sistema hídrico. La información preexistente junto a la recogida en el marco de este trabajo de tesis ha permitido construir un esquema conceptual que engloba las características hidroquímicas del lago Chungará, las lagunas de Cotacotani y las ciénagas de Parinacota.

La evolución química del agua depende de los minerales con los que entra en contacto y de la duración de dicha interacción, que a su vez depende de la velocidad del flujo subterráneo. Aunque las reacciones y procesos químicos que se desarrollan son muy variados, como norma general, se ha observado extensamente en la literatura que las aguas subterráneas con menor tiempo de residencia en el subsuelo son generalmente bicarbonatadas. A medida que estas interactúan durante un mayor periodo de tiempo la huella evoluciona, y se registra una predominancia del sulfato, y finalmente cuando las aguas subterráneas transitan durante mayores periodos de residencia se observa una huella clorurada.

Esta evolución química de las aguas subterráneas en función del tiempo de residencia e interacción química con el medio acuífero se conoce como secuencia de Chevotareb según Freeze, R. A. y Cherry, A. (1979). Esta evolución se debe a dos causas principales: solubilidad y abundancia. Es decir, el agua disuelve o altera los minerales que encuentra si tiene el tiempo suficiente para esto, hasta que alcanza el máximo marcado por la constante de equilibrio correspondiente, y ya no disolverá más ese mineral, y continuará disolviendo otros minerales con una constante más elevada, hasta que nuevamente alcance el equilibrio y así sucesivamente (Figura 6-11).

La solubilidad de los carbonatos es alta, y su límite de solubilidad es más bajo que la de los sulfatos. Los sulfatos a su vez, son más solubles que los cloruros, y de esta forma primero se alcanza el tope de solubilidad para los bicarbonatos, después raramente para los sulfatos, y finalmente para los cloruros. Casi nunca se alcanza el límite de solubilidad de los cloruros ya que la solubilidad de éstos es muy elevada.

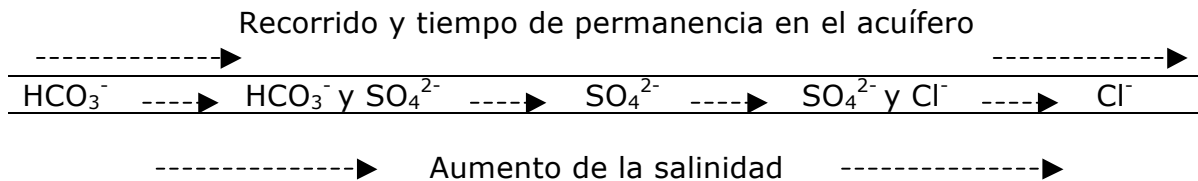


Figura 6-11. Secuencia de Chevotareb. Fuente: elaboración propia.

El factor de abundancia se refiere a la probabilidad de encontrar minerales que aporten bicarbonatos, sulfatos o cloruros (Freeze, R. A. y Cherry, A., 1979).

Por tanto, en las cuencas teóricamente se distinguen tres zonas en profundidad:

- Una zona superior, correspondiente a un flujo de agua subterránea con recorrido corto y tiempos de permanencia de años o decenas de años. Estas aguas tenderían a presentar una huella bicarbonatada y poco salina.
- Una zona intermedia, es un flujo menos activo, con recorridos más largos y tiempos de permanencia de cientos a miles de años. Son aguas sulfatadas y más salinas.
- Una zona inferior, es un flujo más lento, de largo recorrido y tiempos de permanencia de miles a millones de años. Estas aguas se caracterizan por presentar una salinidad elevada y ser cloruradas.

Por otro lado, las aguas de circulación regional tienden a ir aumentando su mineralización y progresivamente ir aumentando su saturación en los diferentes cationes. La secuencia de un agua "joven", de reciente infiltración,

es que sucesivamente vayan dominando los siguientes cationes $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+$ y después de un largo tiempo de residencia, se vaya invirtiendo a $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$ (Custodio y Llamas, 2001) (Figura 6-12).

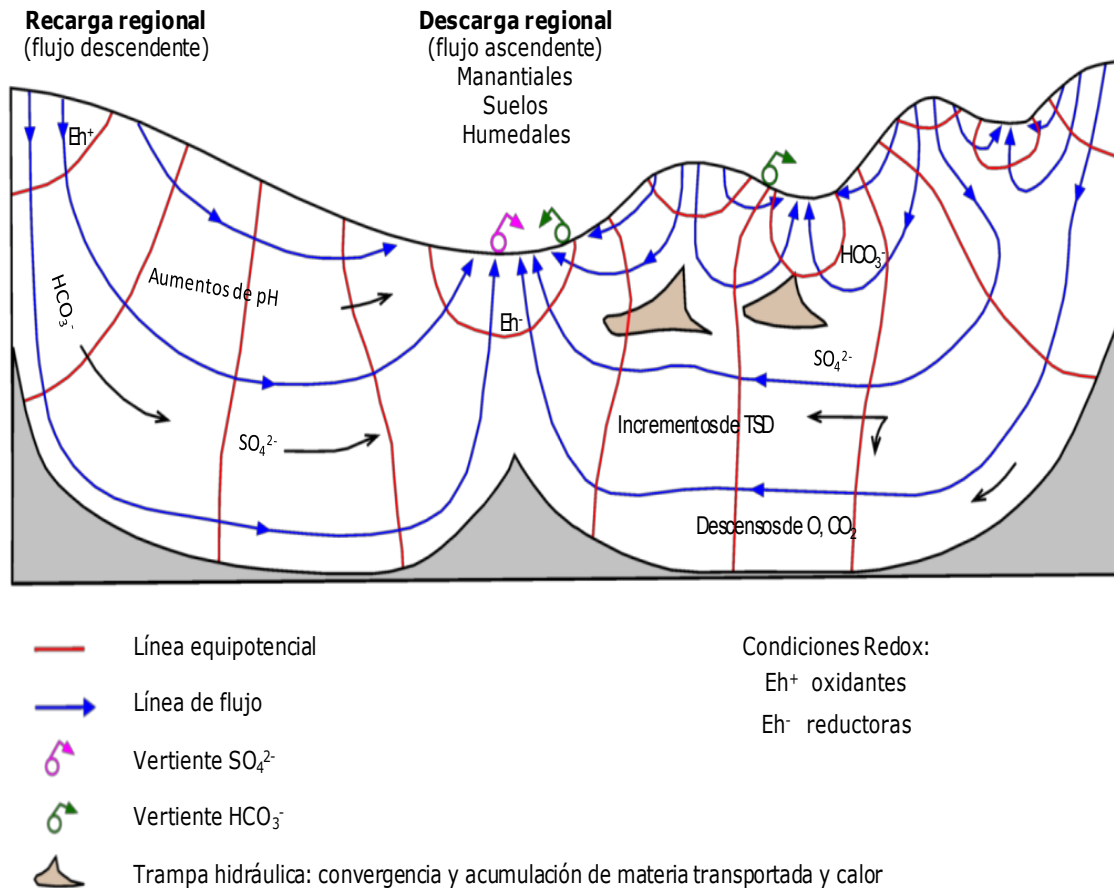


Figura 6-12. Relación del flujo con el transporte de solutos. Fuente: modificado de FCIHS, 2009.

6.4.1 SISTEMA

Se considera sistema al conjunto de masas de agua compuesto por el lago Chungará, las lagunas de Cotacotani y las ciénagas de Parinacota. A continuación, se analiza la evolución hidroquímica que sufren las aguas desde las vertientes y ríos que alimentan a este sistema a partir de los datos de la campaña de terreno y de la información preexistente, principalmente RISACHER (Risacher *et al.*, 1998), HERRERA (Herrera *et al.*, 2006) y DICTUC (DICTUC, 2009).

LAGO CHUNGARÁ

El lago Chungará se alimenta del río Chungará y de una serie de vertientes. Las vertientes Ajata, Mal Paso y Sopocolane, que nacen en el margen oriental del Complejo Volcánico Choquelimpie-Ajoja, son aguas bicarbonatadas cálcicas muy diluidas. Esta composición química indica que este complejo volcánico es

una zona de recarga y las aguas presentan poca evolución: son aguas jóvenes. Por otro lado, el río Chungará es sulfatado y más concentrado, debido a que nace en el volcán Guallatire y atraviesa rocas volcánicas cuaternarias. RISACHER (Risacher *et al.*, 1998) estima que el 25% de los aportes al lago Chungará provienen del río Chungará y el 75% restante de las vertientes occidentales. En la desembocadura del río Chungará en el lago las aguas son sulfatada-bicarbonatada-magnésico-cálcicas. Aunque el aporte de aguas sulfatadas sea mínimos, al ser más concentradas que las aguas diluidas bicarbonatadas, hace que el ión predominante sea el sulfato. A partir de los datos de DICTUC (DICTUC, 2009) se considera que las aguas del lago Chungará son sulfatada-magnésicas o sulfatada-bicarbonatada-magnésicas.

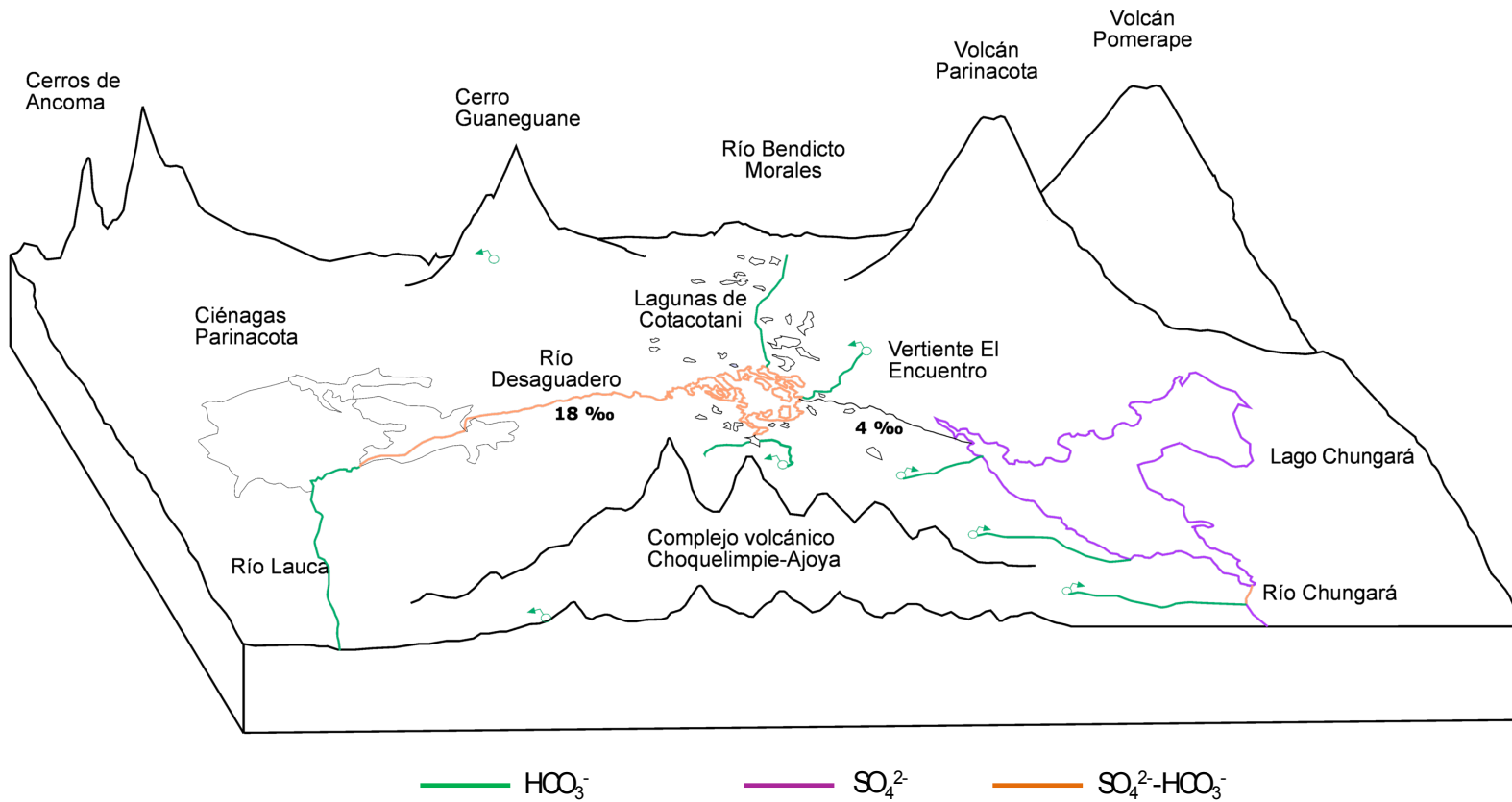
LAGUNAS COTACOTANI

Las lagunas de Cotacotani están constituidas por una laguna principal rodeada por pequeñas lagunas. Algunas lagunas pequeñas están conectadas a la laguna principal, pero otras no. Los mayores aportes superficiales que reciben las lagunas son el río Benedicto Morales, la vertiente El Encuentro, entre otras vertientes que existen en el volcán Parinacota y en el Complejo Volcánico Choquelimpie-Ajoya. Las aguas del río Benedicto Morales son bicarbonatadas, sin dominio de ningún catión en particular, mientras que el resto de vertientes son bicarbonatadas magnésicas. Por otro lado, las aguas de las lagunas de Cotacotani son sulfatada-bicarbonatada-magnésicas.

RÍO DESAGUADERO

El río Desaguadero es el cauce más importante entre las lagunas de Cotacotani y las ciénagas de Parinacota. Las aguas del río Desaguadero son similares a las aguas de las lagunas de Cotacotani.

En la Figura 6-13 se presenta un bloque diagrama esquemático del sistema con el objetivo de mostrar de un modo sencillo la evolución hidroquímica de las aguas superficiales. Las vertientes y el río Lauca se muestran de color verde por ser aguas bicarbonatadas, el nacimiento del río Chungará y el lago Chungará son de color morado para indicar que son aguas sulfatadas. El río Chungará en la desembocadura al lago Chungará y la mayoría de lagunas de Cotacotani son aguas sulfatadas-bicarbonatadas magnésicas.



‰ gradiente hidráulico entre las alturas de las superficies de agua libre

Figura 6-13. Bloque diagrama de la hidroquímica del sistema de las cuencas Chungará y Lauca. Fuente: elaboración propia.

7 MODELO HIDROLÓGICO

El modelo hidrológico es una representación matemática del sistema físico asociado a la cuenca hidrográfica y cada uno de los componentes del ciclo hidrológico. De esta manera este modelo ayuda a tomar decisiones en materia de hidrología, por lo que es necesario tener un conocimiento de entradas (inputs) y salidas (outputs) al sistema, para verificar si el modelo es representativo.

El modelo hidrológico para la cuenca se ha realizado a escala mensual a partir de los promedios de precipitaciones y caudales del periodo 1984-2013. En primer lugar, se realiza un análisis de la precipitación-caudal en cada subcuenca con el objetivo de elegir el tipo de modelo más apropiado para la cuenca. A continuación se describen las componentes del modelo y los parámetros de calibración. Finalmente se muestran los resultados del modelo calibrado para un año hidrológico promedio o normal, un año húmedo y un año seco.

7.1 ANÁLISIS CAUDAL-PRECIPITACIÓN

Se analizó la relación existente entre la precipitación y el caudal promedio anual de las subcuencas para el periodo 1984-2013. El objetivo de este análisis es conocer cómo responde el caudal a una determinada precipitación, para posteriormente elegir los parámetros adecuados del modelo. En la **Figura 7-1** se muestra la localización de las estaciones fluviométricas de la DGA que cierran cada subcuenca y que se analizan a continuación.

Las precipitaciones que se estudiaron corresponden a la precipitación promedio anual generada en cada subcuenca aportante. Asimismo, los caudales con los que se compararon las precipitaciones pertenecen al caudal generado en una subcuenca determinada. A continuación se analiza cada subcuenca de forma independiente y se describe la ecuación a partir de la que se obtuvieron los caudales en cada subcuenca (entradas y salidas en la subcuenca).

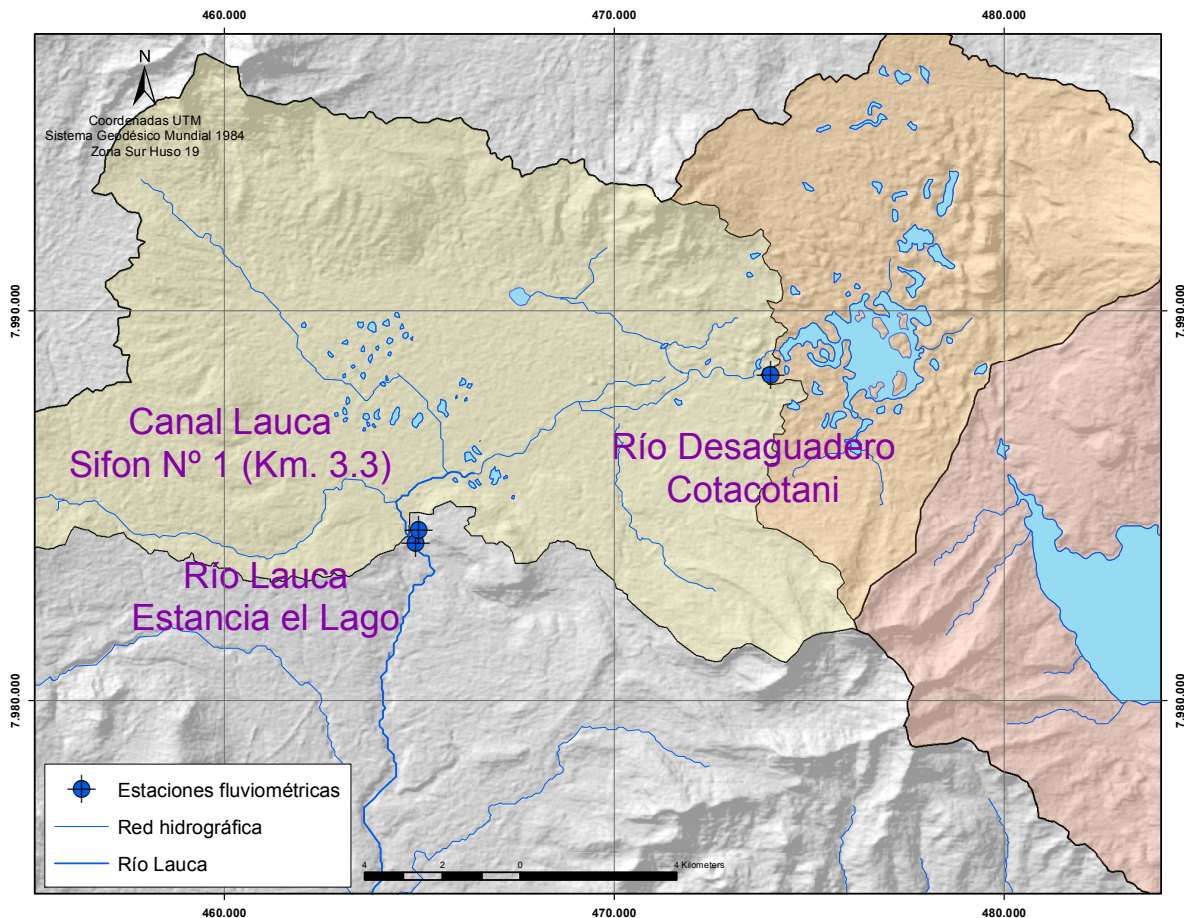


Figura 7-1. Estaciones fluviométricas y subcuencas de la cuenca del río Lauca. Fuente: elaboración propia.

7.1.1 RÍO DESAGUADERO EN COTACOTANI

La subcuenca del río Desaguadero en Cotacotani corresponde a la parte alta de la cuenca del río Lauca e incluye las lagunas de Cotacotani. La estación fluviométrica se encuentra en la salida de la laguna principal, aguas abajo de las compuertas que regulan el caudal de descarga del agua almacenada. Este punto corresponde al nacimiento del río Desaguadero.

En la **Figura 7-2** se muestra el caudal promedio mensual y la precipitación media mensual. El valor del caudal promedio anual aforado en la estación es de 400 L/s y la precipitación promedio anual en la subcuenca es de 1.382 L/s, lo que da una relación caudal/precipitación del 29%. Esta relación caudal/precipitación entrega una idea aproximada de la proporción de recursos hídricos que salen de la cuenca de forma superficial a partir de la precipitación. A esta salida ya se le han descontados los usos, evaporación y evapotranspiración, y agua que puede salir de la cuenca en forma de flujo subterráneo pasante. Por lo tanto, la relación caudal/precipitación entrega una medida de los recursos que recargan superficialmente el sistema, una medida "mínima" ya que no incorpora el flujo y recarga que puede estar saliendo de forma subterránea.

El régimen que se observa en la **Figura 7-2** obedece a la regulación de las compuertas situadas en la salida de la laguna principal, por lo que no se puede establecer ninguna relación natural entre los caudales y las precipitaciones. Los caudales disminuyen durante los meses de diciembre a marzo pertenecientes a la época de lluvias del invierno altiplánico, periodo en el que se cierran las compuertas para almacenar el agua en la laguna. Durante el resto del año los caudales dependen de las demandas.

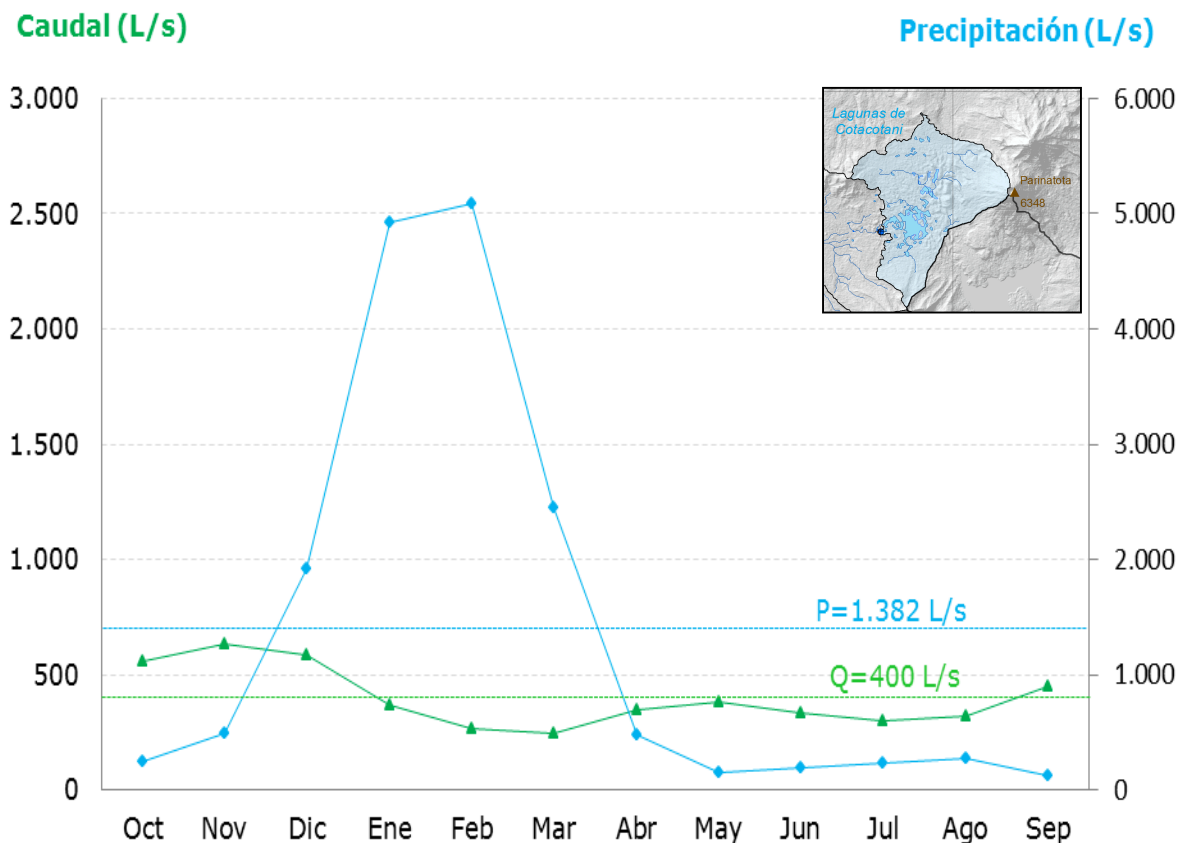


Figura 7-2. Relación caudal-precipitación en la subcuenca del río Desaguadero en Cotacotani (periodo 1984-2013). Fuente: elaboración propia.

7.1.2 RÍO LAUCA EN ESTANCIA EL LAGO

La subcuenca del río Lauca en Estancia el Lago comprende el área situada desde la estación Río Desaguadero en Cotacotani hasta la estación río Lauca en Estancia el Lago. Se encuentra a 400 metros aguas abajo de la estación Canal Lauca en Sifón N°1, la cual registra las extracciones del canal Lauca.

Los caudales que se muestran en la Figura 7-3 corresponden a un caudal restituido como la suma de las dos estaciones: Río Lauca en Estancia el Lago y Canal Lauca en Sifón N° 1. Para mostrar únicamente el caudal generado en esta subcuenca se restó el caudal registrado en la estación Río Desaguadero en Cotacotani (**Ecuación 7-1**).

$$Q_{\text{Subcuenca Río Lauca en Estancia el Lago}} = Q_3 + Q_2 - Q_1$$

Ecuación 7-1

Donde,

Q_3 : caudal promedio de la estación Río Lauca en Estancia el Lago [L/s].

Q_2 : caudal promedio de la estación Canal Lauca en Sifón N°1 [L/s].

Q_1 : caudal promedio de la estación Río Desaguadero en Cotacotani [L/s].

El valor del caudal promedio anual es de 525 L/s y el de la precipitación media anual de 2.660 L/s, lo que da una relación caudal-precipitación del 20%.

En esta subcuenca se observa que ambas series mensuales tienen la misma forma pero con un desfase aproximado de un mes. Para conocer exactamente la influencia de la precipitación sobre el caudal se realizó una correlación cruzada entre ambas variables.

En la **Figura 7-4 (izquierda)** se corrobora que el desfase del caudal respecto a la precipitación es de un mes, ya que la máxima correlación se obtiene en el primer mes y tiene un valor de 0,93. Este buen paralelismo indica que las precipitaciones producen la respuesta de escorrentía con un retardo de un mes. Además, durante el segundo mes también influye, ya que el coeficiente de correlación muestra un valor de 0,5.

En la **Figura 7-4 (derecha)** se realizó la autocorrelación de los caudales medios mensuales. El objetivo de este análisis es determinar cómo influyen los caudales del pasado en los caudales del futuro (memoria que guarda la serie). En este caso se obtuvo una autocorrelación de 0,65 para el primer mes, lo que significa que el caudal del "mes n" afectará al caudal producido durante el "mes n+1". En el "mes n+2" ya no tendrá influencia, ya que la autocorrelación en el mes 2 tiene un valor de cero.

Caudal (L/s)

Precipitación (L/s)

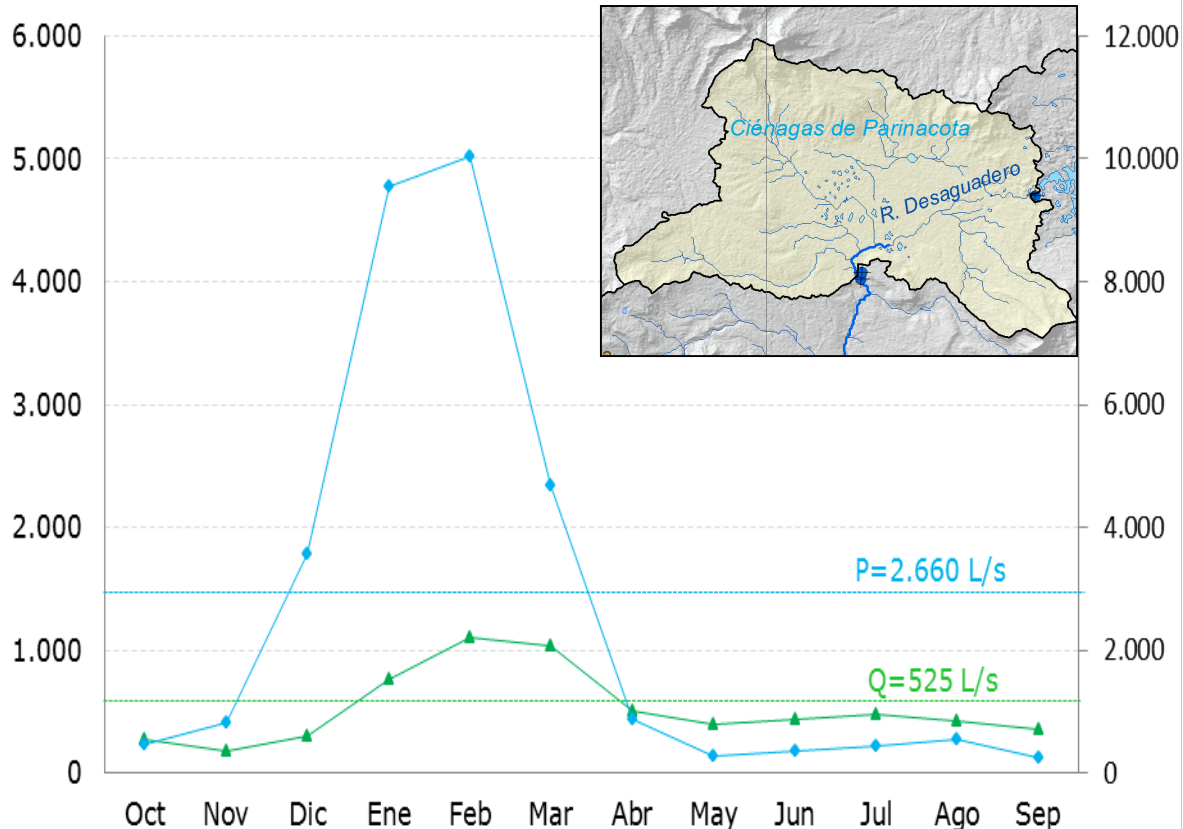


Figura 7-3. Relación caudal-precipitación en la subcuenca del río Lauca en Estancia el lago (periodo 1984-2013). Fuente: elaboración propia.

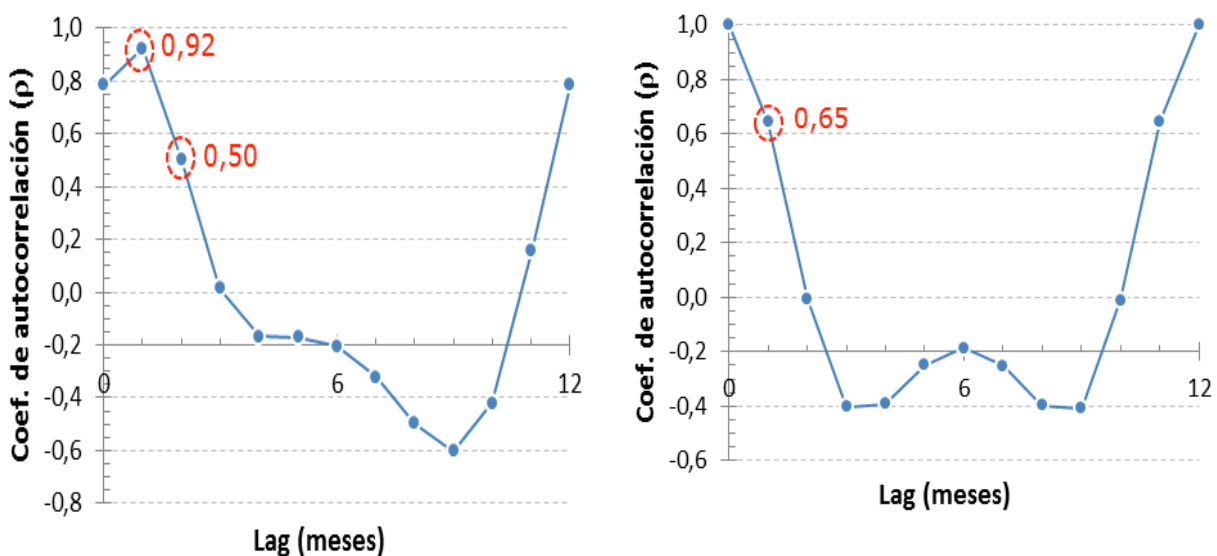


Figura 7-4. Izquierda: correlación cruzada entre la precipitación y el caudal medio mensual en la subcuenca del Río Lauca en Estancia el Lago (periodo 1984-2013). Derecha: autocorrelación del caudal promedio mensual en la subcuenca del Río Lauca en Estancia el Lago (periodo 1984-2013) Fuente: elaboración propia.

7.1.3 CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS

El análisis de la relación entre la precipitación y el caudal superficial generado en cada subcuenca permitió concluir que las variaciones del caudal del río Lauca tienen una buena correlación con la variación de las precipitaciones ahí donde la escorrentía no se encuentra regulada. También se determinó que las lluvias tienen un efecto directo sobre los caudales superficiales, en donde los máximos se relacionan entre sí con un desfase de un mes.

En esta sección se analizó el comportamiento de forma individual de cada subcuenca y el modelo que se expone a continuación se realizó a nivel de cuenca, utilizando los promedios de los datos del periodo 1984-2013:

- La variable precipitación corresponde a la suma de todas las precipitaciones de las subcuencas.
- La variable caudal corresponde a los promedios de caudales mensuales registrados

De esta forma, la precipitación media anual calculada del SHPC es de 4042 L/s y el caudal promedio anual es de 925 L/s, lo que da una relación caudal-precipitación de 23%. El caudal base calculado a partir de los meses con caudal mínimo (septiembre-diciembre) es de aproximadamente 700 L/s.

8 MODELO CONCEPTUAL

La modelación conceptual es la pieza más importante en un estudio hidrogeológico, puesto que es un reflejo del conocimiento integrado de todos los demás aspectos hídricos de la cuenca. En este sentido, representa la base sobre la que se cimienta una posterior modelación numérica. De esta forma, la calidad y representatividad de todo modelo numérico reside en la solidez del modelo conceptual.

A partir de los antecedentes generados en los puntos anteriores se procede a desarrollar el modelo conceptual del acuífero mediante la integración de: geología, hidrogeología, hidrología e hidroquímica. El desarrollo del modelo conceptual se realiza a través de una serie de fases interdependientes que incluyen la recolección de datos en el terreno y su análisis, la presentación de los resultados y posterior visualización, todo esto presentado en los capítulos anteriores.

A continuación se describen los dominios hidrogeológicos, la relación con el sistema estructural que condiciona la cuenca y los cortes hidrogeológicos realizados. Por último, se analiza el grado de conexión hidrogeológica subterránea con el sector del lago Chungará.

8.1 DOMINIOS HIDROGEOLÓGICOS

El modelo conceptual del funcionamiento de los acuíferos se confecciona a partir de la información hidrológica/hidrogeológica, hidroquímica y geofísica recopilada y generada, junto con las características físicas de la cuenca, de forma que el modelo logra reflejar la realidad del sistema hidrológico integrado con el sistema hidrogeológico. Se presenta un modelo conceptual mediante el despliegue de dos perfiles longitudinales a los cursos fluviales para el sectores hidrogeológicos en los que se dividió el SHPC (Figura 8-1).

Las lagunas de Cotacotani están situadas en la cabecera de la cuenca del río Lauca, su punto más alto se encuentra en el volcán Parinacota (6.348 msnm), al sureste limita con la cuenca del lago Chungará y al norte con la cuenca de Caquena. Este sector se ha dividido hidrológicamente en dos subcuencas: subcuenca río Desaguadero en Cotacotani y subcuenca Río Lauca en Estancia el Lago, porque existen dos estaciones de aforo de la DGA en la salida de cada subcuenca.

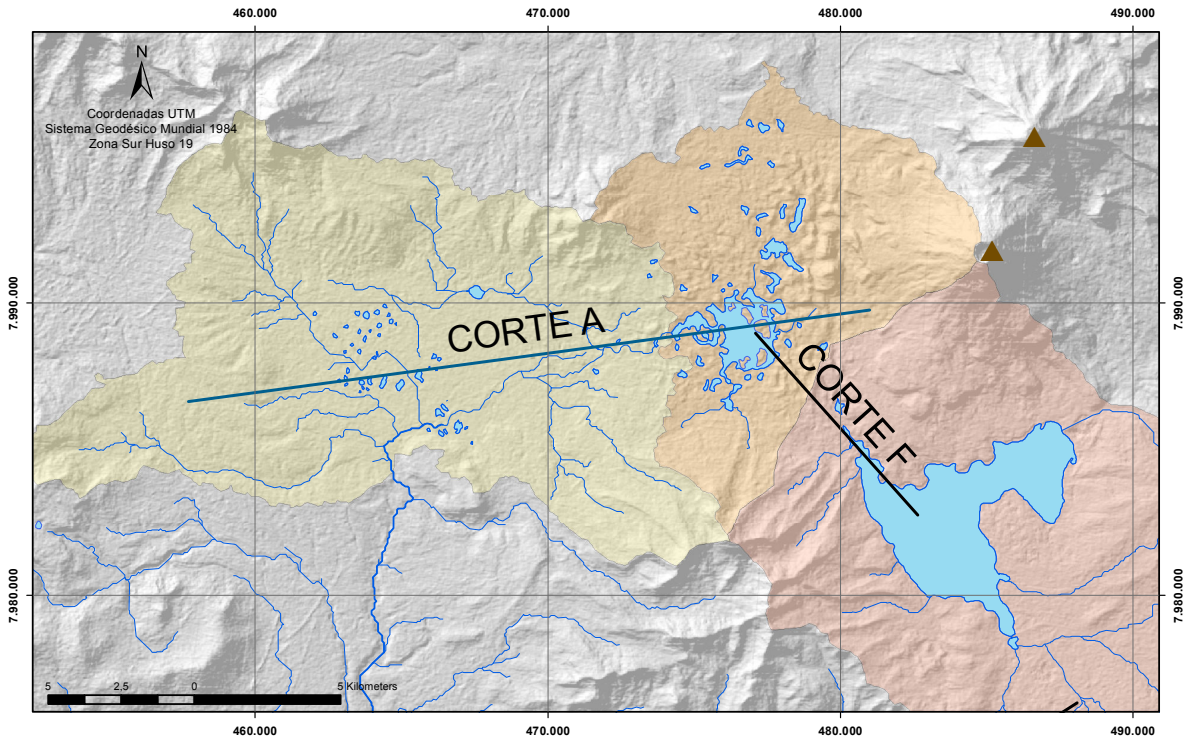


Figura 8-1. Mapa de la ubicación de los perfiles hidrogeológicos del modelo conceptual. Fuente: elaboración propia.

La principal componente de entrada al SHPC es la precipitación. En la subcuenca del río Desaguadero en Cotacotani la entrada media anual calculada por precipitación en la subcuenca asciende a 1.382 L/s, y en la subcuenca del Río Lauca en Estancia el Lago es de 2.660 L/s. Por lo tanto, la entrada total por precipitación en este sector es de 4.042 L/s. Cabe destacar que en este sector existen derechos otorgados de aguas superficiales, sin embargo esta componente no es significativa a nivel de cuenca ya que el agua que se toma de las vertientes vuelve al sistema por riego de los bofedales para alimentar el ganado o por desecho después de su uso doméstico.

Por otro lado, las componentes de salida serían la evapotranspiración desde los bofedales, la evaporación desde los cuerpos de agua que componen este sistema y las salidas superficiales incluyendo el canal Lauca. La estación de aforo en el río Desaguadero registra un caudal promedio anual de 400 L/s, el canal Lauca en la bocatoma desvía un caudal promedio de 750 L/s y la estación Río Lauca en Estancia el Lago (después de la bocatoma del canal) registra un caudal promedio de 160 L/s.

La laguna principal de Cotacotani recibe aportes superficiales desde el río Benedicto Morales, situado al noreste junto con una serie de vertientes, entre las que destaca la vertiente El Encuentro al este. Además, recibe también un aporte subterráneo desde el lago Chungará que se estima de acuerdo a por HERRERA *et al.* (Herrera *et al.*, 2006) de 250 L/s. La salida superficial más importante desde las lagunas de Cotacotani es el río Desaguadero, el cual

alimenta a las ciénagas de Parinacota. Sin embargo, el alto gradiente topográfico (18‰) origina numerosas vertientes difusas en los depósitos de avalancha que limitan las lagunas con las ciénagas.

Es importante citar que el río Desaguadero está regulado por unas compuertas, y que en el nacimiento del río Lauca el canal Lauca desvía el agua superficial del río para el abastecimiento del valle de Azapa. El caudal promedio anual del canal Lauca es de 764 L/s (periodo 1984-2013).

En este sector, la unidad acuífera principal es la UH1, constituida por los depósitos de avalancha, la Formación Lauca de facies de detríticas y por la Formación Lupica, OMI (d). A partir de la prospección geofísica realizada se observa una zona no saturada en las partes más altas de hasta 50 m de espesor. Por otro lado, en esta geofísica no se detectó el basamento en la zona central de este sector, implicando que el acuífero UH1 presenta al menos un espesor de 300 m. Los depósitos palustres cubiertos por los bofedales de Parinacota (UH3) cubren esta unidad en la parte central del sector. En la parte occidental y sur del sector existe la ignimbrita Lauca (UH4) que semiconfina la parte inferior de la Formación Lauca y la Formación Lupica (d) causando así la formación de un acuífero inferior semiconfinado que se extiende también aguas abajo el sector del Lauca Alto.

La unidad acuífera UH1 es alimentada principalmente de 3 fuentes de agua. Por un lado, la precipitación que infiltra el suelo hasta el acuífero y, por otro lado la escorrentía superficial y subterránea. La escorrentía superficial procede de vertientes y del río Benedicto. Las vertientes generalmente se originan por acuíferos colgados en unidades acuíferas UH2 cuando el flujo subterráneo intercepta niveles más impermeables en las laderas de las zonas de recarga (Parinacota y Choquelimpie). Por otro lado, se produce escorrentía subterránea desde el lago Chungará con aguas más cargadas químicamente y desde las fracturas de los volcanes que rodean este sector con aguas más frescas. Por lo tanto, el flujo subterráneo en este sector tiene dos componentes, uno desde el sistema lago Chungará-lagunas de Cotacotani-ciénagas de Parinacota y otro desde las cotas más altas hacia los cuerpos de agua superficiales (**Figura 8-2**).

Desde el punto de vista hidroquímico se identifica una evolución y mezcla entre vertientes, lagunas de Cotacotani y las ciénagas de Parinacota. Las aguas del río Benedicto Morales son bicarbonatadas, sin dominio de ningún catión, mientras que el resto de vertientes son bicarbonatadas magnésicas. Por otro lado, las aguas de las lagunas de Cotacotani y del río Desaguadero son similares, sulfatadas-bicarbonatadas magnésicas con concentración relativamente alta de elementos mayores, pH alcalino y conductividad entre 700-500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Después de atravesar las ciénagas de Parinacota, en la bocatoma, las aguas son bicarbonatadas sódico-cálcicas debido al aporte de agua dulce y bicarbonatada de las vertientes. Las aguas superficiales se caracterizan por

tener valores de pH y conductividad eléctrica más altos que las aguas de las vertientes.

En la bocatoma del canal Lauca se desvía prácticamente la totalidad del caudal río Lauca para el abastecimiento del valle Azapa. A partir de este punto el río Lauca se alimenta únicamente de las aguas bicarbonatadas del acuífero superior de la Formación Lauca.

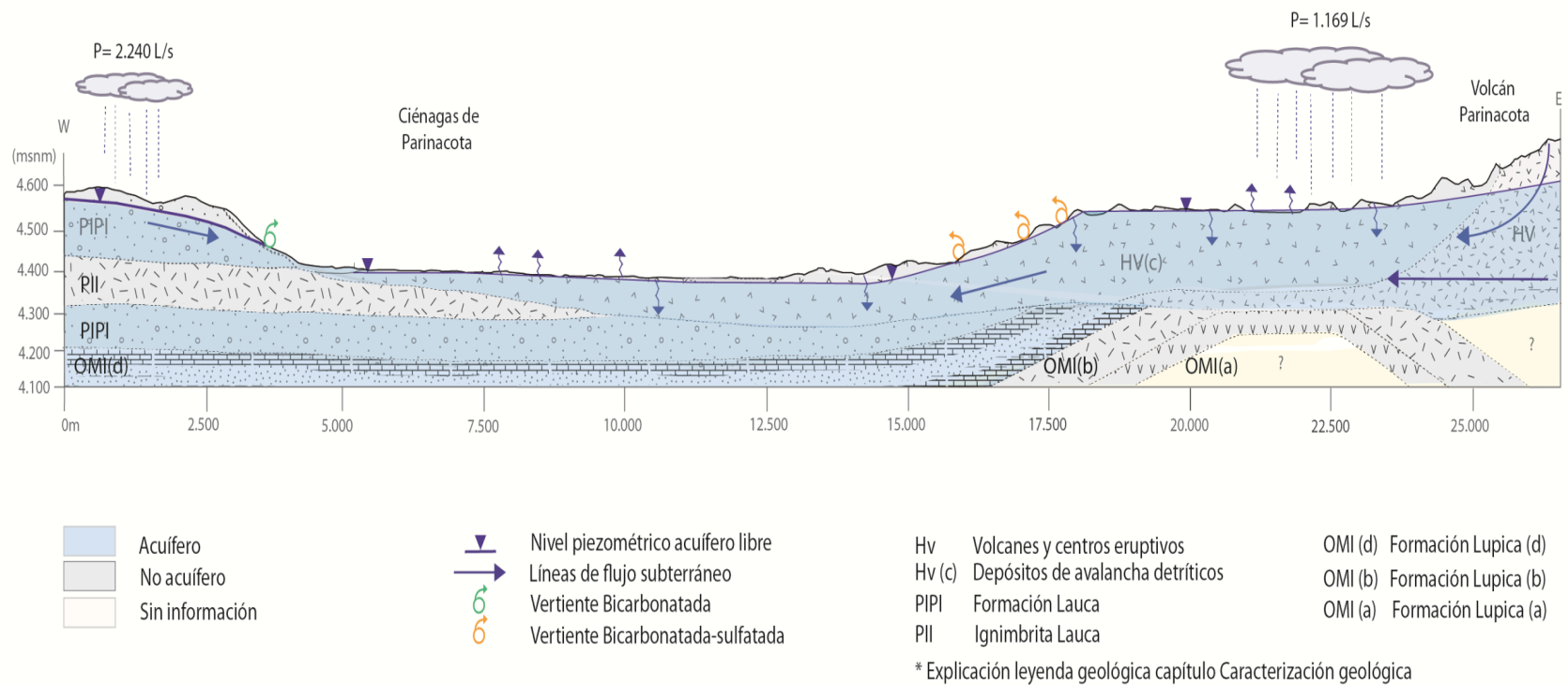


Figura 8-2. Perfil hidrogeológico A del sector ciénagas de Parinacota – lagunas de Cotacotani. Fuente: elaboración propia.

SECTOR CHUNGARÁ – COTACOTANI

La posible conexión entre las lagunas de Chungará y Cotacotani es la única que ha sido estudiada con antelación en la zona. HERRERA *et al.* (Herrera *et al.*, 2006) realizaron análisis con el fin de comprobar la posible conexión. Geomorfológicamente, ambas masas de agua están separadas aproximadamente 4,5 km por una divisoria de aguas que se eleva escasos 50 m por encima del lago Chungará. El lago Chungará se encuentra a 4.561 m.s.n.m. y la laguna de Cotacotani a 4.543 m.s.n.m. generando un gradiente que, existiendo conexión hidráulica tendría un valor de 4‰, siendo un valor razonable para una zona de alta montaña. En superficie, las dos masas de agua están separadas por una serie de depósitos de brechas (unidad UH1, Acuífero detrítico) originados por el colapso del volcán Parinacota que conforman el lugar donde se asientan las lagunas de Cotacotani. El lago Chungará se encuentra en el contacto entre esta formación y la formación Pv (c) identificada como UH1 (Acuífero detrítico). Además en el sector sur del lago también se observa que afloran depósitos glaciales (Qg) y la unidad OMI (b) de la formación Lupica.

RISACHER (Risacher, 1999) realizó un balance hídrico del lago Chungará mediante cloruros en el que a partir de la evaporación potencial, las precipitaciones, superficie del lago, [CI] de los aportes, [CI] en el lago, obtuvo una infiltración desde el lago Chungará de 32 l/s (5% de los aportes). También realizó el mismo cálculo para las lagunas de Cotacotani, en este caso argumentó que las pérdidas por infiltración no debían ser muy importantes.

HERRERA *et al.* (Herrera *et al.*, 2006) realizó un estudio isotópico en el que defiende una conexión entre cuencas. Según el balance de masas con $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ un 58% del volumen de agua que alimenta las lagunas de Cotacotani proviene del lago Chungará. No obstante, los cálculos presentados por HERRERA *et al.* (Herrera *et al.*, 2006) se basan en la hipótesis que la evaporación en las lagunas de Cotacotani es despreciable, lo cual inicialmente no parece razonable ya que existe bastante evidencia para confirmar lo contrario.

Con esto, el autor argumentó que las lagunas de Cotacotani eran el resultado de la mezcla entre los aportes del lago Chungará y las vertientes que provienen del volcán estimando que el 58% de los aportes que alimentan las lagunas de Cotacotani provienen del lago Chungará y el resto de vertientes. A partir de la proporción de mezcla calculada realizó un balance en la laguna y estimó que el caudal aportante por el lago era de 250 L/s.

Por último durante el proyecto se realizó un perfil TEM que se interpretó hidrogeológicamente en la **Figura 8-4**, en donde se distinguieron dos unidades acuíferas separadas por un nivel confinante.

El acuífero superior formado por depósitos de brechas del holoceno, se define como un acuífero detrítico de tipo UH1 de espesor reducido. Esta unidad se comportaría como unidad conectora entre las dos lagunas.

El acuífero inferior está formado por depósitos de avalancha de detritos Pv (c). Se trata de un acuífero detrítico de tipo UH1, con porosidad primaria y un espesor aproximado de 125 m. Está separado del acuífero superior por un acuitardo (UH3) formado por depósitos glaciales que actúa como nivel confinante.

Tanto el acuífero superior como el inferior recibirían agua desde el lago Chungará y esta se transmite en sentido E-W. En el acuífero superior, dada la diferencia de cota entre las dos masas de aguas, el nivel freático tendría un gradiente de aproximadamente 4‰ con un flujo que iría desde el lago Chungará hacia las lagunas de Cotacotani. El acuífero inferior tendría como referente piezométrico el nivel del lago Chungará.

Bajo las lagunas de Cotacotani, una falla atravesaría esta unidad confinante conectando ambos acuíferos. Se desconoce cuál es la relación de alturas piezométricas entre ambos acuíferos en este punto., por tanto, no es posible estimar en qué sentido se produciría el flujo vertical entre las unidades acuíferas.

Como conclusión, RISACHER (Risacher, 1999) a partir de un balance de cloruros propone que en el lago Chungará parte del agua se infiltra (32 l/s) y que no sucede lo mismo en las lagunas de Cotacotani. HERRERA *et al.* (Herrera *et al.*, 2006) a partir de isótopos estima que el agua de Cotacotani son el resultado del aporte de las vertientes (42%) y del lago Chungará (58%). No obstante, ya hemos señalado que no necesariamente los valores isotópicos de las muestras de Cotacotani deben responder a una mezcla de aguas.

Por último, el perfil TEM muestra una conexión entre cuencas a través de un acuífero superior formado por depósitos de brechas. Por debajo de este y separado por un acuitardo, se observa un acuífero confinado el cual podría estar conectado con el acuífero superior a través de una falla fácilmente visible en el perfil TEM.

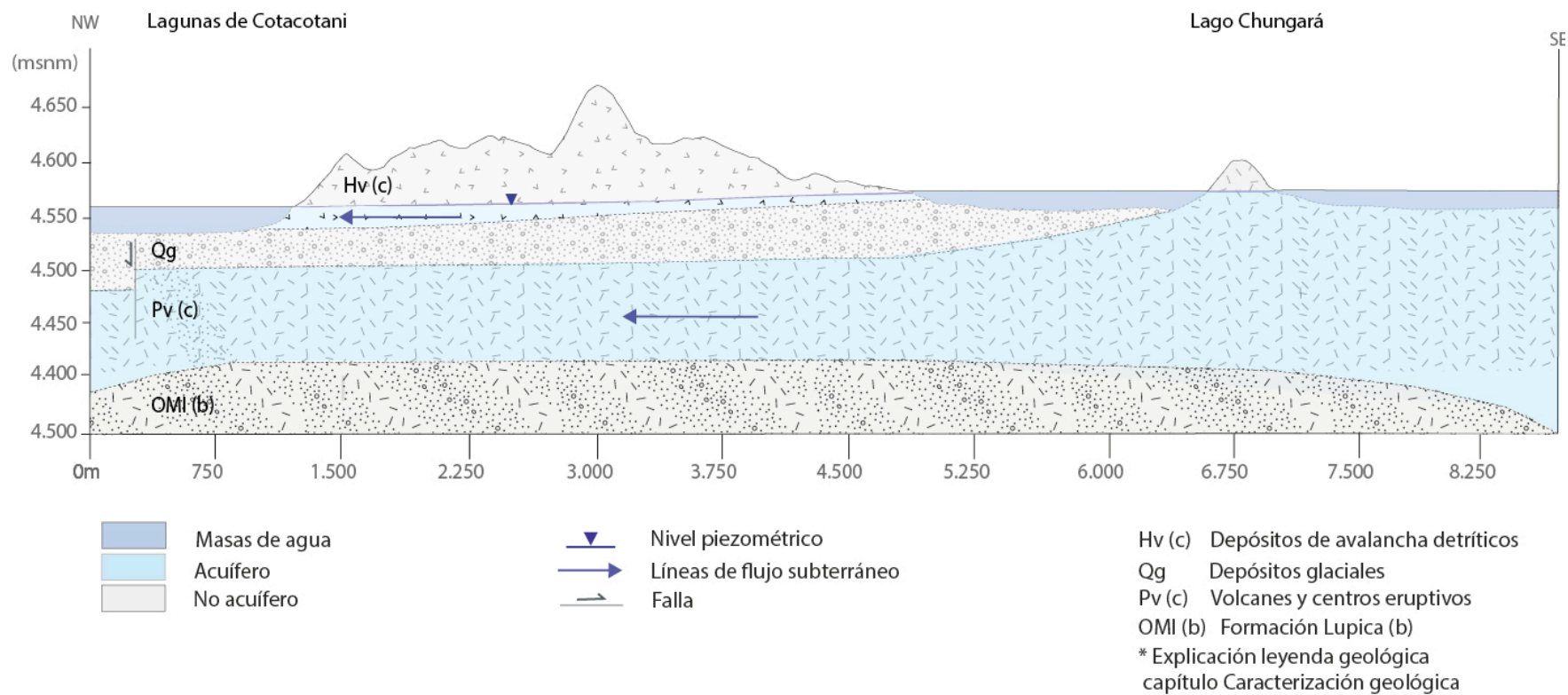


Figura 8-4. Perfil hidrogeológico del sector lago Chungará - lagunas de Cotacotani. Fuente: elaboración propia.

SECTOR CHUNGARÁ - CHIRIGUAYA

El sector Chiriguaya se encuentra al suroeste de la cuenca del lago Chungará y al este de la cuenca del Lauca. Se trata de un portezuelo de 4.800 m que separa ambas cuencas donde se observan manifestaciones hidrotermales como es el caso de las termas que dan nombre al sector. En este sector, no se conocen antecedentes que hablen de posible conexión y la única información disponible es un perfil TEM ejecutado por Matraz (sin publicar).

Como se observa en la interpretación hidrogeológica presentada en la **Figura 8-5**, la formación OMI (a) predominaría, siendo una formación acuífera (UH1 ó UH2) presente en ambas cuencas. No podemos hablar de conexión entre cuencas ya que no existiría un gradiente hidráulico entre ellas. Actualmente, se observa una divisoria de aguas subterránea que evita que el agua se desplace desde una a otra, no obstante al tratarse de un sistema en equilibrio transiente, éste podría variar con el tiempo. No existiría una barrera impermeable que las aísle.

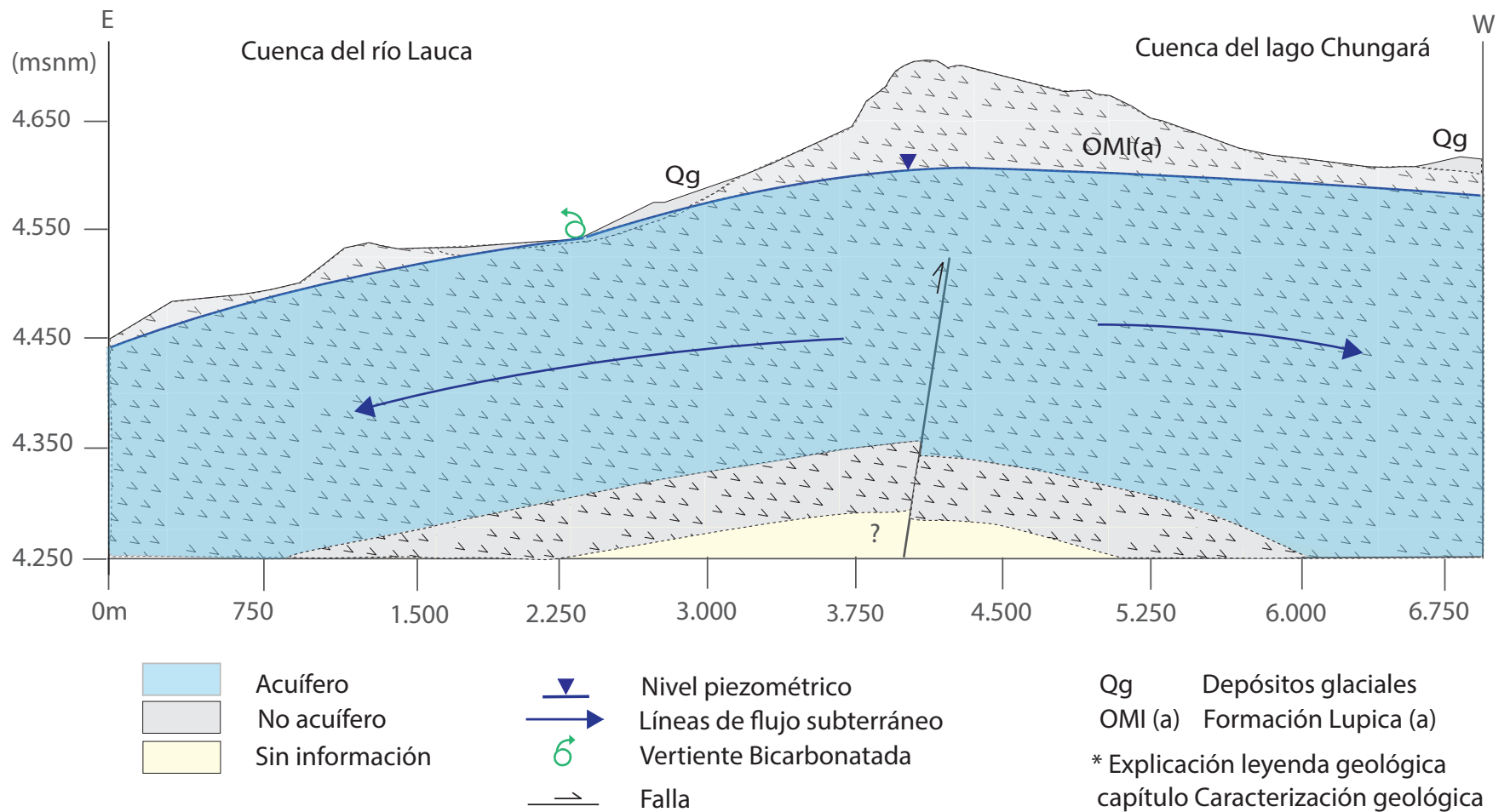


Figura 8-5. Perfil hidrogeológico del sector lago Chungará - Chiriguaya. Fuente: elaboración propia.

9 CONCLUSIONES

El objetivo general de la memoria es el levantamiento de información hidrogeológica, hidroquímica y el desarrollo de un modelo conceptual, tanto superficial como subterráneo de la zona denominada SHPC.

La región de Arica y Parinacota se caracteriza por ser una zona de extrema aridez. La distribución temporal de las lluvias responde al régimen de precipitaciones provenientes del invierno altiplánico, por tanto los caudales de los cursos superficiales son mayores entre los meses de diciembre a marzo coincidiendo con el invierno altiplánico. Se calculó la precipitación media anual en las cuencas y subcuencas de estudio para el periodo 1984-2013. La cuenca que muestra mayor precipitación es la cuenca del lago Chungará, con valor de 369 mm anuales (3.225 L/s). La subcuenca situada en la cabecera del río Lauca corresponde a la subcuenca de Cotacotani, la entrada por precipitación en esta subcuenca asciende a 1.382 L/s. Aguas abajo se encuentra la subcuenca del río Lauca en Estancia el Lago en la que la precipitación media anual calculada es de 2.660 L/s.

La salida del sistema por flujo superficial corresponde al caudal promedio anual aforado en la salida de la cuenca. El caudal promedio anual es de 400 L/s en la estación de aforo Río Desaguadero en Cotacotani, 160 L/s en la estación Río Lauca en Estancia el Lago, 764 L/s en la estación Canal Lauca en Sifón nº 1. El río Lauca muestra un régimen pluvial.

El caudal del canal Lauca-Azapa está regularizado mediante la Resolución DGA Nº 320 y 450. Sin embargo, el caudal de salida considerado en el balance corresponde al promedio registrado en la estación Canal Lauca en Sifón Nº1 durante el periodo 1984-2013, que equivale a un caudal de 764 L/s.

Por otro lado, se ha llevado a cabo un modelo hidrológico a escala mensual a partir de los promedios de precipitaciones y caudales del periodo 1984-2013. El análisis de la relación entre la precipitación y el caudal superficial generado en cada subcuenca permitió concluir que las variaciones del caudal del río Lauca tienen una buena correlación con la variación de las precipitaciones, ahí donde la escorrentía no se encuentra regulada. También se determinó que las lluvias tienen un efecto directo sobre los caudales superficiales, en donde los máximos se relacionan entre sí con un desfase de un mes.

Desde el punto de vista geológico, la cuenca hidrográfica se enclava en una cuenca tectónica sedimentaria tipo antepaís en la zona central del orógeno andino. Esta cuenca se encuentra controlada por los sistemas estructurales y movimientos tectónicos. La geología estructural existente define y condiciona la formación y geometría de los cuerpos acuíferos. Así como también la forma en que se disponen los drenajes superficiales activos. Todo lo anterior, modela al sistema de unidades hidrogeológicas y su relación con el ciclo hidrológico imperante. Asimismo, la litología presente afecta y marca la hidroquímica del agua que transita por los acuíferos. La composición litológica, su competencia

reológica, y su estado estructural, son las variables principales que controlan la permeabilidad de las unidades presentes, facilitando o dificultando el flujo de las aguas subterráneas y la dinámica con los cursos de agua superficial.

En la cuenca de estudio se han identificado 4 unidades hidrogeológicas:

- La UH1 son acuíferos en depósitos sedimentarios,
- La unidad UH2 corresponde con los acuíferos en roca muy fracturada,
- La UH3 es un acuitardo de porosidad primaria,
- La unidad UH4 es un acuitardo en roca fracturada,
- La UH5 es una roca casi impermeable.

Estas unidades pueden aparecer en distintas zonas de la cuenca. En cada zona en donde aparecen pueden mostrar un comportamiento particular, ya que han sido afectadas por eventos singulares.

En el SHPC, la unidad acuífera principal es la UH1. A partir de la prospección geofísica realizada se observa una zona no saturada en las partes más altas de hasta 50 m de espesor pero no se detectó el basamento en la zona central de este sector, implicando que el acuífero UH1 presenta al menos un espesor de 300 m. Los depósitos palustres cubiertos por los bofedales de Parinacota (UH3) cubren esta unidad en la parte central del sector. En la parte occidental y sur del sector existe la ignimbrita Lauca (UH4) que semiconfina la parte inferior de UH1 causando así la formación de un acuífero inferior semiconfinado. La unidad acuífera UH1 es alimentada principalmente de 3 fuentes de agua:

- La precipitación que infiltra el suelo hasta el acuífero.
- La escorrentía superficial: La escorrentía superficial procede de vertientes y del río Benedicto. Las vertientes generalmente se originan por acuíferos colgados en unidades acuíferas UH2 cuando el flujo subterráneo intercepta niveles más impermeables en las laderas de las zonas de recarga (Parinacota y Choquelimpie).
- La escorrentía subterránea: Se produce escorrentía subterránea desde el lago Chungará con aguas más cargadas químicamente y desde las fracturas de los volcanes que rodean este sector con aguas más frescas. Por lo tanto, el flujo subterráneo en este sector tiene dos componentes: uno desde el sistema lago Chungará-lagunas de Cotacotani-ciénagas de Parinacota y otro desde las cotas más altas hacia los cuerpos de agua superficiales.

En la cuenca las aguas subterráneas tienen dos direcciones de flujo desde las cotas más altas de los cerros que bordean la cuenca hacia las cotas más bajas:

la componente principal tiene una dirección de flujo subterráneo E-O y la componente secundaria NE-SW y NW-SE.

Hidroquímicamente se ha observado que en la cuenca del río Lauca las aguas son de composición bicarbonatada. Esto evidencia una escasa evolución química del agua subterránea, mostrando un bajo contenido salino y un predominio mayoritario del ión bicarbonato. Por lo tanto, se puede concluir que las aguas subterráneas del área de estudio son relativamente jóvenes.

Las aguas bicarbonatadas cálcicas se suelen asociar a zonas de recarga in-situ. Las aguas con mayor salinidad y predominio del ión sulfato son aguas subterráneas con mayor evolución que las aguas bicarbonatadas, es decir, con mayor recorrido y/o tiempo de residencia. A medida que las aguas fluyen por los acuíferos o cauces superficiales se van incorporando elementos de los estratos geológicos que atraviesan, esto provoca que la concentración de elementos mayoritarios aumente, y su quimismo evolucione a aguas sulfatadas cálcicas o magnésicas.

El contenido de arsénico y boro presente en algunas muestras de la cuenca, se debe principalmente al carácter volcánico de la cuenca del río Lauca. El boro es un elemento conservativo en las aguas que procede de la actividad volcánica efusiva y de los fluidos hidrotermales, por lo que sus altas concentraciones en la cuenca son un reflejo de la actividad volcánica presente. Lo anterior fue confirmado mediante el estudio de las concentraciones de sílice.

Complementariamente, se analizó la conexión hidráulica entre la cuenca del lago Chungará con la cuenca del río Lauca. A partir de este análisis se pudo concluir que existe un gradiente hidráulico que permite que el agua circule desde la cuenca del lago Chungará hacia el Lauca. La conexión hidráulica entre la cuenca del lago Chungará con la cuenca del río Lauca por el sector de las lagunas de Cotacotani ha sido apoyada por varios autores. Primero, RISACHER (Risacher, 1999) realizó un balance hídrico del lago Chungará mediante cloruros y obtuvo una infiltración desde el lago Chungará de 32 l/s (5% de los aportes). Posteriormente, HERRERA *et al.* (Herrera *et al.*, 2006) mediante un balance de masas con $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ definió que un 58% del volumen de agua que alimenta las lagunas de Cotacotani proviene del lago Chungará. Por último, el perfil TEM llevado a cabo en la prospección geofísica muestra una conexión entre cuencas a través de un acuífero superior formado por depósitos de brechas. Por debajo de este y separado por un acuitardo, se observa un acuífero confinado el cual podría estar conectado con el acuífero superior a través de una falla fácilmente visible en el perfil TEM. Por lo tanto, con los datos disponible se confirma que existe la conexión hidráulica entre ambas cuencas.

10 BIBLIOGRAFÍA

- ABELOVICH, Isaac. Antecedentes generales del reconocimiento para la ubicación de capas permeables con posibilidades acuíferas en la cuenca del río Lauca, Arica, Provincia de Parinacota. Instituto de Investigaciones Geológicas, División de Hidrogeología. Santiago, Chile. 1973. 11 p.
- AMBAR. Consultoría e ingeniería ambiental, Evaluación de Impacto Ambiental Explotación de Pozos en Parque Nacional Lauca. Noviembre, 1996. 1950 p.
- AQUATERRA INGENIEROS LIMITADA. Estimación de recargas en cuencas altiplánicas y precordilleranas de vertiente pacífica. S.I.T. N° 251. Dirección General del Agua (DGA), Santiago, Chile. 2011. 205 p.
- ARRAU, Luís. Modelo de simulación hidrológico operacional cuenca del río San José. S.I.T. N° 41. Santiago, DGA-AC Ingenieros Consultores Ltda., 1997. 410 p.
- AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS LTDA. Minuta Hidrogeológica pozos Parque Nacional Lauca sector río Lauca. Dirección de Riego, Dirección General de Obras Públicas, Ministerio de Obras Públicas. Agosto, 1994. 16 p.
- AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS LTDA. Análisis Redes de Vigilancia Calidad Aguas Terrestres Estadística Hidroquímica Nacional. Etapa I. Departamento de Conservación y Protección de Recursos Hídricos. Dirección General de Aguas. 1994. 48 p.
- AYALA, CABRERA Y ASOCIADOS LTDA. Estudio de aguas subterráneas sector río Lauca Arica, I Región. Etapa I y IV. Santiago, Chile. Marzo, 1996. 48 y 63 p.
- BENÍTEZ, Andrés. Estudio hidrometeorológico de las cuencas del río Lauca y Laguna Chungará. Santiago, ENDESA. 1975. 139 p.
- CHARRIER, R., CHÁVEZ, A., ELGUETA, S., HÉRAIL, G., FLYNN, J., CROFT, D., WYSS, A., RIQUELME, R., GARCÍA, M. Rapid tectonic and paleogeographic evolution associated with the development of the Chucal anticline and the Chucal-Lauca Basin in the Altiplano of Arica, northern Chile. *Journal of the South American Earth Sciences*, v.19, 2005. 35-54 p.
- CHONG, Guillermo, PUEYO, Juan J., DEMENGASSO, Cecilia. Los yacimientos de boratos de Chile. Departamento de Ciencias Geológicas, Universidad Católica de Norte, Antofagasta, Chile. Departamento de Geoquímica, Facultad de Geología, Universidad de Barcelona, España. Laboratorio de Microbiología Marina, Universidad Católica del Norte, Antofagasta, Chile. Julio, 2000. 20 p.
- CIREN. Sistema de información territorial de humedales altoandinos. Ministerio de agricultura. Gobierno de Chile. 2013. 397 p.
- CLAVERO, J., STEVE, R., SPARKS, J., POLACO E. Geología del volcán Parinacota, Región de Arica y Parinacota. ISSN 0717-7283. SERNAGEOMIN. Ministerio de Minería. Gobierno de Chile. 2012. 33 p.
- CLAVERO, Jorge y SPARKS, Steve. Field Trip Guide-A1. Parinacota Volcano and Taapaca Volcanic Complex. Volcanism and its impact on society. International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior. General Assembly. Pucón, Chile, 2004. 22 p.
- Corporación Nacional Forestal. Plan de Manejo Monumento Natural de Surire. Ministerio de Agricultura. Santiago, Chile, 1983. 99 p.

- Corporación Nacional Forestal Región de Tarapacá. Plan de Manejo Reserva Nacional Las Vicuñas. Ministerio de Agricultura. Chile. 1998. 185 p.
- Corporación Nacional Forestal Región de Arica y Parinacota. Plan de Manejo Parque Nacional Lauca. Gerencia de Áreas Protegidas y Medio Ambiente. Arica, Chile. Noviembre, 2008. 104 p.
- CUSTODIO, E. y Llamas, M.R. Hidrología subterránea. 2ª Edición. Tomo I y II. 2001. 2350 p.
- DGA. Evaporación desde salares: metodología para evaluar los recursos hídricos renovables. aplicación en las Regiones I y II. Trabajo publicado en la Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. Departamento de Hidrología, Sub. Depto Estudios Hidrológicos. Abril, 1986. 20 p.
- DGA. Recursos hídricos en la provincia de Arica y Parinacota. Trabajo publicado en la Revista de la Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. Departamento de Hidrología, Sub. Depto Estudios Hidrológicos. 1989. 34 p.
- DGA. Situación de Recursos Hídricos I Región. Departamento de Hidrología Santiago. Chile. Febrero, 1992. 93 p.
- DGA. Análisis Actual y Futuro de los Recursos Hídricos en Chile. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, 1996.
- DGA. Plan de acción estratégico para el desarrollo hídrico de la región de Arica y Parinacota (Documento Propuesta Borrador) S.D.T. N°306. División de Estudios y Planificación. Santiago, Chile. Octubre, 2010. 90 p.
- DGA. (4 de Agosto de 2014). *Dirección General de Aguas*. Recuperado el 20 de Agosto de 2014, de www.dga.cl/productosyservicios/derechos_historicos/Paginas/default.aspx
- DICTUC. Hidrogeoquímica e isotopía regional del altiplano de Chile. Informe Final parte IV. S.I.T. N°195. Santiago, Chile. Noviembre, 2009. 155 p.
- DICTUC. Levantamiento hidrogeológico para el desarrollo de nuevas fuentes de agua en áreas prioritarias de la zona Norte de Chile, Regiones XV, I, II Y III. Hidrogeoquímica e isotopía regional del altiplano de Chile. Informe Final parte IV. S.I.T. N°195. Santiago, Chile. Noviembre, 2009. 155 p.
- DIVISIÓN DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN. Evaluación de recursos incrementales aportados al valle de Azapa derivados de aguas subterráneas del acuífero del río Lauca. S.D.T. N° 315. Dirección general de aguas. 2011. 79 p.
- DORADOR, Cristina; PARDO, Rodrigo; VILA, Irma. Variaciones temporales de parámetros físicos, químicos y biológicos de un lago de altura: el caso del lago Chungará. Departamento de Ciencias Ecológicas, Facultad de Ciencias, Universidad de Chile. En: Revista chilena de historia natural, n.76. 2003. 15-22 p.
- FARÍAS, M., CHARRIER, R., COMTE, D., MARTINOD, J. y HÉRAIL, G. Late Cenozoic deformation and uplift of the western flank of the Altiplano: evidence from the depositional, tectonic and geomorphologic evolution and shallow seismic activity (northern Chile at 19°30'S). En: Tectonics, 24, TC4001. 2005. 29 p.
- FREEZE, R. A. y A. CHERRY (1979). Groundwater. Prentice-Hall. 604 p.

- FUNDACIÓN CENTRO INTERNACIONAL DE HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA (FCIHS). Hidrogeología – Conceptos Básicos de Hidrología Subterránea. Barcelona. 2009. 768 p.
- GARCÍA G., Marcelo, GARDEWEG P., Moyra, CLAVERO R., Jorge y HÉRAIL, Gerard. Hoja Arica – Región de Tarapacá. Carta Geológica de Chile, Serie Geológica Básica N° 84. Escala 1:250.000. Servicio Nacional de Geología y Minería – Chile. Santiago, Chile, 2004. 150 p.
- GARCÍA, M., GARDEWEG, M., HÉRAIL, G., PÉREZ DE ARCE, C. La Ignimbrita Oxaya y la Caldera Lauca: un evento explosivo de gran volumen del Mioceno Inferior en la región de Arica (Andes Centrales; 18-19°S). IX Congreso Geológico Chileno, Vol.2. Puerto Varas, Chile, 2000, 286-290 p.
- HERRERA, Christian; PUEYO, Juan José; SÁEZ, Alberto; VALERO-GARCÉS, Blas L. Relación de aguas superficiales y subterráneas en el área del lago Chingará y lagunas de Cotacotani, norte de Chile: un estudio isotópico. En: Revista geológica de Chile, Vol.33, N°2. Julio, 2006. 299-325 p.
- KLOHN, Wulf. Hidrografía de las zonas desérticas de Chile. Contribución al Proyecto CHI-35. Investigación de los Recursos Hidráulicos en el Norte Grande. Programa de las Naciones Unidas. Santiago, Chile. 1972. 24-34 p.
- KÖTT, A., GAUPP, R. y WÖRNER, G. The Miocene to recent history of the western Altiplano in Northern Chile revealed by lacustrine sediments of the Lauca Basin (18°15'-18°40'S/69°30'-69°05'W). Recent and ancient lacustrine systems in convergent margins GLOPALS-IAS Meeting, Antofagasta 12-18th. N/A, pp.4. Antofagasta, Chile, 1995. 25 p.
- KÖTT, A., GRAUP, R. y WÖRNER, G. Plio-Pleistocene evolution of the Lauca Basin (northern Chile): implications for Andean neotectonism. Magmenevolution in der Zentralen Vulkanzone der südamerikanischen Anden: Der Einflub krustaler Kontamination und post-miozäner Hebung. Münster, Alemania, 1994. 34 p.
- MORENO, T., WES, G. The Geology of Chile. The Geological Society, London. 2007. 76-81, 239-243 p.
- MUÑOZ, N. G. Geología y estratigrafía de los sectores Chapiquiña-Livilcar-Tignamar; Surire-Quiburcanca y río Putani, Provincia de Arica y Parinacota – I Región, Informe Final. Empresa Nacional del Petróleo. Santiago, Chile, 1988. 26 p.
- NIEMEYER, Hans. Ampliación de los recursos del Río Lauca. Publicado en: Revista Chilena de Ingeniería, n.303. 1964. 11 p.
- ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE LA SALUD. Norma de calidad del agua potable de la Organización Mundial de la Salud. 2008.
- POLANCO, E., CLAVERO, J., MACÍAS, J. Variación granulométrica de la facie matriz del depósito de avalancha de escombros del volcán Parinacota (18°10'S), Andes Centrales. XI Congreso Geológico Chileno, actas, Vol. 2. Agosto, 2006. 4 p.
- QUINTANA, E., MLADINIC, P., HREPIC, N. Red nacional mínima de control de lagos primera región. Estudio de los lagos Chungará y Cotacotani. Universidad de Tarapacá, Dirección General de Aguas, Ministerio de Agricultura. 1989. 52 p.
- RISACHER, François; ALONSO, Hugo; SALAZAR, Carlos. Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II y III Regiones – Chile. S.I.T N°51. Ministerio de

- Obras Públicas, Dirección General de Aguas (DGA)-UCN-IRD. Santiago, Enero, 1999. 93-147 p.
- ROVIRA, Jaime; ORTEGA, David; ÁLVAREZ, Daniel; MOLT, Karin. Áreas protegidas en Chile. CONAMA. Santiago, 2008. 506-561 p.
- SCHILLINGER, S., GUERRA, E. y WÖRNER, G. Volcanic and volcanoclastic sediments of the Mio-Pliocene Lauca Basin (N. Chile). International Volcanological Congress (IAVCEI) in Mainz. Mainz, Alemania. 3-8 Sept. 1990. 21 p.
- SCHRÖDER, Wolfgang y WÖRNER, Gerhard. Widespread Cenozoic ignimbrites in N-Chile, W-Bolivia and S-Peru (17°-20°S/71°68°E): Stratigraphy, extension, correlation and origin. Third ISAG. St Malo, Francia, 17-19/9/1996. 645-648 p.
- UICN. (1 de Septiembre de 2014). *Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza*. Recuperado el 4 de Septiembre de 2014, de www.iucn.org/es
- WÖRNER, G., HAMMERSCHMIDT, K., HENJES-KUNST, F., LEZAUN, J., WILKE, H. Geochronology ($^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, K-Ar and He-exposure ages) of Cenozoic magmatic rocks from Northern Chile (18-22°S): Implications for magmatism and tectonic evolution of the central Andes. *Revista Geológica de Chile* (ISSN) 0716-0208. 2000. 44 p.

11 ANEXO - CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA

11.1 INTRODUCCIÓN

Se presenta una caracterización de la hidrología de la zona del SHLCP a partir de un estudio hidrológico de alcance regional desarrollada por Matraz (sin publicar). Esta caracterización incluye la cuenca del SHPC y la cuenca del lago Chungará. En primer lugar se describe el contexto hidroclimático en que está situada la zona de estudio dentro de la región. A continuación se realiza:

- Una delimitación y caracterización de las cuencas.
- Descripción de los parámetros morfológicos.
- Se analizan las variables meteorológicas de precipitación, temperatura y evapotranspiración.
- Se calculan las entradas por precipitación y las salidas por evapotranspiración para un año hidrológico promedio, un año seco y un año húmedo.
- Se analizan los caudales de las estaciones fluviométricas de la DGA
- Cálculo de las curvas de probabilidad de excedencia mensuales de cada estación.

11.2 CONTEXTO HIDROCLIMÁTICO

Las características climáticas están condicionadas por la situación y la altura geográfica. El SHPC está inserto en la Región de Arica y Parinacota, que presenta características climáticas de extrema aridez. Estas características se manifiestan especialmente en la depresión intermedia y en las cuencas cordilleranas. La distancia del mar y las alturas del interior contribuyen a crear variaciones climáticas dispuestas en franjas longitudinales (**Figura 11-1**) que desde costa a cordillera se sintetizan de acuerdo a las siguientes categorías:

- Clima árido con nublados abundantes: se presenta en todo el sector costero caracterizándose por la nubosidad que se intensifica en invierno y la alta humedad recibida desde el mar, la que en contacto con los farellones costeros, permite un aprovechamiento de las camanchacas o neblinas mediante dispositivos llamados atrapanieblas que captan el agua. Esta alta humedad, la proximidad del mar y el efecto moderador de la corriente de Humboldt, producen bajas amplitudes térmicas tanto diarias como anuales, manteniéndose todo el año entre 20 y 25°C.
- Clima árido o desértico normal: se presenta este clima a partir de los 1.000 msnm, caracterizado por la muy baja humedad relativa, donde la influencia marítima no alcanza a manifestarse, cielos permanentemente despejados, grandes cambios de temperatura entre el día y la noche y la ausencia de precipitaciones. A pesar de su cercanía con la fuente de vapor de agua que representa el océano Pacífico, existen dos factores que condicionan la aridez. Por una parte está la influencia del anticiclón del Pacífico sur, que

bloquea el paso de sistemas frontales, y por otro, el efecto barrera de la cordillera de los Andes, que impide la entrada de las masas de aire húmedas que provienen del sector tropical continental. La fuerte radiación solar y la emisión nocturna de radiación infrarroja desde la superficie explican el fuerte contraste térmico entre el día y la noche, varían desde los 25°C en el día a los -15°C durante la noche. La ausencia casi total de precipitación y las condiciones extremadamente secas del ambiente hacen muy difícil el desarrollo de la vida vegetal.

- Clima árido muy frío: se presenta por el centro de la región, entre los 2.000 y 3.000 msnm. El régimen de precipitaciones se presenta mezclado observándose precipitaciones estivales y también de origen ciclónico, aunque escasas en ambos casos. Las de origen ciclonal, se presentan con intervalos de varios años, cuando suceden inviernos pluviométricamente rigurosos en la zona central del país. En estos casos, suelen ser mayores a las del verano. Debido a la altura, las temperaturas muestran un régimen relativamente frío, con un promedio no superior a los 10°C, y la misma altura atenúa las oscilaciones térmicas anuales, pero aumenta las diarias. La humedad relativa es muy baja.
- Clima frío de tundra por altura: se sitúa a partir de los 3.000 msnm. Este clima representa toda el área de estudio, que incluye la cuenca del río Lauca, la cuenca del lago Chungará y la cuenca del salar de Surire. La elevada altitud hace que las temperaturas sean muy frías, las temperaturas medias no sobrepasan los 5°C y producen una gran amplitud térmica entre el día y la noche. La principal característica es el aumento de las precipitaciones, donde las más importantes ocurren en las tardes de verano y son los llamados inviernos altiplánicos de origen convectivo, provenientes de nubosidad producida por el ascenso de masas de aire cargadas de humedad por la ladera oriental de los Andes, que tiene origen en la cuenca amazónica y en el Atlántico. En algunos sectores pueden alcanzar hasta los 400 mm de agua caída en el año. La altura hace que muchas de las precipitaciones sean de nieve. A partir de los 5.700 msnm, las temperaturas hacen que las nieves sean perpetuas, caracterizando las cumbres más elevadas de la región. La humedad relativa en general es baja.

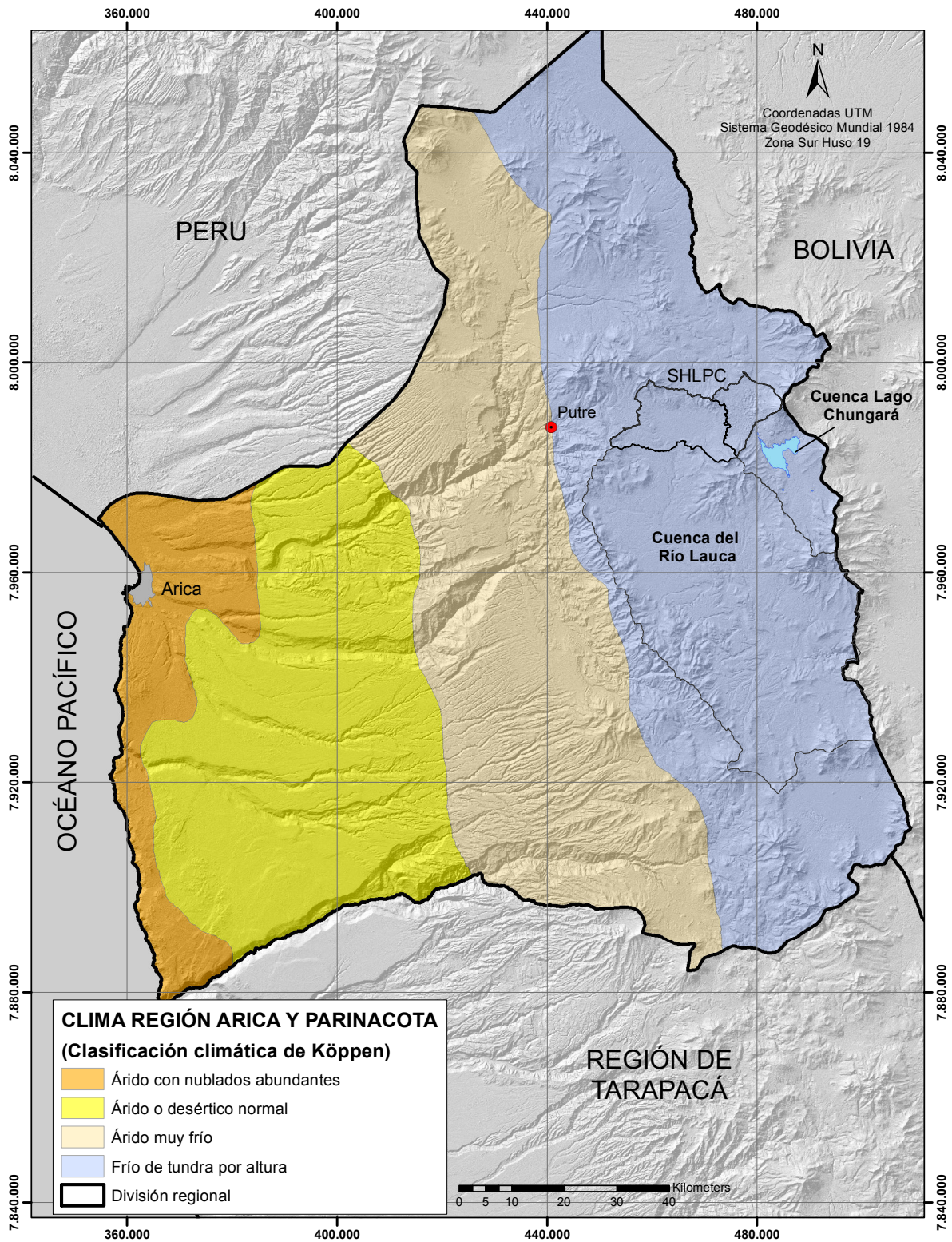


Figura 11-1. Clasificación climática de Köppen en la región de Arica y Parinacota. Fuente: http://www7.uc.cl/sw_educ/geografia/cartografiainteractiva/index.htm modificado de

11.3 CARACTERIZACIÓN DE CUENCAS Y SUBCUENCAS

Se realizó un análisis de la topografía mediante el desarrollo de un modelo digital de terreno (MDT). El MDT permitió la actualización de la delimitación de las cuencas, el cálculo de los parámetros de las cuencas relativos a su forma, relieve y red de drenaje. Esta caracterización representa la base para calcular las variables meteorológicas en la zona de estudio y posteriormente realizar el balance hídrico.

Para la delimitación se utilizó los Sistemas de Información Geográfica (ArcGIS 10.1), mediante la herramienta "Hydrology". El MDE tiene una resolución de 30x30 metros y proviene del satélite ASTER de la NASA. En base a este modelo, se definieron los límites de las cuencas de estudio a partir del criterio topográfico, que consiste en determinar las direcciones de las corrientes y simular los escurrimientos superficiales o red de drenaje. Mediante esta información y las curvas de nivel de la zona de estudio se delimitaron las divisorias de aguas de las cuencas.

11.4 DELIMITACIÓN

En la Figura 11-2 se muestra la delimitación de la cuenca del SHPC y la cuenca del lago Chungará. También se muestran los ríos, quebradas y masas de agua más importantes y los volcanes de la zona de estudio que se encuentran por encima de los 6.000 msnm, (Vc. Pomerape y Parinacota). A continuación en el documento se describen los sistemas hidrológicos principales de cada cuenca y la división en subcuencas, donde también se muestran las estaciones de la DGA.

CUENCA DEL SHPC

La cuenca del SHPC se dividió en dos subcuencas en función de la localización de las estaciones fluviométricas de la DGA. El objetivo de esta división es obtener la relación existente entre los caudales registrados en las estaciones y la serie de precipitaciones para un periodo de tiempo común, y así posteriormente poder realizar el balance hidrológico.

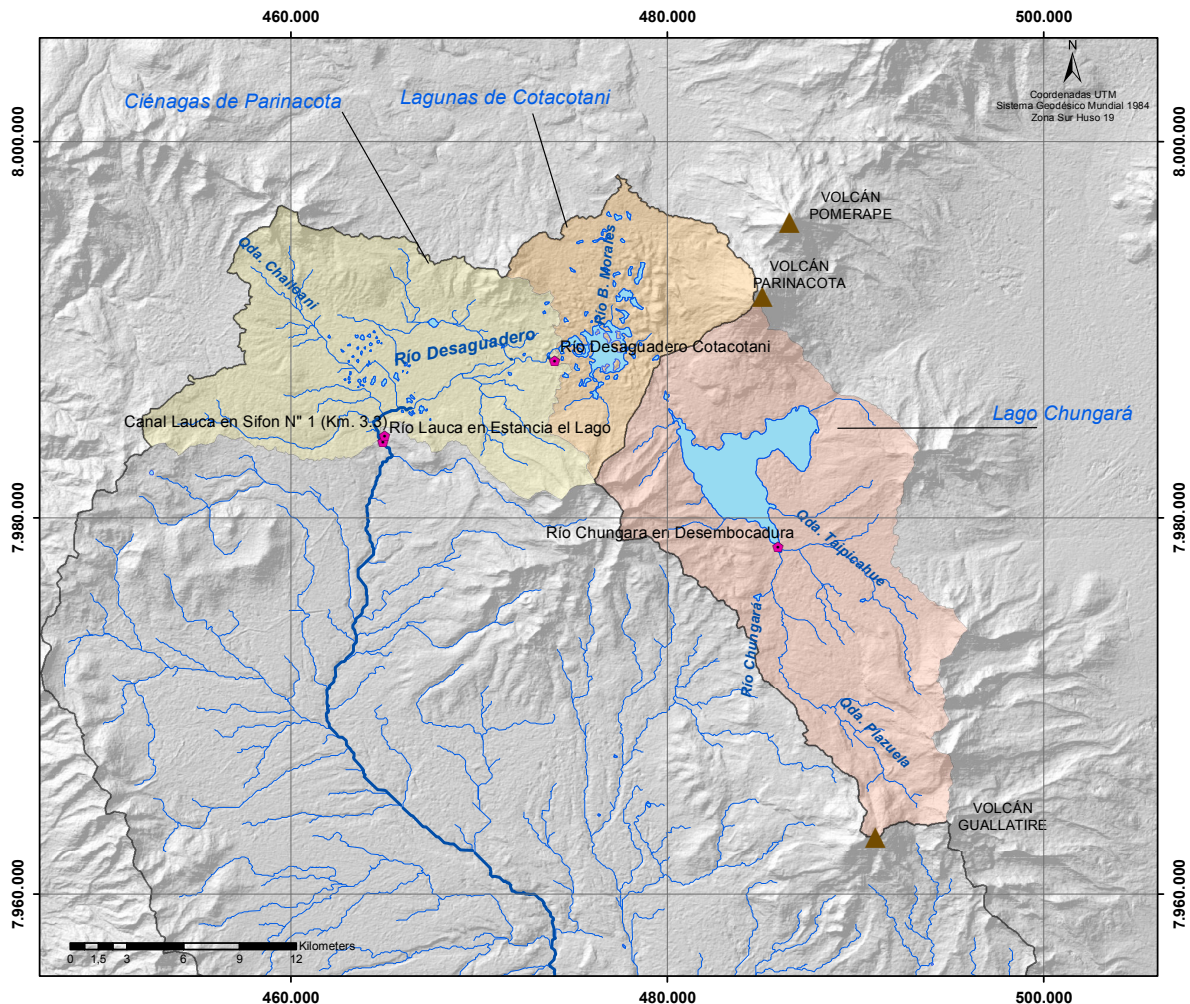


Figura 11-2. División en subcuencas, sistema hidrológico y estaciones meteorológicas y fluviométricas de la DGA de la cuenca del río Lauca. Fuente: elaboración propia.

SUBCUENCA LAGUNAS DE COTACOTANI

La subcuenca Cotacotani está situada en la cabecera de la cuenca del río Lauca, su punto más alto se encuentra en el volcán Parinacota e incluye las lagunas de Cotacotani. En la **Figura 11-3** se indica la divisoria hidrológica entre la cuenca del río Lauca y la cuenca del lago Chungará, en la cual se observan las lagunas de Cotacotani y el volcán Parinacota, éste como punto más alto que comparten ambas cuencas.

La laguna principal es alimentada superficialmente por el río Benedicto Morales, situado al noreste y por la vertiente El Encuentro al este. A la salida de esta laguna se encuentra la estación fluviométrica llamada "Río Desaguadero Cotacotani", la cual corresponde al cierre de la subcuenca. La laguna de Cotacotani alimenta las ciénagas de Parinacota, situadas aguas abajo, a través del río Desaguadero (**Figura 11-4**).



Figura 11-3. Divisoria de la cuenca del río Lauca y la cuenca del lago Chungará. Septiembre 2014. Fuente: elaboración propia.

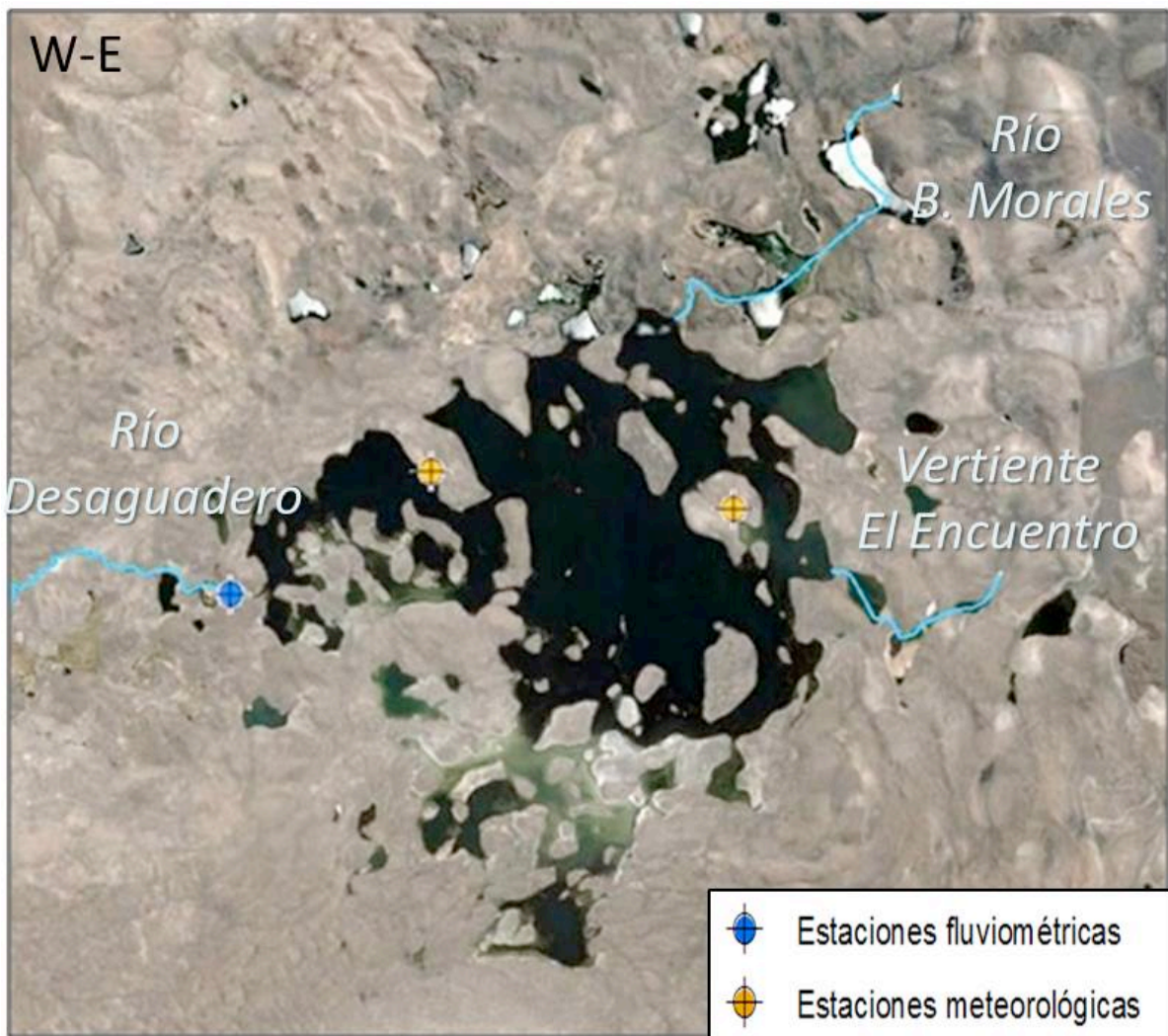


Figura 11-4. Sistema hidrológico de las lagunas de Cotacotani. Fuente: modificado de Google Earth.

SUBCUENCA RÍO LAUCA EN ESTANCIA EN LAGO (CIÉNAGAS DE PARINACOTA)

La subcuenca río Lauca en Estancia el Lago incluye:

- Río Desaguadero
- Ciénagas de Parinacota
- Río Lauca hasta la estación fluviométrica "Río Lauca en Estancia el Lago"

El río Lauca nace aguas abajo de las ciénagas de Parinacota e inmediatamente después de la bocatoma del canal Lauca, el cual se lleva un promedio histórico del 81% del río Lauca hacia el valle de Azapa, situado al oeste de la cuenca. El canal Lauca avanza paralelamente al río Lauca por el margen izquierdo durante 3,3 Km hasta la estación fluviométrica "Canal Lauca en Sifón N° 1", donde lo cruza y avanza por el margen derecho. Aproximadamente a 400 metros se encuentra la estación "Río Lauca en Estancia el Lago", la cual se ha empleado para cerrar esta subcuenca.

Se calculó el promedio histórico de las estaciones "Canal Lauca en Sifón N° 1" y "Lauca en Estancia el Lago". La primera estación refleja la extracción en el canal Lauca, con un promedio de 0,7 m³/s. En tanto, la segunda estación refleja el caudal en el río Lauca que no se lleva el canal Lauca, con un promedio de 0,16 m³/s. De esta forma se obtuvo el porcentaje promedio que representa el caudal que se lleva el canal Lauca de 81%. (**Figura 11-5**).

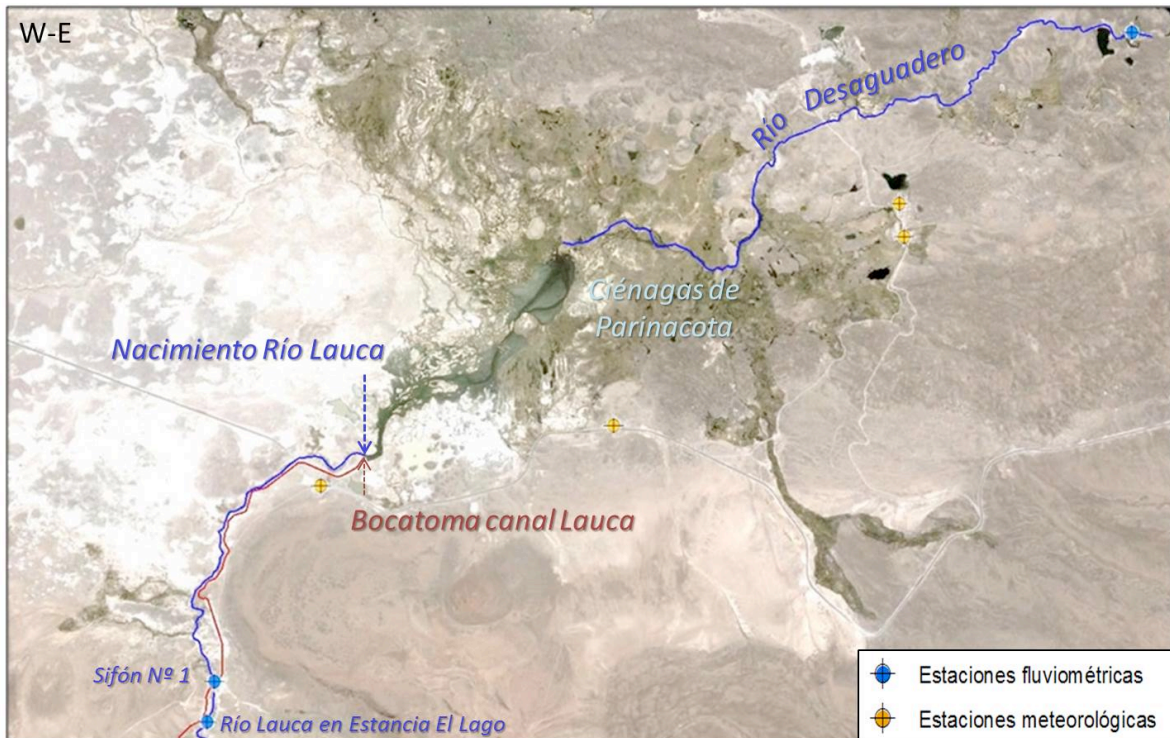


Figura 11-5. Sistema hidrológico de las lagunas de Cotacotani. Fuente: modificado de Google Earth.

En la bocatoma del canal Lauca existe una estación de aforo que no aparece en la Red hidrométrica de la DGA (**Figura 11-6**). Esta estación pertenece a la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), la cual no dispone de una red hidrométrica con registro de caudales como la DGA. Por este motivo no se pudo emplear esta estación para calcular el caudal medio mensual y anual del canal Lauca.



Figura 11-6. Estación de aforo en la bocatoma del canal Lauca. Fuente: elaboración propia.

La estación que dispone de un registro histórico de caudales en el canal Lauca corresponde a la estación "Canal Lauca en Sifón N° 1", la cual se encuentra en buen estado y en funcionamiento (**Figura 11-7**).

La primera estación que dispone de información de caudales en el río Lauca corresponde a "Río Lauca en Estancia el Lago", que también se encuentra en buen estado y en funcionamiento (**Figura 11-8**).

Al sumar los caudales de estas dos últimas estaciones, fue posible reconstruir el caudal natural del río. De esta forma, se obtiene el equivalente al caudal natural.



Figura 11-7. Estación fluviométrica "Río Lauca en Sifón Nº 1", Km 3,3 de la bocatoma del canal Lauca. Fuente: elaboración propia.



Figura 11-8. Estación fluviométrica "Río Lauca en Estancia el Lago. Fuente: elaboración propia.

En septiembre de 2014 y noviembre de 2014 se realizaron mediciones de caudal con molinete en la bocatoma del canal Lauca y en la estación "Río Lauca en Estancia el Lago". En septiembre de 2014 se midió 755 L/s en la bocatoma y 114 L/s en el río Lauca (estación Estancia el Lago). En noviembre de 2014 el caudal extraído en el canal aumentó a 1.176 L/s y en el río Lauca disminuyó a

20 L/s (**Tabla 11-1**). Lo anterior se puede explicar ya que preliminarmente la demanda agrícola es mayor durante el mes de noviembre que en el mes de septiembre, lo que hace que desvíen un mayor caudal hacia el Canal Lauca y por tanto el caudal en el río Lauca sea menor durante esta época.

Punto medido	Caudales (L/s)		
	Septiembre 2014	Noviembre 2014	Diferencia
Bocatoma Canal Lauca	755	1.176	421
Estación Estancia el Lago	114	20	-94
TOTAL	869	1.196	327

Tabla 11-1. Caudales aforados en septiembre y noviembre de 2014 en la bocatoma del canal Lauca y en la estación fluviométrica "Río Lauca en Estancia el Lago. Fuente: elaboración propia.

CUENCA DEL LAGO CHUNGARÁ

Es una cuenca cerrada de una superficie de 276 Km² que dispone de un lago de aproximadamente 23 Km². El lago Chungará destaca por ser uno de los más altos del mundo, con su espejo de agua a una cota de 4.561 msnm. Se encuentra rodeado por diversas cumbres nevadas, como el conjunto de los nevados de Payachata, compuesto por los volcanes Parinacota (6.348) y Pomerape (6.282 msnm), situados al norte. En el sur destacan los nevados de Quimsachata, compuestos por el volcán Guallatire (6.060 msnm), el cerro Capura (5.978 msnm) y el cerro Acotango (6.052 msnm). En el este se encuentra el portezuelo Tamboquemado (4.685 msnm) y en el suroeste el cerro Choquelimpie (5.298 msnm).

La dirección de los cursos superficiales principales se orientan para desembocar en el lago Chungará. El afluente más importante es el río Chungará, que nace en el volcán Guallatire con el nombre de quebrada Plazuela. En el sector sureste se encuentra la quebrada Taipicahue (**Figura 11-9**).

La estación fluviométrica de la DGA "Río Chungará en desembocadura" no está vigente actualmente, sólo lo estuvo durante tres años, desde 1963 a 1966. En la **Figura 11-10** se puede observar que la estación se encuentra en mal estado, ya que sólo mide una parte del caudal del río Chungará (Q₂) y la otra parte no pasa por la sección de la estación (Q₁). En septiembre de 2014 se realizaron medidas con molinete y se obtuvo un caudal total (Q₁+Q₂) de 221 l/s en la desembocadura del río Chungará.

HERRERA *et al.* (Herrera *et al.*, 2006) investigaron el sistema de circulación de las aguas subterráneas en el área Chungará-Cotacotani mediante análisis isotópico de la molécula del agua. Concluyeron que existiría un flujo de agua subterránea desde el lago Chungará hacia las lagunas de Cotacotani y que aproximadamente un 58% del volumen del agua que alimenta las lagunas proviene del lago Chungará, mientras que el 42% restante lo hace de otros aportes subterráneos.

En la **Figura 11-11** se muestra la divisoria hidrológica entre la cuenca del río Lauca y la cuenca del lago Chungará, así como la dirección de flujo de la conexión subterránea entre ambas.

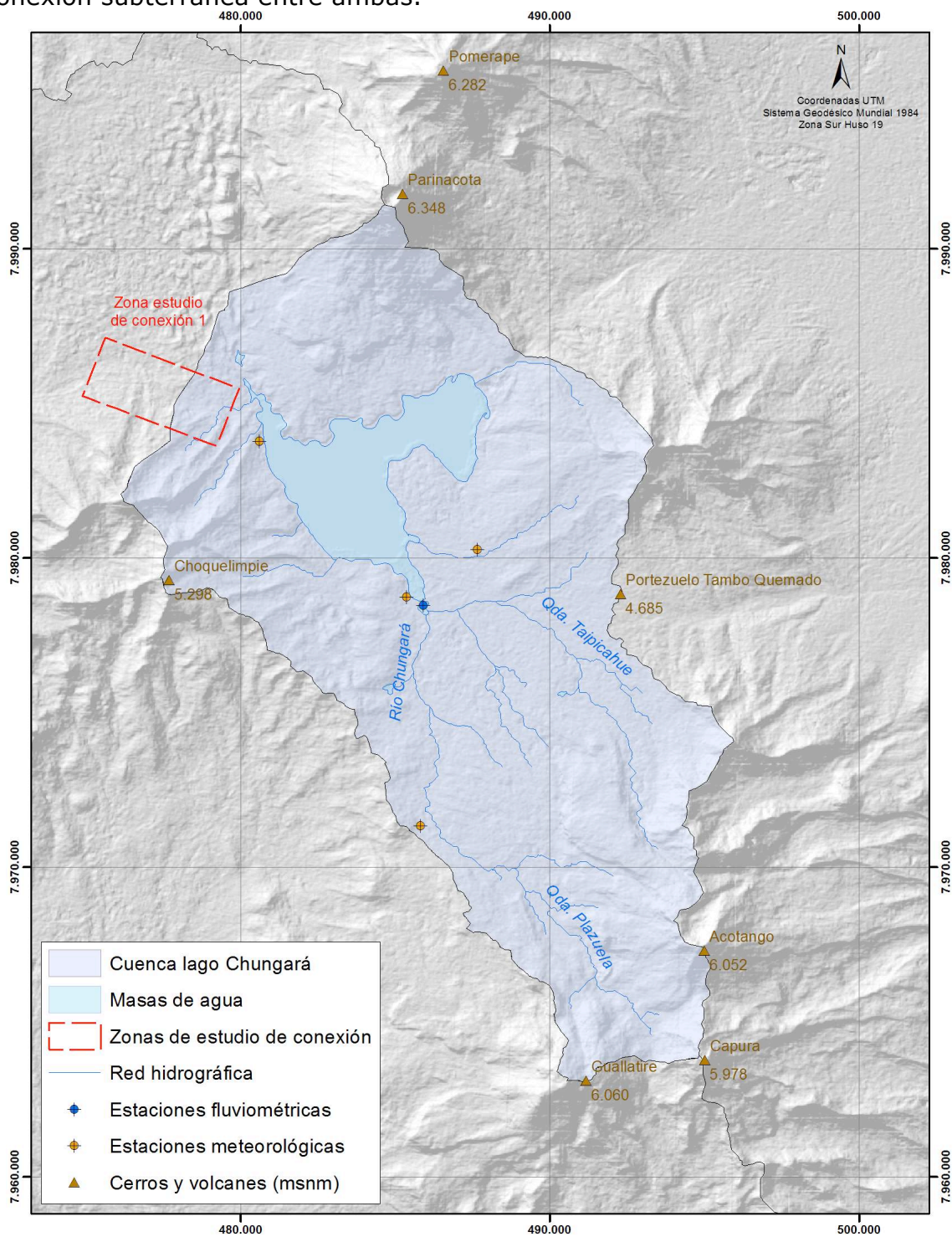


Figura 11-9. Sistema hidrológico de la cuenca del lago Chungará y estaciones de la DGA existentes, fluviométricas y meteorológicas. Fuente: elaboración propia.



Figura 11-10. Estación fluviométrica "Río Chungará en desembocadura". Fuente: elaboración propia.



Figura 11-11. Conexión subterránea entre la cuenca del lago Chungará y la cuenca del río Lauca, concretamente con las lagunas de Cotacotani. Fuente: modificado de Google Earth.

11.4.1 CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS

PARÁMETROS DE FORMA

La subcuenca de Río Desaguadero-Cotacotani, Río Lauca en Estancia el Lago y Río Lauca en Japu tienen una forma oblonga, más alargada que redonda, por lo que tiene una tendencia de crecidas baja. La forma se ha evaluado mediante el coeficiente de compacidad. En la Tabla 11-2 se muestra el coeficiente de Gravelius, la forma y la tendencia de crecidas en las diferentes cuencas y subcuencas.

	Nombre	Área (Km ²)	Perímetro (Km)	K _G	Forma	Tendencia de crecidas
Sub-Cuencas	Lago Chungará	276	87	1,46	Ovalada	Media
	Río Desaguadero Cotacotani	99	56	1,58	Oblonga	Baja
	Río Lauca en Estancia el Lago	205	88	1,71	Oblonga	Baja

Tabla 11-2. Clasificación de las cuencas y subcuencas de estudio en función del coeficiente de Gravelius (K_G), forma y tendencia de crecidas. Fuente: elaboración propia.

PARÁMETROS DE RELIEVE

El **relieve de la cuenca** es la diferencia de cota entre el punto más alto de la divisoria de la cuenca y el punto de salida. La altura máxima de la zona de estudio se encuentra en la cuenca del río Lauca y en la cuenca del lago Chungará, con una altura de 6.312 msnm. El punto geográfico que tienen en común ambas cuencas corresponde al volcán Parinacota, con una altitud máxima de 6.342 msnm, pero la cumbre no se encuentra en la divisoria de la zona de estudio..

La cuenca del lago Chungará es la que está situada a mayor altura, con una altitud media de unos 4.800 msnm. La subcuenca del Río Desaguadero-Cotacotani está situada a 4.700 msnm aproximadamente, en tanto Río Lauca en Estancia el Lago se ubica a una altura aproximada de 4540 msnm (Tabla 11-3).

	Nombre	Altitud (msnm)		Relieve (msnm)	Altitud media (msnm)
		Mínima	Máxima		
Sub-Cuencas	Lago Chungará	4.474	6.312	1.838	4.798
	Río Desaguadero Cotacotani	4.492	6.312	1.820	4.704
	Río Lauca en Estancia el Lago	4.361	5.339	978	4.537

Tabla 11-3. Parámetros de relieve en las cuencas y subcuencas de estudio. Fuente: elaboración propia.

En la **Figura 11-12** se ha representado el mapa de altitudes de las cuencas y subcuencas, donde destacan las zonas de mayor altitud en colores rojos más intensos, las cuales coinciden con las divisorias de aguas de las diferentes cuencas y subcuencas.

El mapa se ha clasificado en 13 bandas hipsométricas o intervalos de altitud cada 200 metros. El objeto de esta clasificación es calcular la superficie que tiene las cuencas y subcuencas en cada banda, para posteriormente analizar las variables meteorológicas. Se realiza de esta forma porque existe una fuerte relación entre la altura y estas variables (precipitación, temperatura, evaporación).

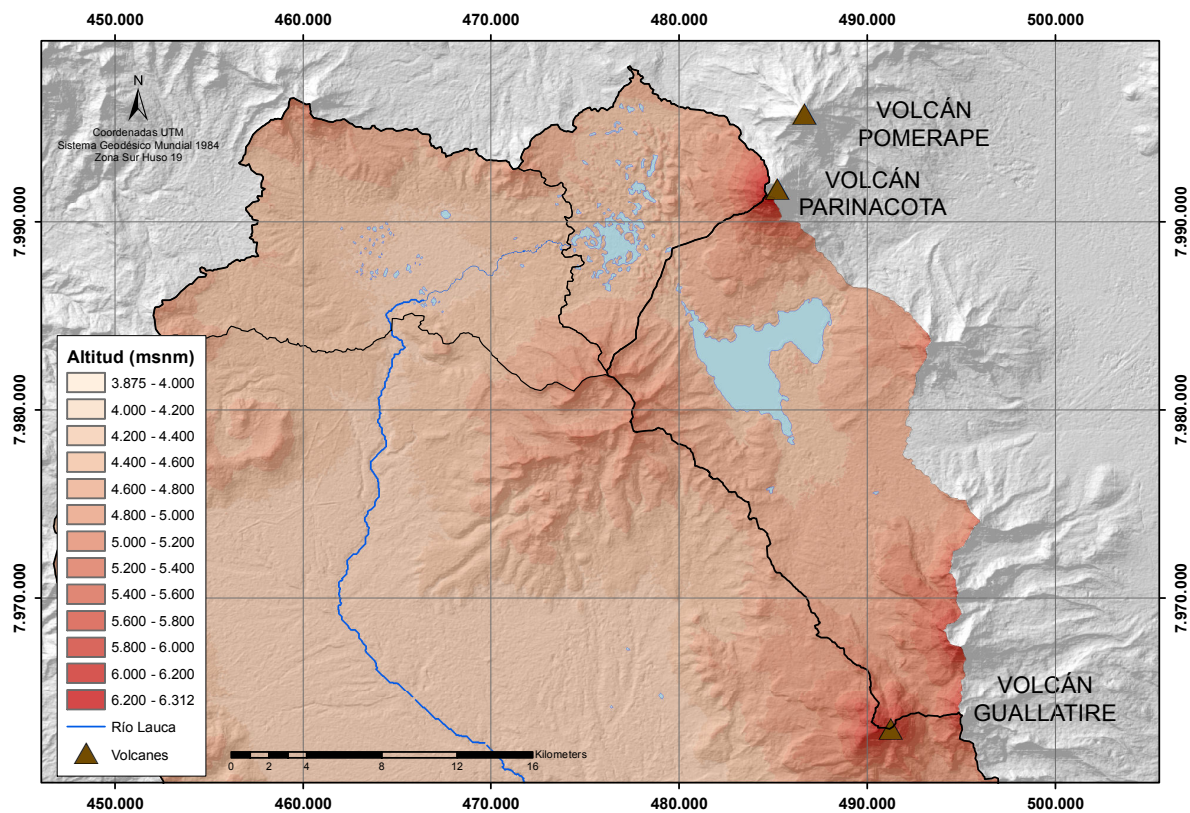


Figura 11-12. Mapa de altitudes de las cuencas de estudio. Fuente: elaboración propia.

11.5 ANÁLISIS DE VARIABLES METEOROLÓGICAS

En el estudio de Matraz (sin publicar) se realizó un análisis regional de los datos de entrada del estudio hidrológico local del SHPC. En el estudio local del SHPC se utilizaron las estaciones meteorológicas de la DGA, y las variables analizadas fueron:

- Precipitación: análisis de precipitaciones medias mensuales de estaciones para determinar la estacionalidad existente durante el periodo 1984 al año 2013. Seguidamente se analizaron las precipitaciones medias mensuales, anuales y se calculó la precipitación mensual para un año normal o promedio, un año húmedo y un año seco.
- Temperatura: Análisis de la variación estacional a lo largo del año mediante las temperaturas medias mensuales. Cálculo de las temperaturas medias anuales y la variación interanual para determinar la tendencia histórica.
- Evapotranspiración: Análisis de la evaporación potencial registrados en las estaciones de la DGA. En primer lugar se estudió la evaporación promedio anual y su evolución histórica. Seguidamente se determinó la correlación entre la evaporación y otras variables: humedad relativa, temperatura y altitud. A continuación se analizó la variabilidad mensual. Finalmente se calculó la evapotranspiración real en la cuenca del río Lauca para un año normal o promedio, un año húmedo y un año seco.

11.5.1 PRECIPITACIÓN

Se calcularon las precipitaciones medias mensuales del periodo 1984-2013, con el objetivo de determinar la estacionalidad existente. A continuación se obtuvieron las precipitaciones medias anuales y se generaron las isoyetas y el modelo digital de precipitaciones (MDP). Finalmente se calculó la precipitación media mensual en la cuenca para un año promedio, un año seco y un año húmedo.

Las 19 estaciones pluviométricas utilizadas pertenecen a la DGA, en la **Figura 11-13** se observa el mapa con su localización.

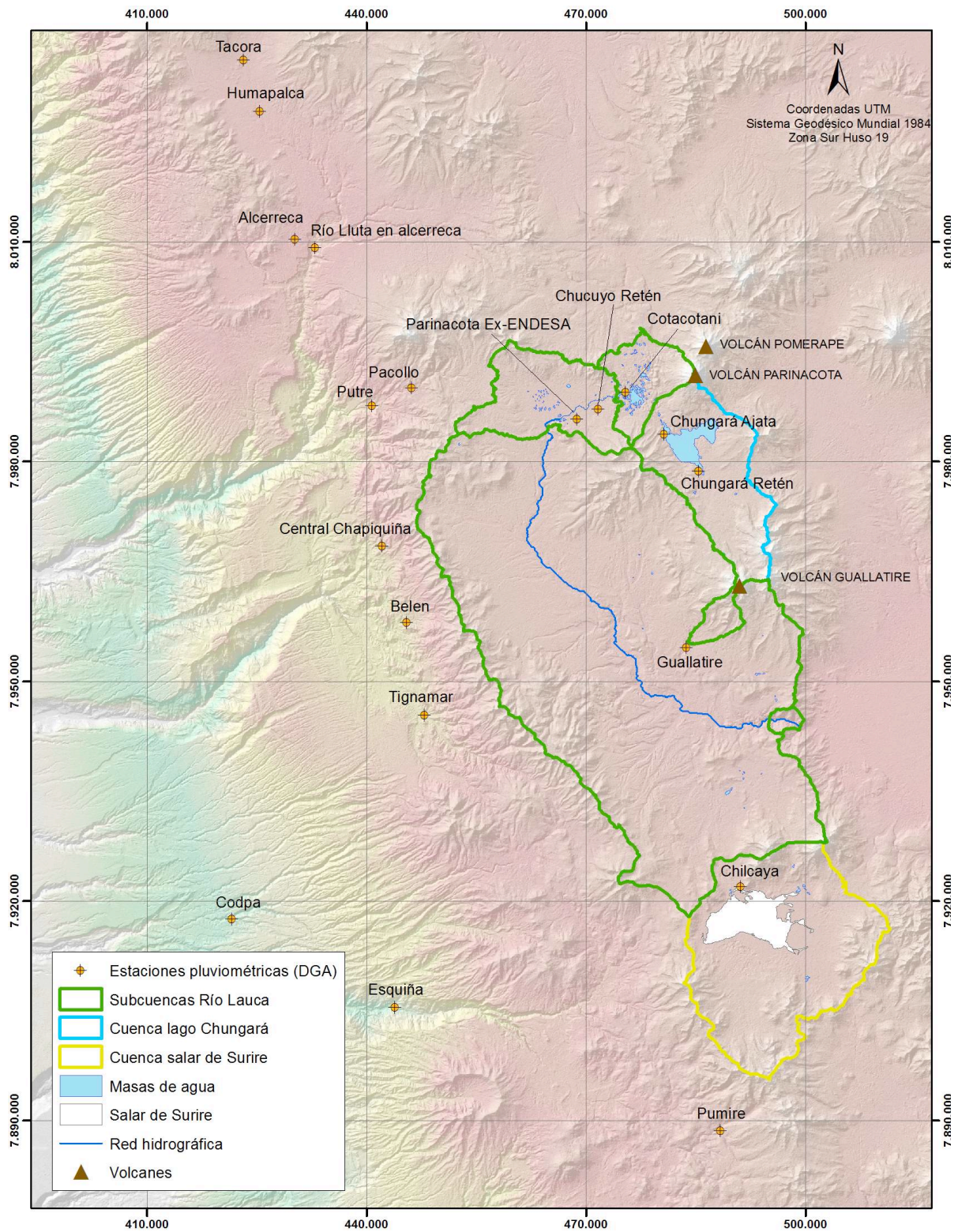


Figura 11-13. Localización de las estaciones pluviométricas. Fuente: elaboración propia.

PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL

Las precipitaciones medias mensuales representan el año hidrológico medio. Mediante su análisis se determinó la estacionalidad existente en la zona de estudio, la variación de la precipitación en función de la altitud y del espacio.

Mediante el análisis de las precipitaciones medias mensuales se determinó que existe una marcada estacionalidad en la que los meses más húmedos corresponden a enero y febrero. Esto muestra una fuerte influencia tropical a causa del invierno altiplánico, concepto que puede ser confuso, ya que estos meses corresponden al verano austral. Las precipitaciones se originan como lluvias orográficas causadas por masas de aire provenientes de la región del Amazonas durante la estación lluviosa. Éstas se producen especialmente en el altiplano de la Cordillera de los Andes debido a la actividad convectiva, que es la precipitación que se asocia a la formación de nubosidad cumuliforme durante la tarde cuando el calentamiento del suelo favorece el desarrollo de movimientos ascendentes y produce precipitaciones en este lugar. En la **Tabla 11-4** se cuantifica la distribución estacional de la precipitación. Se observa que entre el 72% y el 93% de la precipitación total anual está concentrada en el periodo de diciembre-marzo. El resto corresponde a una época seca en la que llueve muy poco, entre el 7% y el 23% de la precipitación total anual.

Existe una correlación entre la precipitación y la altitud para la mayoría de las estaciones, en donde cuando aumenta una variable también aumenta la otra. Destaca el comportamiento de algunas estaciones, como por ejemplo la estación de Cotacotani (4.550 msnm) y Chungará Retén (4.570 msnm), situadas a una altitud similar y con precipitaciones totales anuales tan distintas como 423 mm y 295 mm.

En general, las estaciones que se encuentran en el mismo rango de altitud muestran mayor monto de precipitación las situadas en el sector norte que las situadas más al sur. Por este motivo, es necesario considerar y analizar además la variable espacial junto con la variable altitudinal.

Estación	Precipitación (%)	
	Diciembre-Marzo	Abril-Noviembre
Chungará Ajata	86%	14%
Chungará Retén	82%	18%
Cotacotani	86%	14%
Parinacota Ex-ENDESA	90%	10%
Chucuyo Retén	89%	11%
Chilcaya	76%	24%
Guallatire	88%	12%
Pacollo	77%	23%
Pumire	72%	28%
Tacora	89%	11%
Alcerreca	88%	12%
Humapalca	89%	11%
Río Lluta en alcerreca	77%	23%
Putre	88%	12%
Central Chapiquiña	92%	8%
Belen	93%	7%
Tignamar	91%	9%
Esquiña	92%	8%
Codpa	88%	12%
Promedio	86%	14%

Tabla 11-4. Distribución de las precipitaciones durante los periodos de diciembre a marzo (época lluviosa) y de abril a noviembre (época seca). Fuente: elaboración propia.

En la **Figura 11-14** se muestra la distribución mensual de las estaciones que tienen un comportamiento singular, ya que están situadas a una cota similar y registran diferencias en los valores de precipitación total anual. Para analizar esta variabilidad espacial se realizó un agrupamiento en cuatro categorías según altitud:

- **Rango 4.500 msnm (azul):** este grupo está formado por las estaciones Chungará Ajata (4.585 msnm), Chungará Retén (4.570 msnm) y Cotacotani (4.550 msnm), con una precipitación total anual de 384 mm, 295 mm y 423 mm respectivamente, las cuales representan la precipitación más alta de la cuenca. Cotacotani es la que tiene un valor de precipitación más elevado, probablemente por estar ubicada más al norte de la cuenca. Por otro lado, la estación Chungará Ajata registra mayores valores que Chungará Retén; esta situación puede justificarse por la ubicación de las estaciones respecto al lago Chungará, ya que del mismo modo que la estación Cotacotani, se tiene mayor precipitación al norte de la cuenca.
- **Rango 4.100 msnm (verde):** el grupo de análisis se conforma por las estaciones Pumire (4.150 msnm) y Tacora (4.080 msnm), con una precipitación total anual de 194 mm y 311 mm respectivamente.

Nuevamente se repite el mismo comportamiento que el grupo anterior, donde las estaciones que se ubican más hacia el norte presentan más precipitación que en el sur.

- **Rango 3.200 msnm (naranja):** este grupo está conformado por las estaciones Central Chapiquiña (3.350 msnm), Belén (3.250 msnm) y Tignamar (3.230 msnm), con 197 mm, 199 mm y 201mm respectivamente. En el gráfico sólo se ha representado Tignamar, ya que las tres están muy próximas entre sí y muestran valores de precipitación similares. Destaca que el comportamiento de este grupo es muy similar al de la estación de Pumire (4.150 msnm) que pertenece al grupo anterior. Pumire tiene una precipitación total anual de 194 mm y este grupo un promedio de 200 mm aproximadamente, con una diferencia de altitud de 1.000 msnm entre ambos grupos. En el mapa se puede observar que la estación Pumire está ubicada en el extremo sur de la zona de estudio, lo que confirma nuevamente que en el sector norte las precipitaciones son mayores que en el sector sur.
- **Rango 2.200 msnm (rojo):** en este rango de altitud se dispone de una única estación llamada Esquiña (2.170 msnm), con una precipitación total anual de 60 mm. Por debajo de ésta, se encuentra Codpa (1.870 msnm), la cual muestra un valor de precipitación de 25 mm totales anuales. En el gráfico sólo se ha representado la estación Esquiña.

Precipitación (mm)

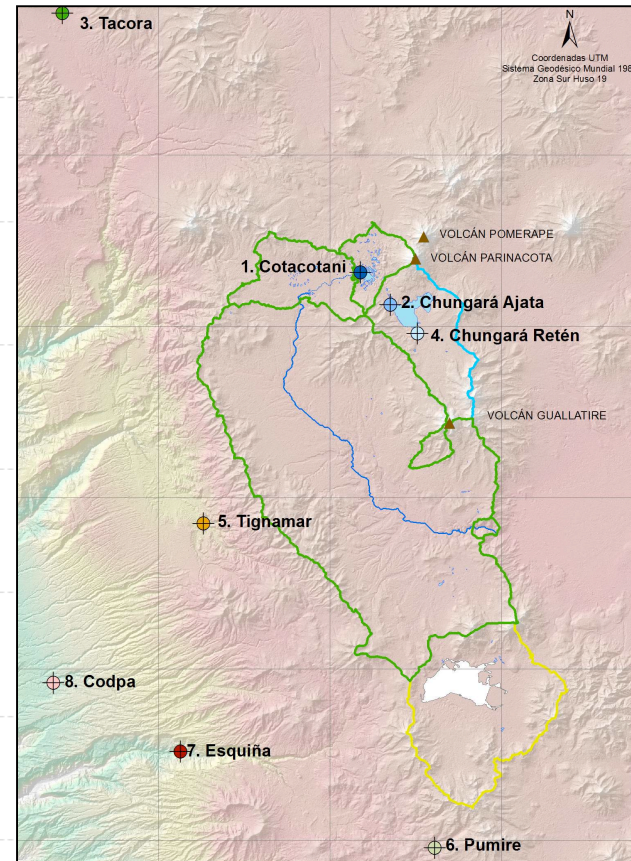
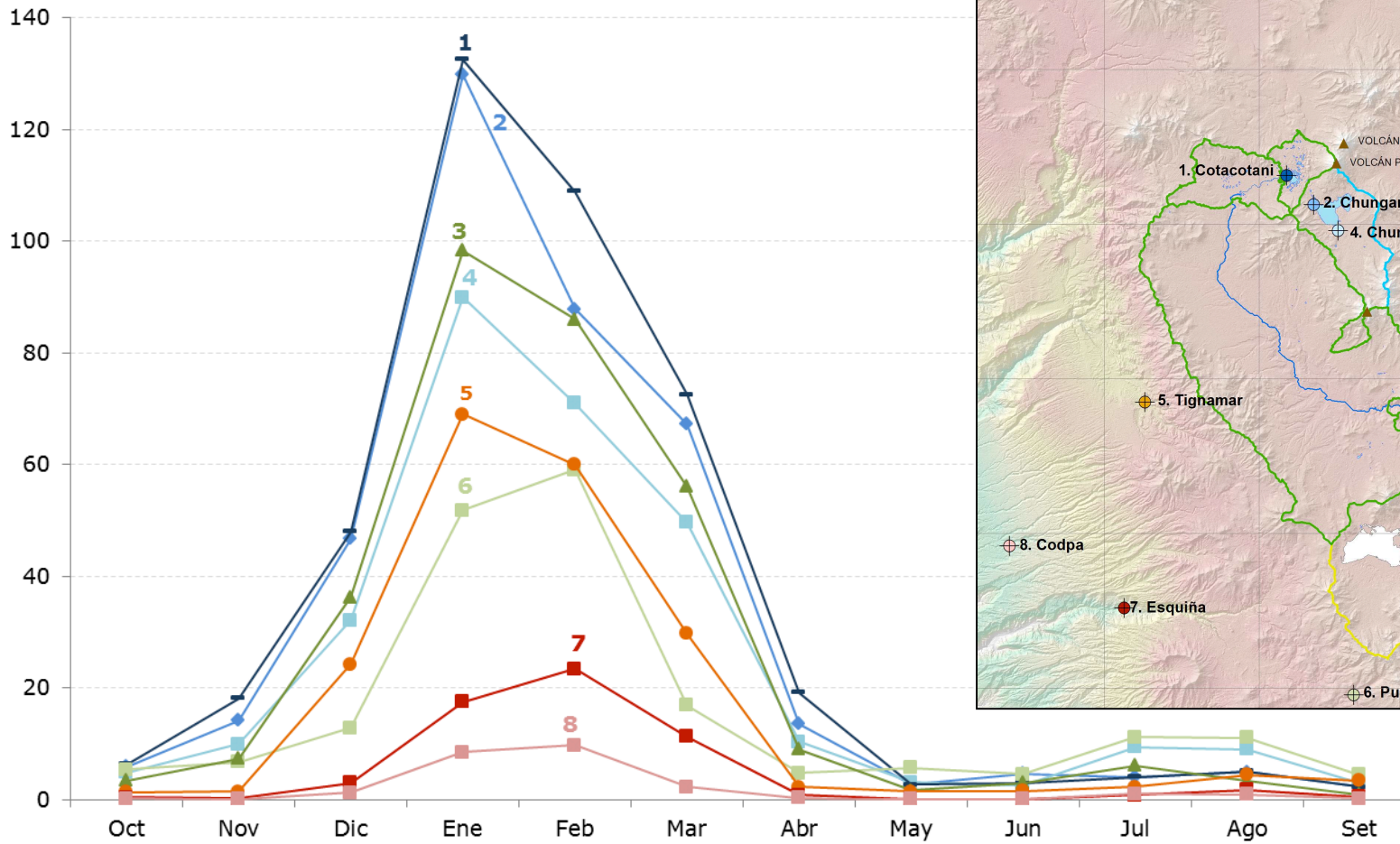


Figura 11-14. Precipitaciones medias mensuales de algunas estaciones seleccionadas para el análisis hidrológico de la cuenca del río Lauca (periodo 1984-2013). Fuente: elaboración propia.

PRECIPITACIÓN MEDIA ANUAL

El análisis de la precipitación media anual se realizó con los siguientes objetivos:

- Cuantificar la precipitación media anual en la cuenca de estudio considerando la variable altitudinal y la variable espacial.
- Obtener un factor corrector que relacione las precipitaciones calculadas a partir la variable altitudinal con las precipitaciones calculadas mediante el análisis de la variable altitudinal y la variable espacial. Este factor permite calcular la precipitación en la cuenca de una forma sencilla, ya que sólo requiere de datos de precipitación de las estaciones analizadas asociados a la altitud a la que se encuentran.

En primer lugar se graficaron las precipitaciones medias anuales versus altitud de las estaciones seleccionadas para el periodo 1984-2013 y se obtuvo la ecuación que relaciona ambas variables. Posteriormente se calculó la precipitación media anual a partir de ésta ecuación. A continuación se realizó un análisis geoestadístico para considerar la variable espacial, ya que las precipitaciones en la zona de estudio no sólo tienen variabilidad altitudinal. Finalmente se realizó una combinación de ambos análisis y se generaron las isoyetas y el Modelo Digital de Precipitaciones (MDP) de la zona de estudio. A partir de estos resultados se obtuvo el factor corrector de las precipitaciones.

En la **Figura 11-15** se muestran las isoyetas y el Modelo Digital de Precipitaciones. Se observa que la distribución de las precipitaciones varía en dos direcciones:

- Dirección este-oeste: la precipitación aumenta hacia el este, hacia las zonas de mayor altitud.
- Dirección norte-sur: la precipitación es mayor en el norte que en el sur.

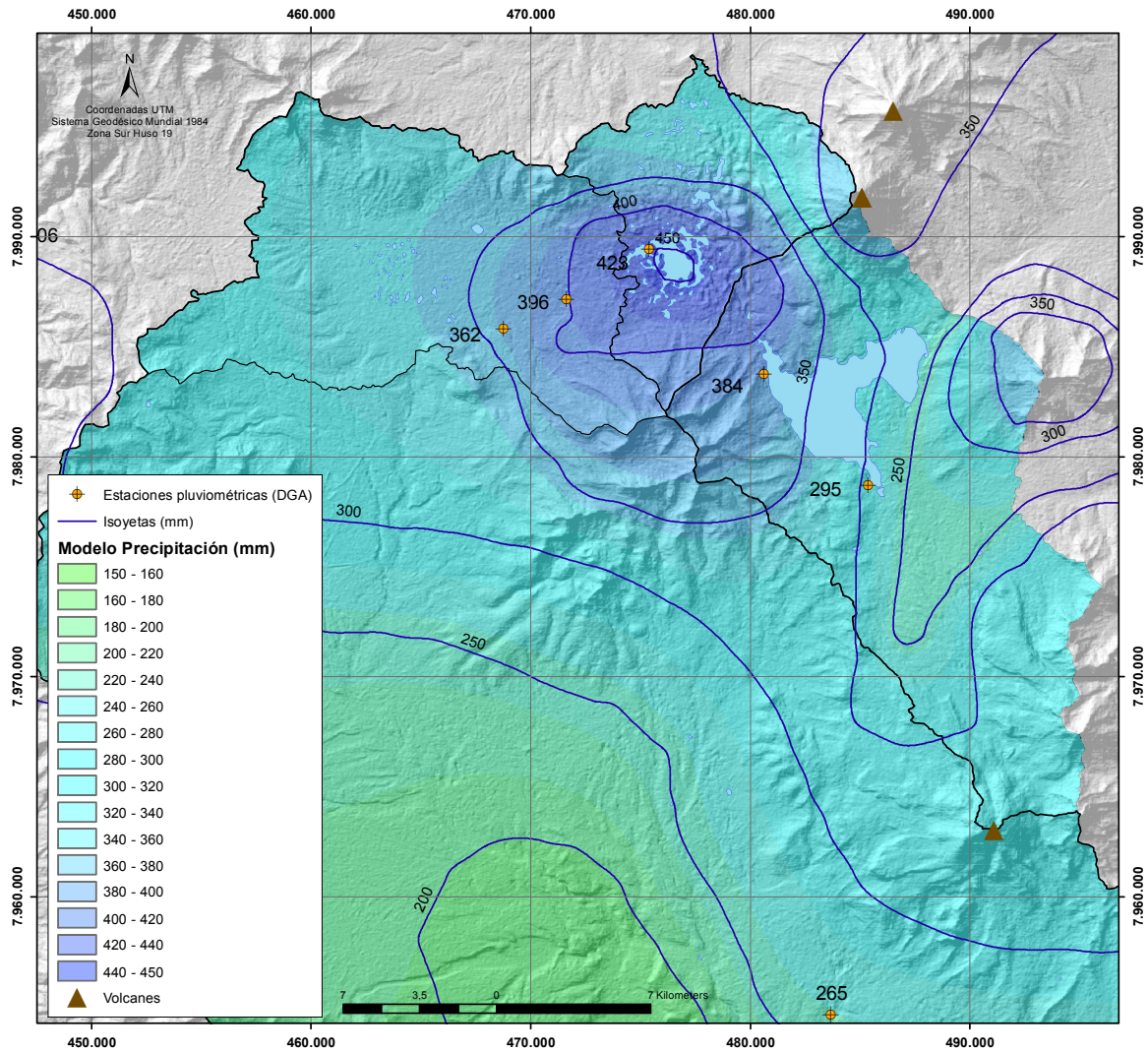


Figura 11-15. Precipitaciones promedio anual y Modelo Digital de Precipitaciones de la cuenca del río Lauca y lago Chungará (periodo 1984-2013). Fuente: elaboración propia.

En la Tabla 11-5 se muestran los valores de precipitación media anual en milímetros y en litros por segundo, tanto con la variable altitudinal como las variables altitudinal y espacial, así como el factor corrector, para las cuencas y subcuencas.

Variables	1	2	3
Precipitación media anual partir de variables altitudinal y espacial (mm)	367	344	309
Precipitación media anual partir de variables altitudinal y espacial (L/s)	1.159	2.243	2.699
Precipitación media anual a partir de variable altitudinal (L/s)	1.217	2.287	3.580
*Factor corrector	0,95	0,98	0,75

Tabla 11-5. Factor corrector que relaciona las precipitaciones medias anuales calculadas a partir de la variable altitudinal con las precipitaciones obtenidas considerando las variables altitudinal y espacial. Periodo 1984-2013. Fuente: elaboración propia

Donde,

1 es la subcuenca Cotacotani,

2 es la subcuenca de río Lauca en Estancia el Lago,

3 es la cuenca del lago Chungará .

$$*Factor\ corrector \rightarrow F_{Corrector} = \left(\frac{Precipitación\ media\ anual\ (variables\ altitudinal\ y\ espacial)}{Precipitación\ media\ anual\ (variable\ altitudinal)} \right)$$

El objetivo de este análisis es obtener el factor corrector de las cuencas y subcuencas de estudio. Con estos valores se calculan a continuación las precipitaciones a partir de datos mensuales, para un año promedio, un año húmedo y un año seco. Por tanto, en el análisis que viene a continuación se muestran los valores de entrada por precipitación en la zona de estudio, ya que están calculados con mayor nivel de detalle.

PRECIPITACIÓN MENSUAL PARA AÑO PROMEDIO, AÑO HÚMEDO Y AÑO SECO

Se calculó la precipitación mensual para un año normal o promedio, un año húmedo (precipitación que es superada por el 10% de los años de registro) y un año seco (precipitación que es superada por el 90% de los años de registro). Se analiza el año promedio y posteriormente se muestran los tres años hidrológicos (promedio, húmedo y seco).

La subcuenca situada en la cabecera del río Lauca corresponde a la subcuenca de Cotacotani, la cual muestra el promedio más alto de todas las cuencas y subcuencas, con un valor de 438 mm anuales. La entrada por precipitación en la subcuenca asciende a 1.382 L/s.

Aguas abajo se encuentra la subcuenca del río Lauca en Estancia el Lago representativa de las Ciénagas de Parinacota, con el segundo valor de precipitación promedio más elevado, de 408 mm anuales. La precipitación media anual calculada como entrada principal a la subcuenca es de 2.660 L/s.

La cuenca del lago Chungará está situada en el sector noreste y muestra una precipitación promedio de 369 mm anuales. Como entrada al sistema, se calculó una precipitación media anual de 3.225 L/s en la cuenca del lago Chungará. (**Tabla 11-6**).

Para obtener los caudales instantáneos en litros por segundo se ha integrado especialmente los valores de precipitación en milímetros por el área de cada una de las subcuencas consideradas.

Precipitación año promedio (m³/s)			
MES	Cotacotani	Río Lauca en Estancia el Lago	Cuenca del lago Chungará
Enero	4,9	9,560	11,5
Febrero	5,1	10,046	11,7
Marzo	2,4	4,677	5,7
Abril	0,5	0,871	1,2
Mayo	0,2	0,287	0,4
Junio	0,2	0,350	0,5
Julio	0,2	0,450	0,5
Agosto	0,3	0,562	0,6
Septiembre	0,1	0,240	0,3
Octubre	0,3	0,463	0,6
Noviembre	0,5	0,832	1,2
Diciembre	1,9	3,578	4,6
ANUAL (m ³ /s)	1,4	2,660	3,2
ANUAL (L/s)	1.382	2.660	3.225
ANUAL (mm)	438	408	369

Tabla 11-6. Precipitación para el año promedio (periodo 1984-2013) en las cuencas y subcuencas de estudio. Fuente: elaboración propia.

11.5.2 TEMPERATURA

Por lo general la temperatura tiene correlación con la altitud: el aumento de la altura hace que disminuya la temperatura a causa del efecto orográfico.

De acuerdo a la información existente en la DGA, de las siete estaciones para las que se obtuvo información meteorológica, se descartó únicamente a la estación Putre DCP, debido a que la misma aportaba información de solamente 4 años, considerándose como aceptables aquellas con al menos 7 meses de información y más de 10 años de registro.

Las estaciones seleccionadas representan el rango de altitudes de la zona de estudio, con una altitud mínima de 3.875 msnm en la cierre de la cuenca del río Lauca y una altitud máxima de 6.312 en la divisoria entre la cuenca del río Lauca y la cuenca del lago Chungará. Tres estaciones (Caquena, Putre y Codpa) se ubican fuera de la cuenca, sin embargo es importante tenerlas en cuenta para caracterizar el modelo de temperaturas de la región.

En la **Tabla 11-7** se presenta la lista de las estaciones junto con la ubicación, altitud, años de registro y temperaturas medias. Tienen un rango de altitud desde 4.585 msnm (estación Chungará Ajata) hasta 1.870 msnm (Codpa).

Estación	UTM (WGS1984)		Altitud msnm	Registro años	Temperatura media (°C)		
	Este	Norte			Mín	Máx	Media
Chungará Ajata	480.616	7.983.749	4.585	27	-3,3	11,2	4,0
Parinacota Ex-ENDESA	471.625	7.987.180	4.420	28	-6,0	11,8	2,4
Caquena	478.656	8.003.785	4.400	34	-7,3	12,5	2,6
Chilcaya	491.100	7.921.950	4.270	32	-5,3	11,6	3,1
Putre	440.751	7.987.664	3.545	34	2,6	15,3	9,0
Codpa	421.622	7.917.546	1.870	45	7,4	24,5	15,9

Tabla 11-7. Localización de las estaciones meteorológicas con registros de temperatura. Fuente: elaboración propia.

TEMPERATURA MEDIA ANUAL

A partir de los datos anuales de temperatura media de la cuenca se determinó la ecuación que describe la relación entre la temperatura y la altitud (**Figura 11-16**). Por medio de los resultados de esta ecuación se desarrollo un Modelo Digital de Temperaturas, el cual se presenta en la **Figura 11-17**.

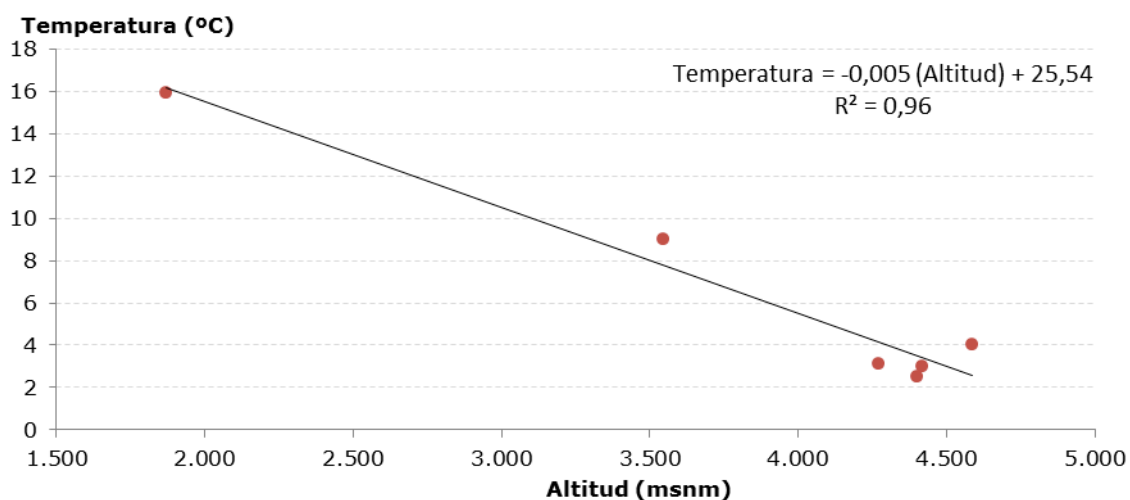


Figura 11-16. Relación entre la temperatura y la altitud de las estaciones seleccionadas. Fuente: elaboración propia.

Mediante el software ArcGIS se calculó la temperatura promedio anual en la cuenca, la cual es de 3,1 °C. La temperatura más baja es de -5,9°C y está ubicada en la zona más alta que corresponde a la divisoria entre la cuenca del río Lauca y la cuenca del lago Chungará. Las temperaturas más elevadas son del orden de 6 °C y corresponden a la zona topográficamente más baja de la cuenca.

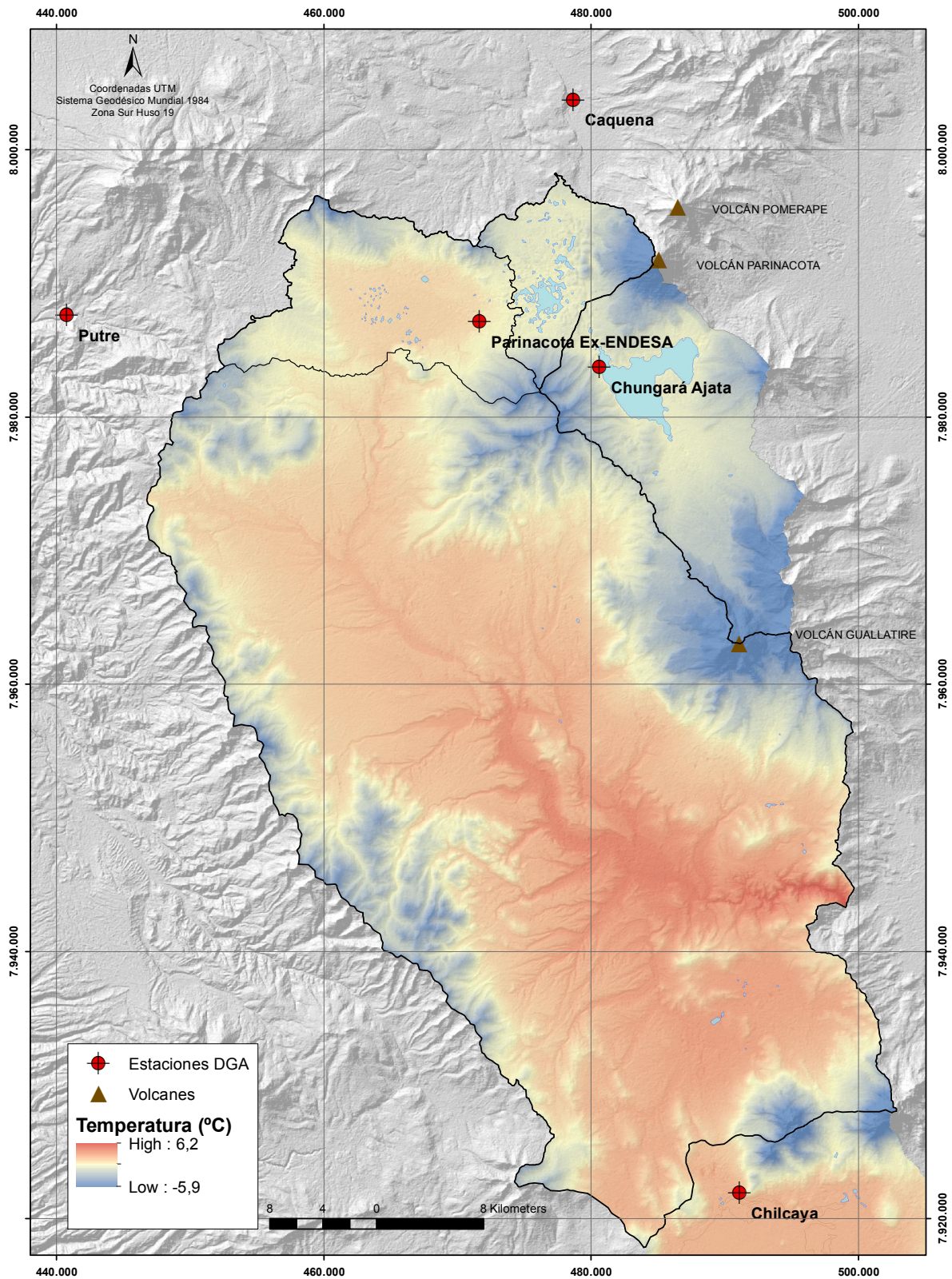


Figura 11-17. Localización de las estaciones meteorológicas DGA para caracterizar la temperatura y Modelo Digital de Temperaturas. Fuente: elaboración propia.

11.5.3 EVAPOTRANSPIRACIÓN

No se dispone de estudios de investigación con medidas de terreno para caracterizar con precisión la evapotranspiración real. En las cuencas con poca disponibilidad de información como en este caso, se estima la evapotranspiración real a partir de fórmulas empíricas. Éstas incluyen otras variables como la precipitación y la temperatura, las cuales disponen de mayor cantidad de datos. La ecuación empleada aquí corresponde a la fórmula de Turc, basada en observaciones realizadas en 254 cuencas distribuidas para distintos climas del mundo (cálido, templado y frío). Esta metodología se ha utilizado extensivamente en otras cuencas del norte de Chile. Pese a sus limitaciones e incertezas asociadas, es la mejor herramienta de cálculo hoy en día para la poca disponibilidad de información existente en el norte de Chile.

A continuación se analiza la evaporación potencial de los datos registrados en las estaciones meteorológicas de la DGA, a nivel anual, interanual y mensual. También se analiza la relación de esta variable con la altitud, temperatura y humedad. Mediante la metodología de Turc se estima la evapotranspiración en la cuenca del río Lauca para un año normal o promedio, un año seco y un año húmedo, a partir de las precipitaciones calculadas previamente y las temperaturas medias.

EVAPORACIÓN POTENCIAL

La evaporación potencial se analizó en base a los datos de las estaciones meteorológicas que miden evaporación en tanques evaporímetros tipo U.S. Weather Bureau Clase A. A partir de los datos de las estaciones de la DGA, de las seis estaciones disponibles en el área de estudio, se seleccionaron para este análisis la información de cuatro estaciones que registran periodos superiores a los 10 años, lo cual se considera como mínimo aceptable (**Figura 11-18**).

En la **Tabla 11-8** se muestra el listado de las estaciones seleccionadas junto con la ubicación (coordenadas UTM en sistema WGS1984, zona 19 Sur), altitud, años de registro y la evaporación promedio anual.

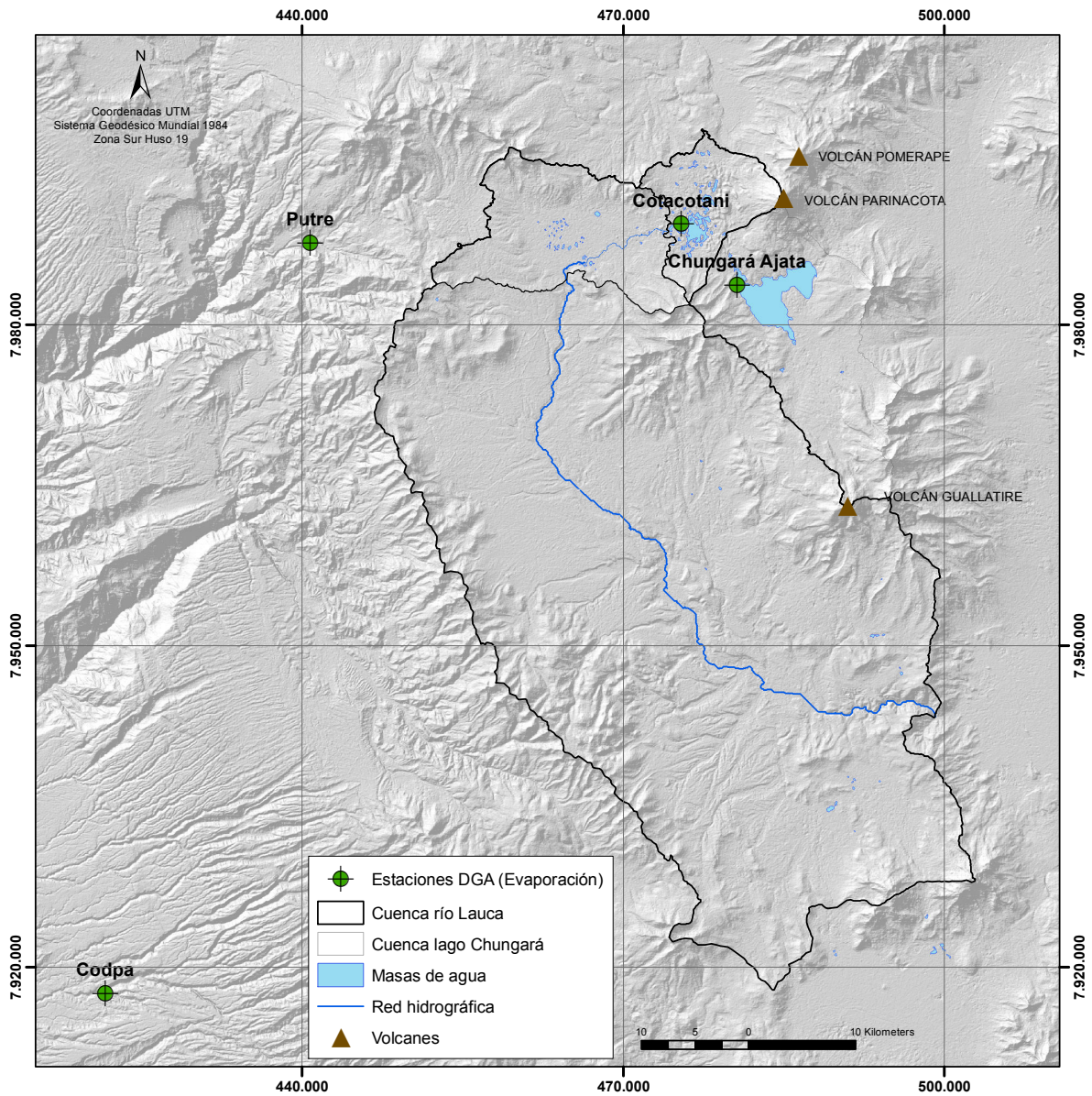


Figura 11-18. Localización de las estaciones meteorológicas empleadas para el análisis de la evaporación. Fuente: elaboración propia.

Estación	UTM (WGS1984)		Altitud (msnm)	Años de registro	Evaporación media anual (mm)
	Este	Norte			
Chungará Ajata	480.616	7.983.749	4.585	27	1.429
Cotacotani	475.382	7.989.459	4.550	29	1.956
Putre	440.751	7.987.664	3.545	25	1.982
Codpa	421.622	7.917.546	1.870	45	1.786

Tabla 11-8. Evaporación media anual en las estaciones meteorológicas cercanas y de la cuenca del río Lauca. Fuente: elaboración propia.

En la **Figura 11-19** se observa el gráfico de variación de la evaporación respecto a la altitud y se obtiene además la ecuación que representa esta relación. El coeficiente de correlación (R^2) obtenido fue de 0,04. Esto puede deberse, a que la evaporación estaría influenciada por más factores además de la altitud; otro factor importante es que los datos reportados en la estación Chungará Ajata se ven influenciados por la regulación las lagunas de Cotacotani y del lago Chungará.

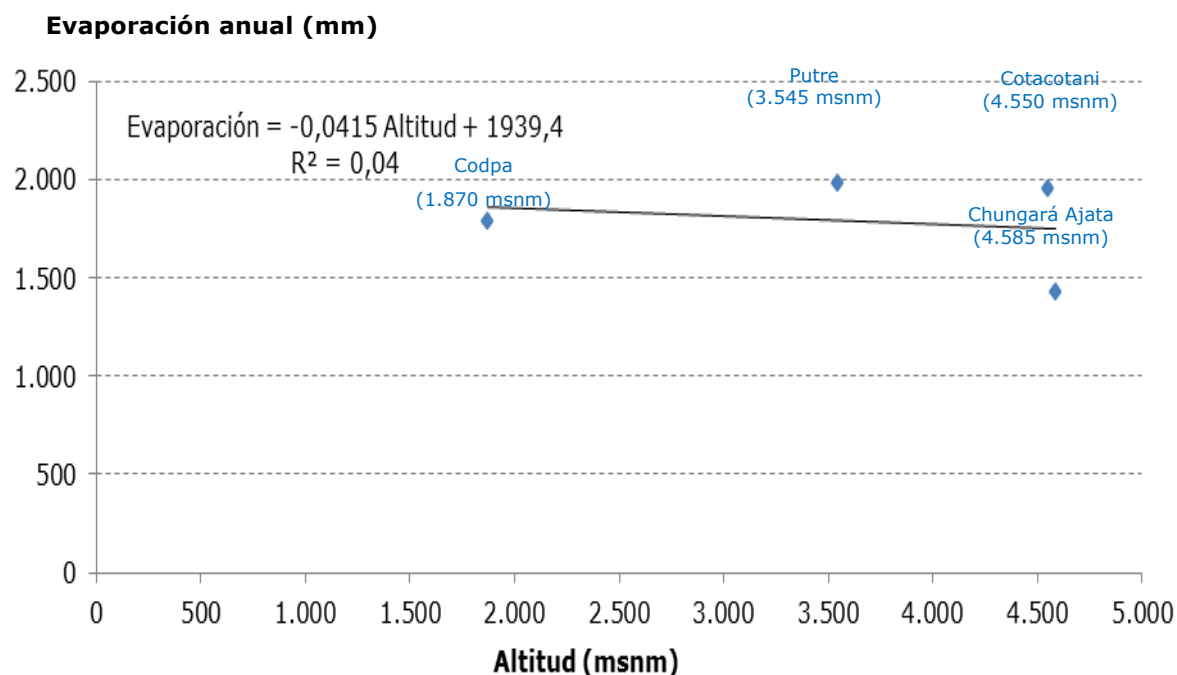


Figura 11-19. Variación de la evaporación anual total de las cuatro estaciones, Codpa (altitud 1.870 msnm.), Putre (3.545 msnm), Cotacotani (4.550 msnm) y Chungará Ajata (4.585 msnm). Fuente: elaboración propia.

Con el objetivo de analizar la evolución histórica de la evaporación media anual y su posible relación con la temperatura media anual, se seleccionó la estación Chungará Ajata, la cual dispone de un registro de 27 años.

En la **Figura 11-20** se muestra la evaporación y temperaturas medias anuales para el periodo común que va desde el año 1986 al año 2011. Se observa cómo a partir de 1994, el comportamiento de ambas variables obedece a un mismo patrón, con lo cual se quiere decir que al aumentar una aumenta la otra y así sucesivamente. No obstante durante el periodo 1986-1993, no hay una relación directa entre las variables, ya que para los descensos de temperatura presentados en los años 1988, 1990 y 1993 la evaporación muestra un aumento (circulo punteado).

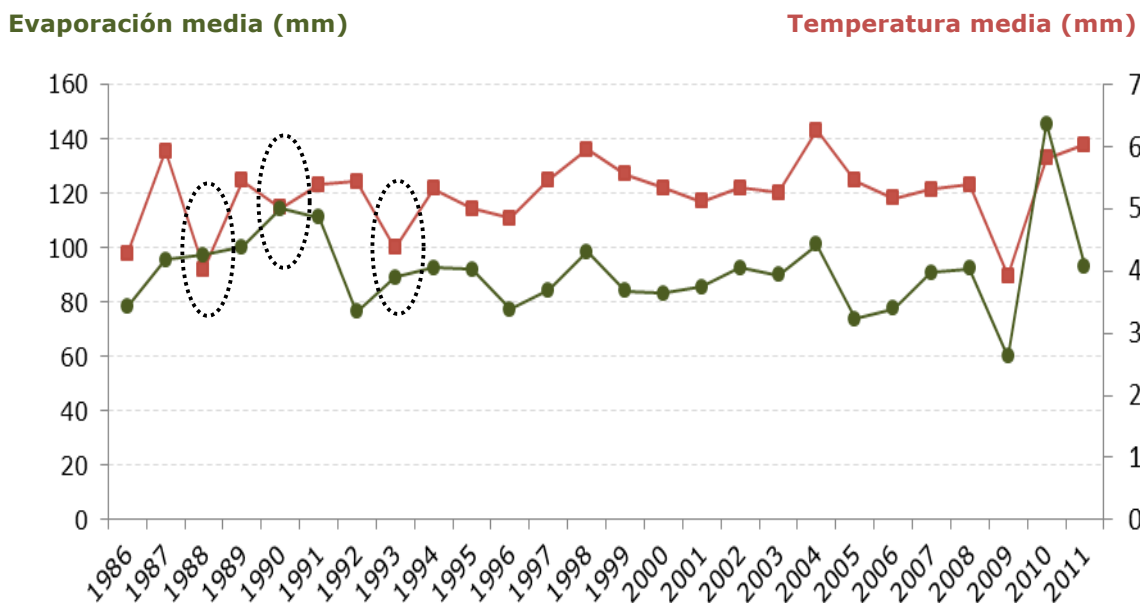


Figura 11-20. Evolución de la evaporación y temperatura media anual de la estación meteorológica Chungará Ajata (4.858 msnm). Periodo 1984-2011. Fuente: elaboración propia.

De acuerdo al análisis previo se podría afirmar que existe una buena correlación entre la evaporación y la temperatura. Para constatar esta hipótesis, se graficó en el eje de abscisas los valores de la evaporación media anual y en el eje de ordenadas la temperatura media anual de las estaciones Chungará Ajata y Codpa.

Se observa en la **Figura 11-21** que la correlación obtenida es muy baja, ya que el coeficiente de correlación (R^2) calculado es de 0,03 en la estación Chungará Ajata y 0,3 en la estación de Codpa, ambos muy próximos a cero e indicadores de una baja correlación entre las variables. Esto quiere decir que la evaporación, además de estar influenciada por la temperatura, también lo está por otras variables, como la humedad, radiación y la velocidad del viento entre otras.

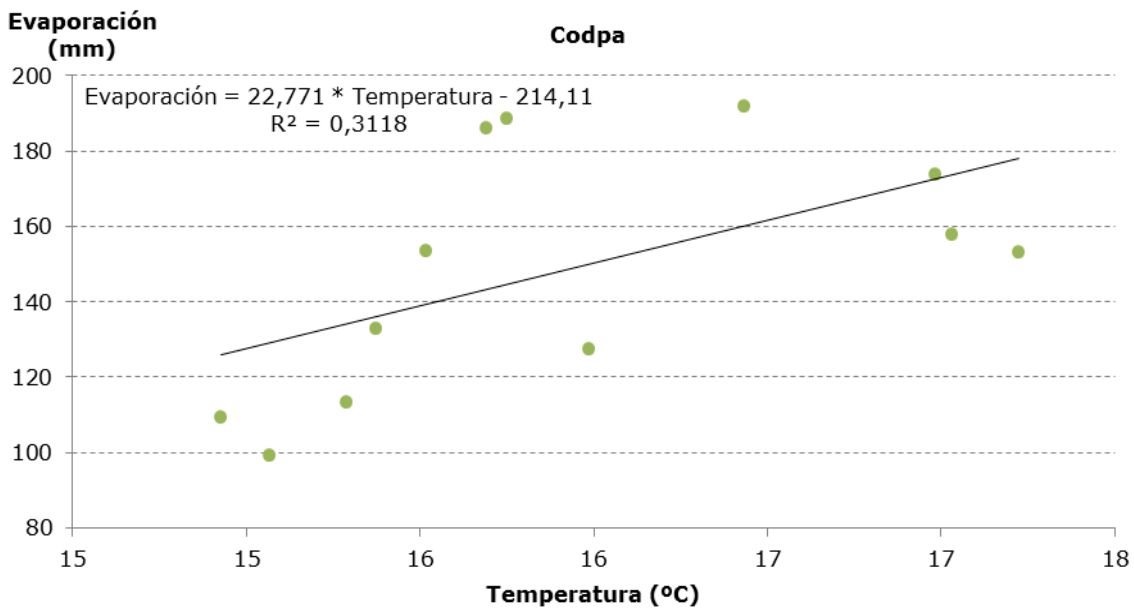
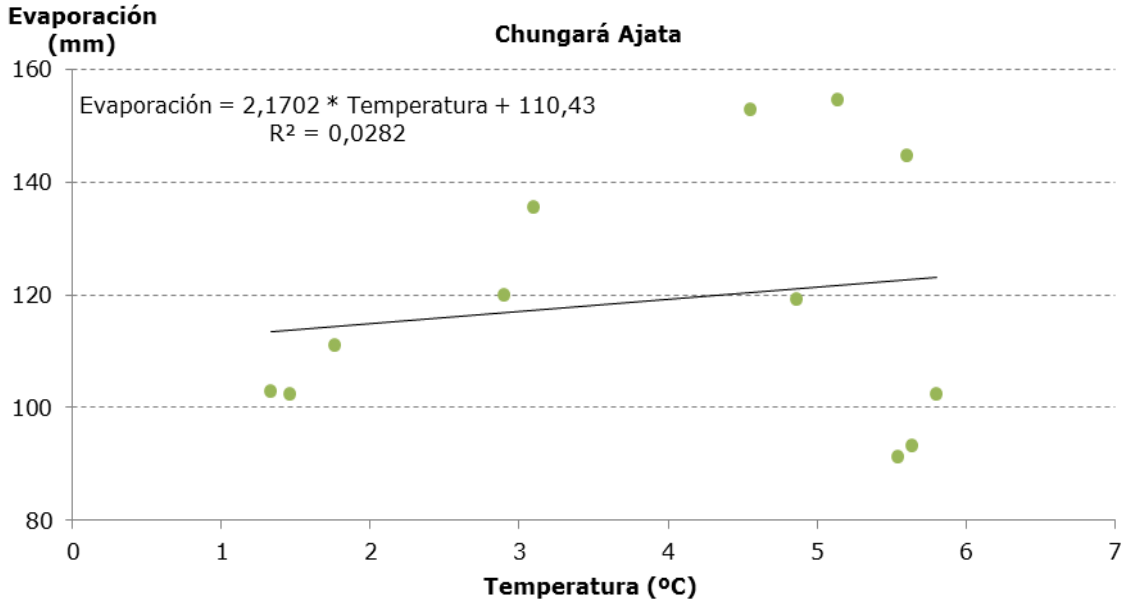


Figura 11-21. Arriba: correlación entre la evaporación y temperatura media anual de la estación Chungará Ajata (4.858 msnm). Abajo: correlación entre la evaporación y temperatura media anual de la estación Codpa (1.870 msnm). Fuente: elaboración propia.

Asimismo se analizó la variación interanual de las cuatro estaciones para determinar si existe tendencia a lo largo de la serie temporal. La estación de Codpa mostró una leve tendencia al descenso; la estación de Putre no registra tendencia a lo largo del tiempo. Mientras que las estaciones de Cotacotani y Chungará Ajata (**Figura 11-22**) tienen una leve tendencia al aumento. Se consideró el promedio anual de los datos para cada una de las estaciones,

asumiendo como despreciable las leves variaciones en la tendencia de las estaciones.

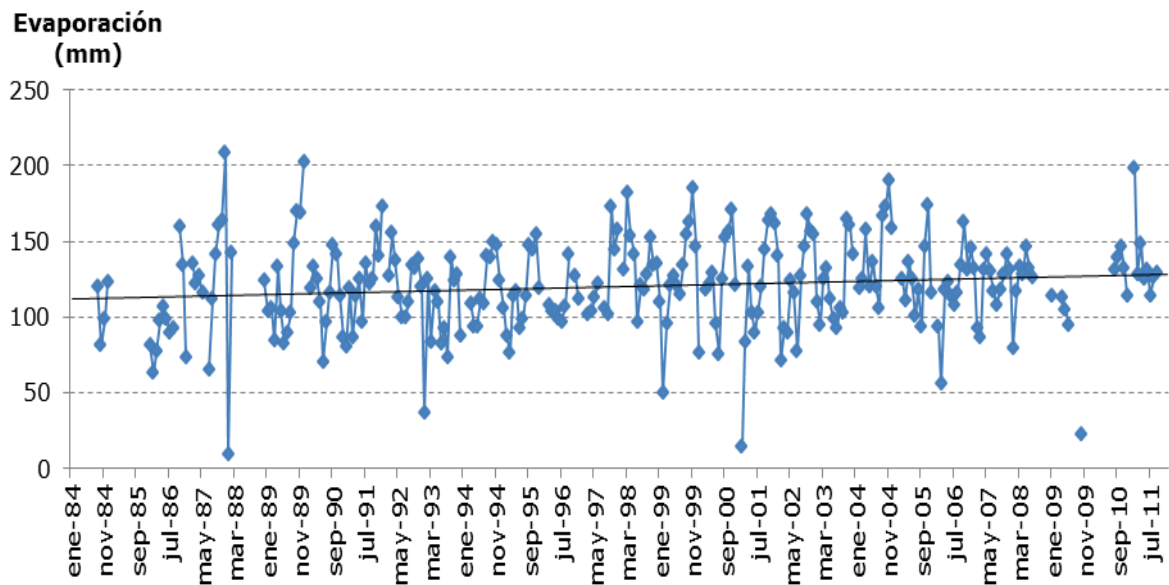


Figura 11-22. Variación interanual y tendencia de la evaporación registrada en la estación Chungará Ajata. Fuente: elaboración propia.

El análisis de la variabilidad mensual de la evaporación potencial tiene el objetivo de caracterizar la estacionalidad existente (**Tabla 11-9**). En la Figura 11-23 se representa la evaporación promedio mensual de las estaciones seleccionadas. Se observa que los valores más elevados de evaporación ocurren durante los meses de septiembre a diciembre y los más bajos de enero a marzo, excepto la estación de Codpa. Para todas las estaciones existe un segundo aumento en la evaporación potencial durante los meses de abril y mayo. Codpa presenta un comportamiento diferente, ya que sólo registra un pequeño y puntual aumento durante el mes de marzo, el cual corresponde a 5 mm. Posteriormente se muestra un descenso en la evaporación que se extiende hasta el mes de junio aproximadamente.

Estación	Altitud (msnm)	Evaporación (mm)											
		Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic
Chungará Ajata	4.585	102	93	91	119	120	103	102	111	135	153	154	145
Cotacotani	4.550	117	111	126	164	163	155	160	174	189	223	205	171
Putre	3.545	154	142	156	170	157	141	149	165	180	203	188	177
Codpa	1.870	174	153	158	128	113	99	109	133	153	186	189	192

Tabla 11-9. Evaporación media mensual en las estaciones meteorológicas seleccionadas. Fuente: elaboración propia.

En general, las estaciones registran valores bajos de evaporación durante los meses de verano, en los cuales se producen las temperaturas más elevadas del año. Esto es porque este periodo corresponde a la época de lluvias y el cielo se encuentra cubierto de nubes, lo que hace que disminuya la radiación sobre la superficie y por tanto disminuya la evaporación potencial.

En el gráfico de la **Figura 11-21** se observó que la correlación entre la temperatura y la evaporación era muy baja, ya que está influenciada por otras variables además de la temperatura. Por tanto, se realizó un análisis entre la humedad y la evaporación para determinar qué variables tienen mayor influencia sobre la evaporación. En la **Figura 11-23** se muestra los promedios mensuales de la evaporación y la humedad de las estaciones Chungará Ajata y Codpa.

Para la estación Chungará Ajata, se observa que la evaporación es más sensible a las variaciones en la humedad, ya que cuando disminuye la humedad se produce un aumento de la evaporación. Para esta estación se obtuvo un coeficiente de correlación entre la evaporación y la humedad de 0,57 (**Figura 11-24**), aproximadamente veinte veces mayor que la correlación con la temperatura, que fue de 0,02.

Para el caso de la estación Codpa, de diciembre a marzo se muestra una tendencia opuesta entre la humedad y la evaporación. Sin embargo, a partir de este mes ambos parámetros varían en forma análoga hasta junio. Posteriormente, la humedad mantiene su tendencia a la disminución hasta agosto, mientras que la evaporación inicia su aumento en julio. A partir de septiembre ambas variables se mantienen en aumento hasta diciembre. Esta variación en el comportamiento incide en una disminución del coeficiente de correlación, el cual fue 0,22 (**Figura 11-25**), mientras que la evaporación y la temperatura fue de 0,31.

Se puede afirmar que para las dos estaciones analizadas, la evaporación en la estación Chungará Ajata tiene mayor sensibilidad a las variaciones en la humedad, mientras que en la estación de Codpa los cambios en la temperatura son más significativos. Esta situación puede deberse a la presencia del lago Chungará situado al lado de la estación meteorológica.

No es posible analizar y definir el fenómeno preciso que controla, ya que de las variables atmosféricas que influyen en la evaporación (radiación solar, temperatura, presión de vapor, viento, presión atmosférica, y humedad entre otros), sólo se obtuvo información de la humedad relativa en las estaciones Chungará Ajata y Codpa.

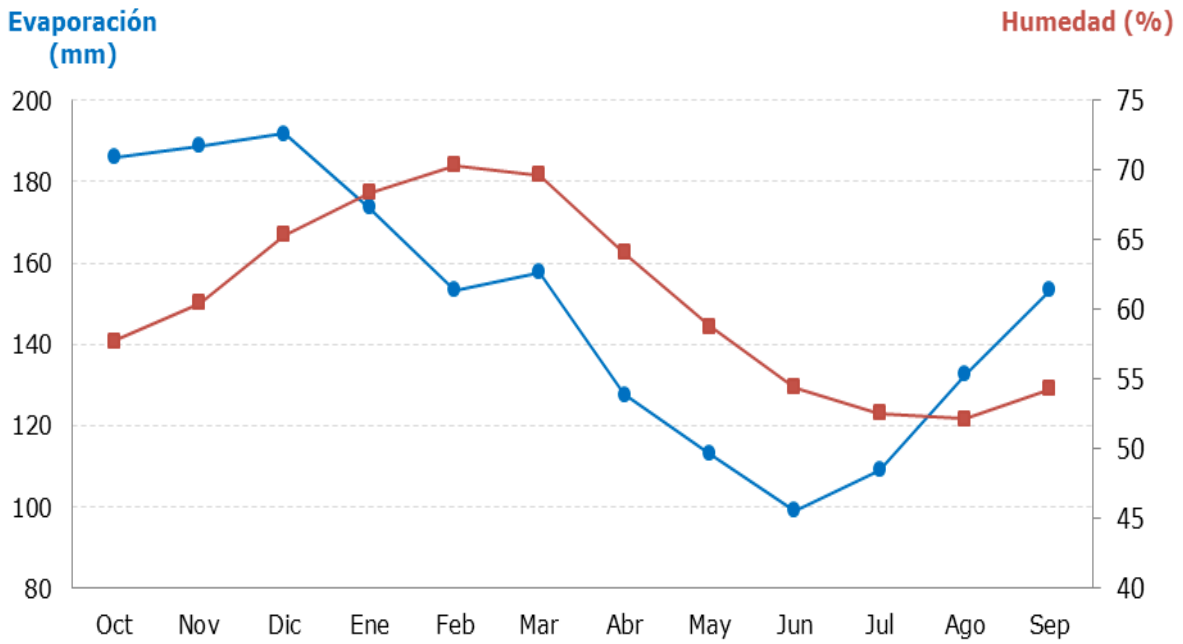
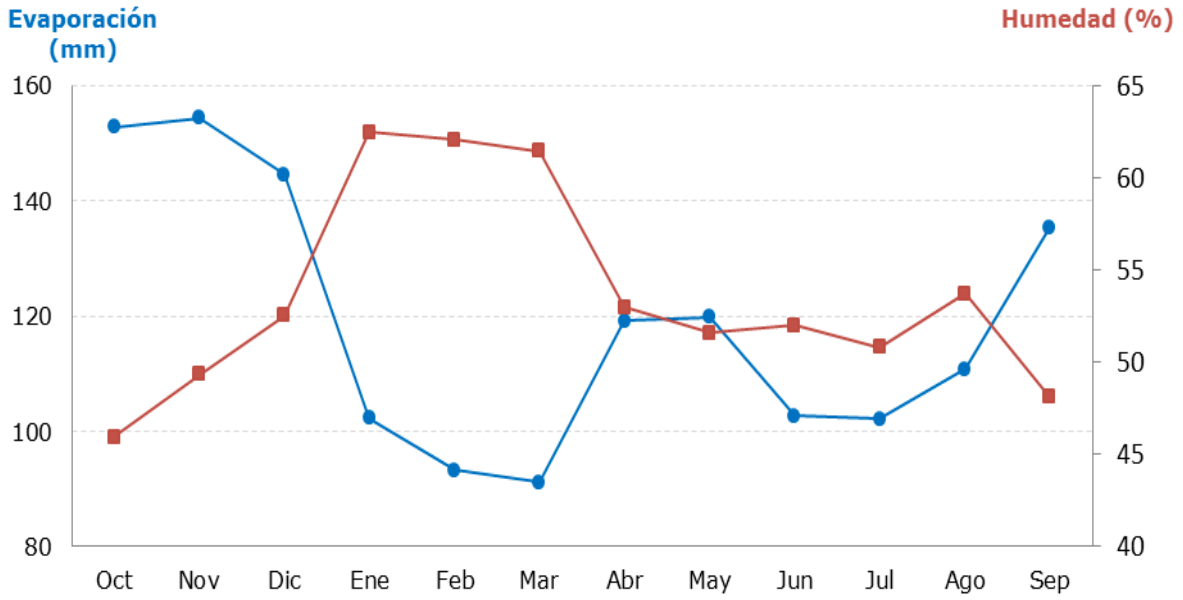


Figura 11-23. Arriba: Variación mensual de la evaporación y la humedad en la estación Chungará Ajata. Abajo: Variación mensual de la evaporación y la humedad en la estación Codpa. Fuente: elaboración propia.

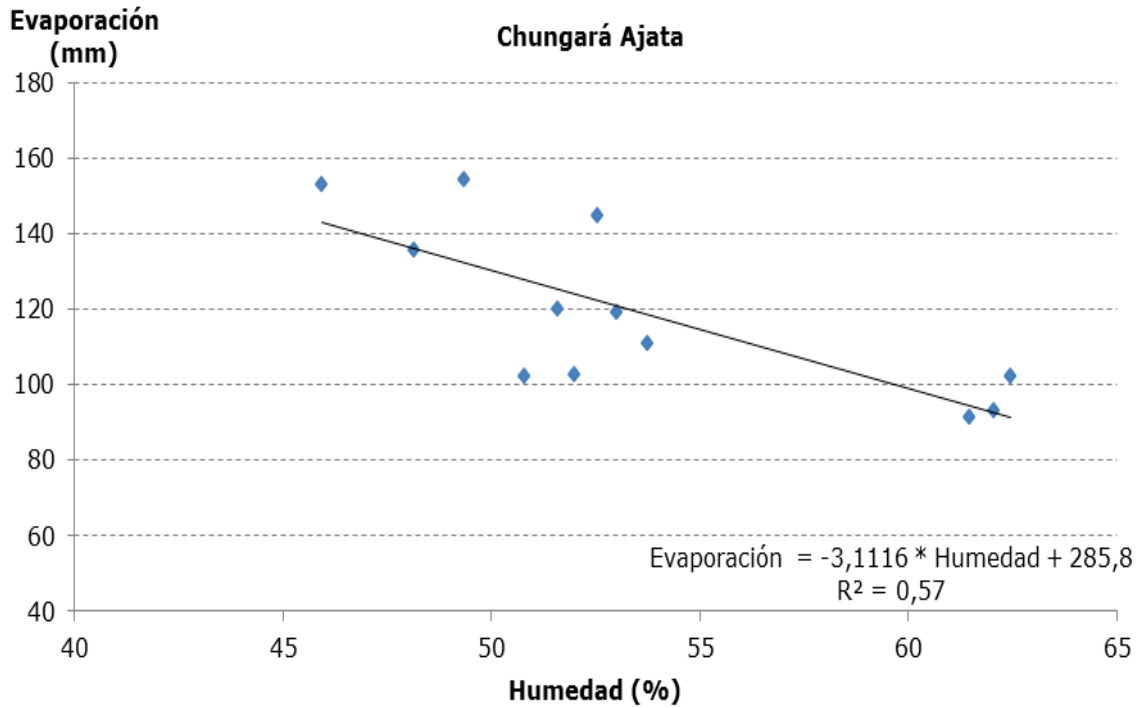


Figura 11-24. Correlación entre evaporación y humedad de la estación Chungará Ajata. Fuente: elaboración propia

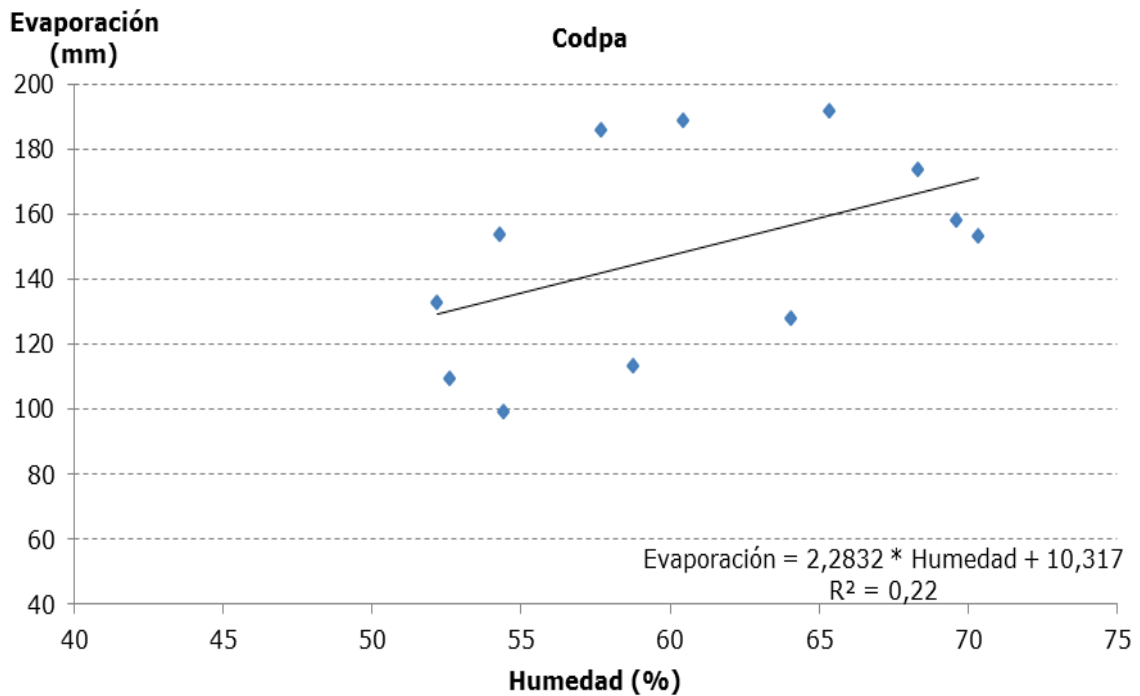


Figura 11-25. Correlación entre evaporación y humedad de la estación Codpa. Fuente: elaboración propia.

EVAPOTRANSPIRACIÓN EN LA CUENCA

La evaporación efectiva que se produce en la cuenca se llama evapotranspiración real. Dicho valor se estimó en función de la precipitación media anual y de la temperatura media anual. Una aproximación razonable de la evapotranspiración, dadas las condiciones climáticas de la zona, se obtiene a partir de la fórmula de Turc, basada en observaciones realizadas en 254 cuencas distribuidas para algunos climas del mundo (cálido, templado y frío). A partir de la **Ecuación 11-1** se calculó la evapotranspiración natural o real (ETR).

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0,9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad \text{Ecuación 11-1}$$

Donde,

ETR: evapotranspiración natural o real [mm]

L: función de la temperatura media mensual. $L = 300 + 25T + 0,05T^3$

T: temperatura media anual [°C]

P: precipitación media anual [mm]

Se obtuvo una ETR promedio anual en la cuenca del río Lauca de 238 mm, lo que equivale al 82% de la precipitación (**Tabla 11-10**).

Precipitación media anual (mm)	Temperatura media anual (°C)	L	P/L	ETR media anual (mm)
289	3,3	383	0,75	238

Tabla 11-10. Cálculo de evapotranspiración real mediante el método de Turc en la cuenca del río Lauca. Fuente: elaboración propia.

La ecuación de evapotranspiración de Turc está diseñada para un cálculo anual.

De forma únicamente referencial, se realizó un balance hídrico a nivel mensual, y considerando que los 238 mm anuales se distribuyen en los doce meses del año. Esta distribución mensual se fundamenta en el modelo del comportamiento de las precipitaciones, de forma que la recarga se produce

principalmente durante la época de lluvias (diciembre-marzo). Por tanto, durante estos meses la evapotranspiración es menor a la precipitación, y se produce una recarga efectiva del sistema. El resto del año las lluvias son menos importantes, y la poca precipitación que se produce en la cuenca es evaporada a la atmósfera (**Tabla 11-11**).

Mes	Precipitación (mm)	ETR (mm)	Pp - ETR (mm)
Enero	90	72	18
Febrero	86	68	18
Marzo	44	35	9
Abril	8	8	0
Mayo	3	3	0
Junio	3	3	0
Julio	4	4	0
Agosto	5	5	0
Septiembre	2	2	0
Octubre	4	4	0
Noviembre	7	7	0
Diciembre	33	26	7
ANUAL	289	238	51

Tabla 11-11. Precipitación media y evapotranspiración real media (en milímetros) en la cuenca del río Lauca. Fuente: elaboración propia.

11.6 ANÁLISIS DE CAUDALES

El comportamiento anual y mensual de los ríos y canales se refleja mediante el análisis de caudales. Este análisis se desarrolla a partir de los registros históricos en las estaciones de aforos al interior de la zona de estudio. Asimismo, se desarrollan las curvas de probabilidad de excedencia.

Al interior de la cuenca existen dos puntos de monitoreo de aforos. Estos puntos fueron utilizados como nodos para generar un conjunto de subcuencas. Se descartó la estación "Río Chungará en desembocadura" por disponer de un registro de datos muy corto (sólo 4 años) (**Tabla 11-12**).

En la **Figura 11-26** se puede apreciar la distribución de las estaciones en la cuenca. La Estación "Río Desaguadero-Cotacotani" se encuentra en la salida de las lagunas de Cotacotani, inmediatamente después del nacimiento del río Desaguadero y constituye el punto de cierre de la "Subcuenca río Desaguadero-Cotacotani". La estación "Canal Lauca en Sifón N° 1" se empleó para restituir a régimen natural el caudal extraído en el río Lauca a través del canal Lauca, sumando este caudal. A 400 metros aguas abajo se encuentra la estación "Río Lauca en Estancia el Lago", la cual cierra la "Subcuenca Río Lauca en Estancia el Lago".

Estación fluviométrica	Cuenca	UTM (WGS 1984)		Altitud (msnm)	Años	Periodo
		Este	Norte			
Río Desaguadero Cotacotani	Lauca	474.004	7.988.376	4.500	49	1965-2013
Canal Lauca en Sifón N° 1	Lauca	464.993	7.984.398	4.384	29	1985-2013
Río Lauca en Estancia el Lago	Lauca	464.906	7.984.059	4.370	43	1937-1943 1953-1955 1963-1965 1984-2013
Río Chungará en desembocadura	Chungará	485.908	7.978.462	4.518	4	1963-1966

Tabla 11-12. Estaciones de aforo de la DGA den la cuenca del río Lauca y en la cuenca del lago Chungará. Fuente: elaboración propia.

Cada estación tiene una serie temporal diferente, desde un mínimo de 29 años hasta un máximo de 49 años. No todas disponen de continuidad de datos, es decir, hay meses en los que no se dispone de registros. Por tanto, se realizó un tratamiento previo al análisis de la información fluviométrica con el objetivo de verificar la consistencia de la información, homogeneizar los datos y rellenar las estaciones necesarias para que todas dispongan la misma serie temporal.

A continuación se analizan los caudales mensuales y los caudales anuales. En segundo lugar se calculan las curvas de probabilidad de excedencia para cada estación para un periodo de 30 años, desde 1984 al año 2013.

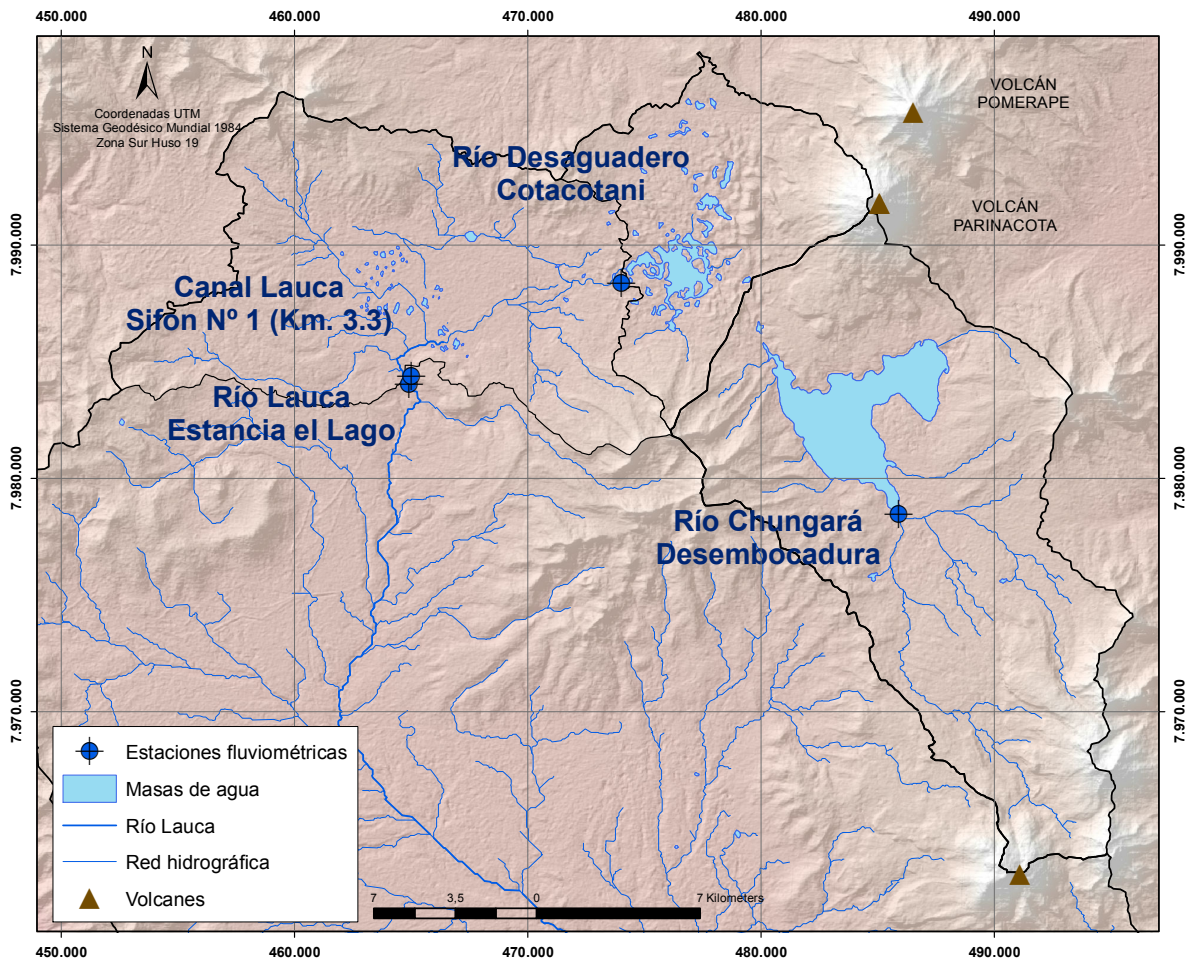


Figura 11-26. Estaciones fluvimétricas en la zona de estudio y estaciones meteorológicas seleccionadas para el análisis de caudales. Fuente: elaboración propia.

11.6.1 CAUDALES MEDIOS MENSUALES

El análisis de los caudales medios mensuales permitió caracterizar el tipo de régimen de caudal del río Desaguadero y del río Lauca para el periodo 1984-2013. El régimen del caudal de un río está determinado por las fuentes de alimentación, que son las lluvias y el derretimiento de nieves.

En la **Figura 11-27** se muestra un esquema general con los tipos de régimen de caudal, los cuales se describen a continuación:

- Ríos de régimen pluvial: se alimentan predominantemente de lluvias. Se caracterizan por el aumento o crecida de caudal asociado a los periodos de máximas precipitaciones. Asimismo, el periodo de estiaje se relaciona con el periodo de pluviosidad mínima. Por tanto, los ríos de régimen pluvial presentarán una época en el año de crecida durante los meses de enero, febrero y marzo, asociados al invierno altiplánico y otra época de estiaje o

mínimo de caudal, correspondiente a los meses de agosto, septiembre y octubre.

- Ríos de régimen nival: su alimentación proviene de los deshielos de nieves de las altas cumbres. Se caracterizan por tener bajos caudales en invierno y crecidas de importancia en primavera y/o verano, principalmente durante los meses de octubre, noviembre y diciembre. Por tanto dependen fundamentalmente de la temperatura y de la cantidad de nieve acumulada durante el invierno.
- Ríos de régimen mixto: se alimentan tanto de lluvias como del derretimiento de las nieves. Se caracterizan por tener dos crecidas en el año, una corresponde al máximo de precipitaciones (invierno altiplánico) y otra, al derretimiento de nieves durante la primavera y/o verano.
- Ríos con regulación natural desde el acuífero: muestran un caudal constante durante el año. En este tipo de ríos no se aprecia variaciones de caudal en los periodos de lluvia y deshielo. Por tanto, predomina la alimentación del río desde el acuífero.

La alimentación de un río puede encontrarse en su curso superior y a lo largo de todo su recorrido. Cuando la alimentación es mayoritaria en el curso superior, el caudal del río es abundante en su nacimiento, pero disminuye a lo largo de su curso por evaporación o infiltración. Por el contrario, cuando la alimentación se produce a lo largo de su recorrido el caudal aumenta progresivamente y llega a la desembocadura con mayor caudal que en su nacimiento.

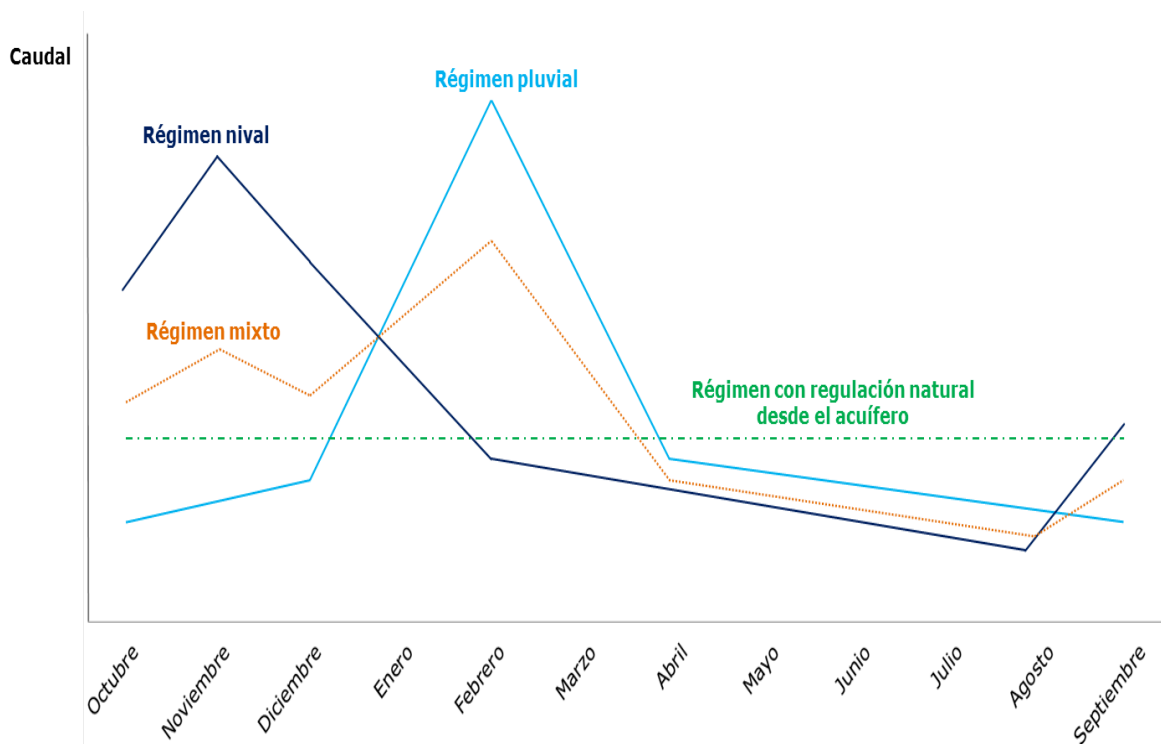


Figura 11-27. Tipos de regímenes de caudal en la zona de estudio. Fuente: elaboración propia.

RÍO DESAGUADERO

La estación Río Desaguadero en Cotacotani se encuentra a unos 500 metros aguas abajo del nacimiento del río Desaguadero, lugar donde la laguna principal de Cotacotani desagua sus aguas. La descarga de las lagunas de Cotacotani está regulada por dos obras de compuertas de vaciado (**Figura 11-28**).

Durante 1963 se construyeron dos conjuntos de obras de entrega con sus correspondientes compuertas de vaciado con el objetivo de regular los recursos que capta el sistema desde la laguna principal de Cotacotani:

- Obras de entrega "A": conjunto de dos compuertas ubicadas a distintos niveles. Permite fluctuaciones entre la cota 4.495,56 m.s.n.m.(cota mínima de extracción) y la cota 4.500,62 m.s.n.m. (cota máxima) (**Figura 11-29**).
- Obras de entrega "B": es un conjunto de compuertas ubicadas a 115 metros aguas abajo de las anteriores, las cuales fueron acondicionadas en 1981 (Figura 11-30).

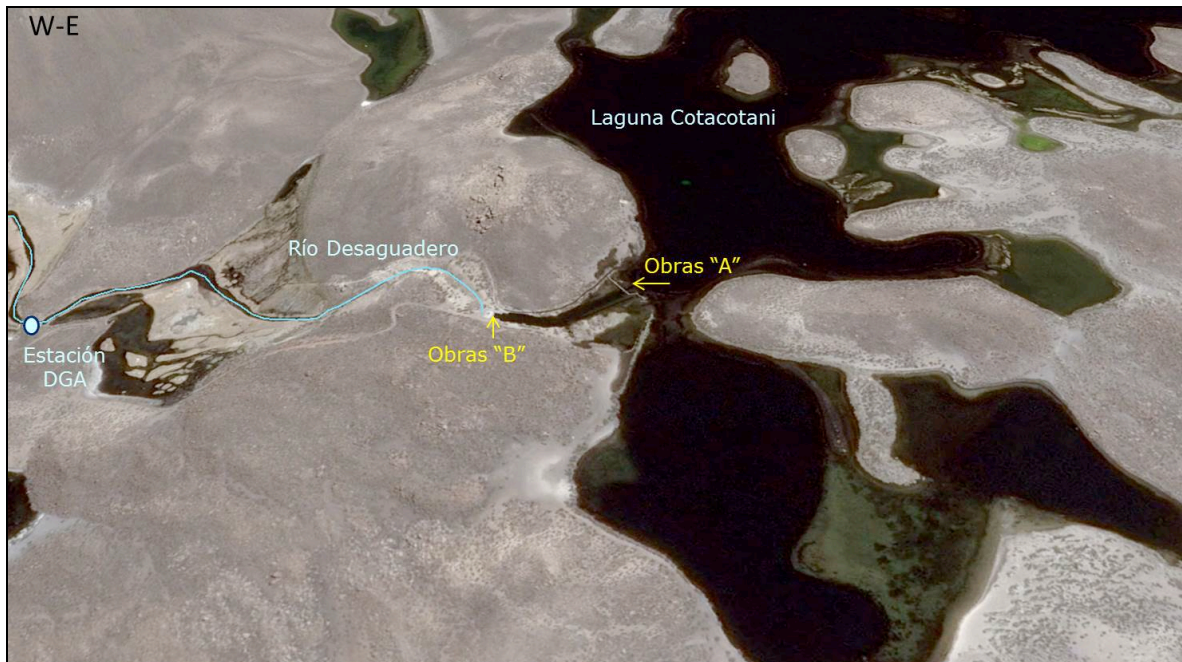


Figura 11-28. Localización de las obras hidráulicas de la laguna principal de Cotacotani. Fuente: modificado de Google Earth.

En la **Figura 11-31** se muestran los caudales medios mensuales registrados en la estación de aforo Río Desaguadero en Cotacotani. El régimen observado corresponde a la regulación que se realiza desde las compuertas de la laguna principal de Cotacotani, las cuáles se abren según las necesidades del valle de Azapa. Cuando comienzan las lluvias del invierno altiplánico se realiza el cierre de las compuertas. Por este motivo se observa que los caudales disminuyen durante el periodo diciembre-marzo.



Figura 11-29. Obras de entrega "A" situadas en la desembocadura de la laguna principal de Cotacotani. Fuente: DGA Arica.



Figura 11-30. Obras de entrega "B" situadas a 115 metros de las obras de entrega "A". Fuente: DGA Arica.

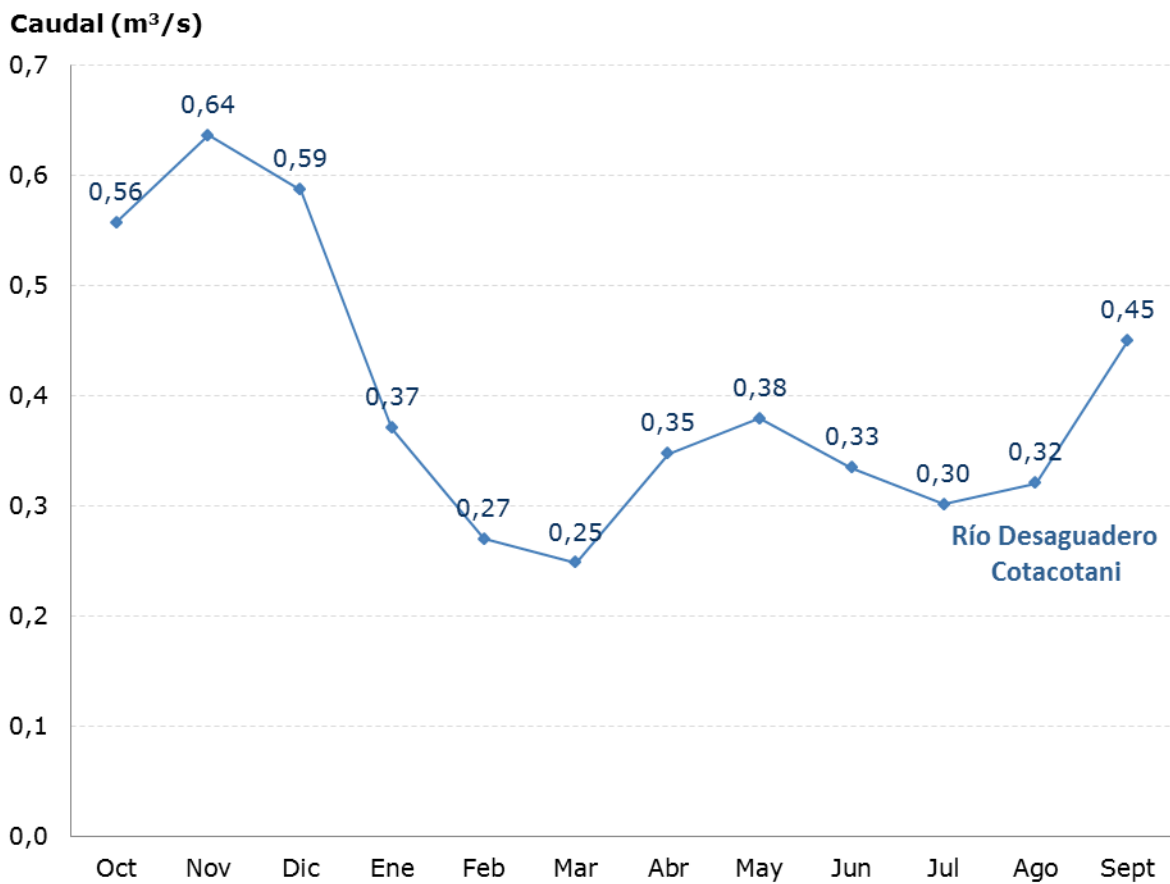


Figura 11-31. Año hidrológico medio en el río Desaguadero en Cotacotani (periodo 1984-2013). Fuente: elaboración propia.

RÍO LAUCA

El río Lauca muestra un régimen pluvial, donde los caudales máximos se producen durante los meses de enero a marzo. Esto es producto de las lluvias altiplánicas que ocurren durante los meses de verano, fenómeno conocido como invierno altiplánico. Durante el resto de meses los caudales son bastante similares al no mostrar variaciones importantes. Este régimen pluvial se aprecia en las dos estaciones existentes en el río Lauca (**Figura 11-32**).

El canal Lauca es la obra principal para la desviación (captación) de las aguas del río Lauca hacia el valle de Azapa. La bocatoma está ubicada en la parte más baja de las ciénagas de Parinacota a 4.350 m.s.n.m. Consiste en una barrera frontal al río en donde existe un conjunto de dos compuertas de acceso al canal Lauca y otras 2 compuertas frontales para permitir la limpieza de sedimentos. Estas obras fueron construidas por la Dirección de Riego entre los años 1953 y 1962 comenzando a operar el 14 de abril de 1962.

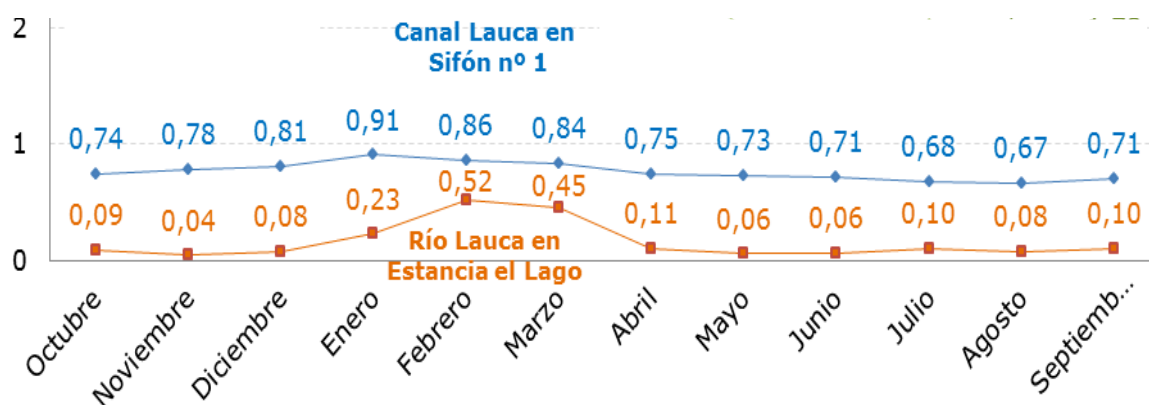


Figura 11-32. Año hidrológico medio en las estaciones del río Lauca (periodo 1984-2013). Fuente: elaboración propia.

11.6.2 CAUDALES MEDIOS ANUALES

Los caudales medios anuales se analizaron con el objetivo de obtener información sobre el comportamiento de cada cuenca y la variación en el tiempo de los caudales de los ríos y del canal Lauca. En primer lugar se analizaron los caudales medios anuales y posteriormente la variación interanual del periodo 1984-2013.

CAUDALES MEDIOS ANUALES

Los caudales mínimos se presentan en el río Desaguadero en Cotacotani. El río Desaguadero en Cotacotani tiene un promedio anual de 0,4 m³/s. El río Lauca en Estancia el Lago tiene un caudal promedio anual de 0,16 m³/s. Esto es porque el canal Lauca se lleva gran parte del agua del río Lauca, con un promedio anual de 0,76 m³/s. (**Tabla 11-13**). Por lo tanto, para observar el verdadero caudal del río se deben sumar ambos caudales y así obtener la producción de la subcuenca. De esta forma, el caudal medio anual sería de 0,92 m³/s.

Estación monitoreo	Altitud (msnm)	Caudal medio anual (m ³ /s)			
		Mínimo	Máximo	Promedio	Desviación estándar
Río Desaguadero Cotacotani	4.500	0,20	0,83	0,40	0,22
Canal Lauca en Sifón N° 1	4.384	0,50	1,19	0,76	0,24
Río Lauca en Estancia El Lago	4.370	0,03	0,89	0,16	0,26

Tabla 11-13. Caudal medio mínimo, máximo y promedio anual para las estaciones de aforo existentes en la cuenca del río Lauca. Fuente: elaboración propia.

Para conocer mejor el comportamiento de cada subcuenca se calculó el caudal específico, definido como el caudal medio anual dividido por el área de la subcuenca de aporte. Se expresa en litros por segundo por kilómetro

cuadrado, y permite evaluar aproximadamente la capacidad de aporte en proporción a sus áreas o rendimiento. Esta información se dispone en la **Tabla 11-14** para cada una de las subcuencas.

Estación monitoreo	Área de captación (Km²)	Caudal promedio anual (L/s)	Caudal/Área (L/s/Km²)
Río Desaguadero Cotacotani	100	400	4,00
Río Lauca en Estancia El Lago*	206	523	2,54

Tabla 11-14. Relación entre el área de captación y el caudal promedio anual. Fuente: elaboración propia.

La subcuenca de río Desaguadero en Cotacotani y la del río Lauca en Estancia el Lago* tienen un comportamiento intermedio y una relación similar, de 4,00 L/s/Km² y 2,54 L/s/Km² respectivamente. El caudal en el río Lauca en Estancia el Lago se restituyó a régimen natural mediante la Ecuación 11-2

$$Q_{\text{Subcuenca Río Lauca en Estancia el Lago}} = Q_{\text{Estación río Lauca en Estancia el Lago}} - Q_{\text{Estación Río Desaguadero Cotacotani}} + Q_{\text{Estación Río Lauca en Sifón N° 1}}$$

Ecuación 11-2

Donde, Q : caudal promedio anual [L/s].

VARIACIÓN INTERANUAL

La variación interanual permitió determinar los años húmedos y los años secos del periodo de estudio, desde el año 1984 hasta el año 2013. Las extracciones realizadas al río Lauca se cuantificaron mediante la estación Canal Lauca en Sifón N° 1. El canal Lauca tiene una tendencia constante de las extracciones al ser una obra hidráulica regulada, con un promedio de 0,76 m³/s. El caudal en la estación de río Lauca en Estancia el Lago también se encuentra afectado por la regulación que ejerce el canal regulado, y por lo tanto no muestra su régimen natural.

No obstante lo anterior, existe un *peak* máximo en el río Lauca en Estancia el Lago de 0,89 m³/s en el año 2001. Por tanto, el año 2001 correspondería al año más húmedo del periodo 1984-2013 (**Figura 11-33**).

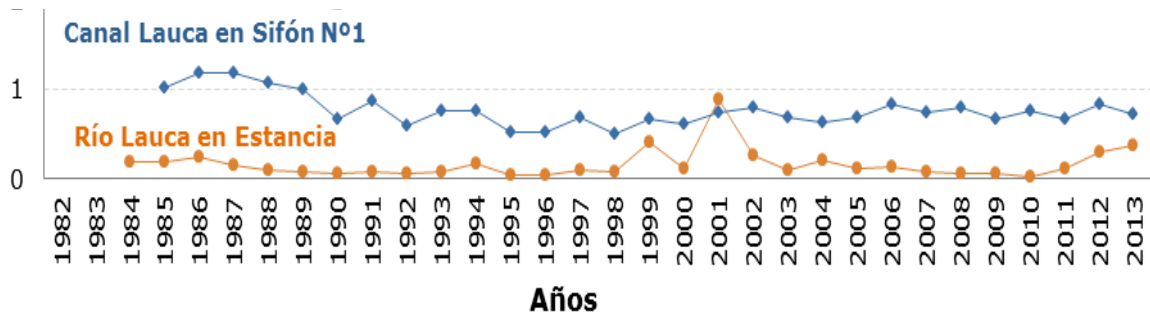


Figura 11-33. Variación anual de los caudales promedio anuales aforados en el río Lauca y extracción en canal Lauca. Fuente: elaboración propia.

La estación de Río Desaguadero en Cotacotani muestra una marcada variabilidad interanual, la cual tiene un mínimo de $0,20 \text{ m}^3/\text{s}$ en el año 1999 y un máximo de $0,83 \text{ m}^3/\text{s}$ en el año 1987. Se observa que para los años 1987, 1988 y 1999 se da un salto de los caudales (**Figura 11-34**).

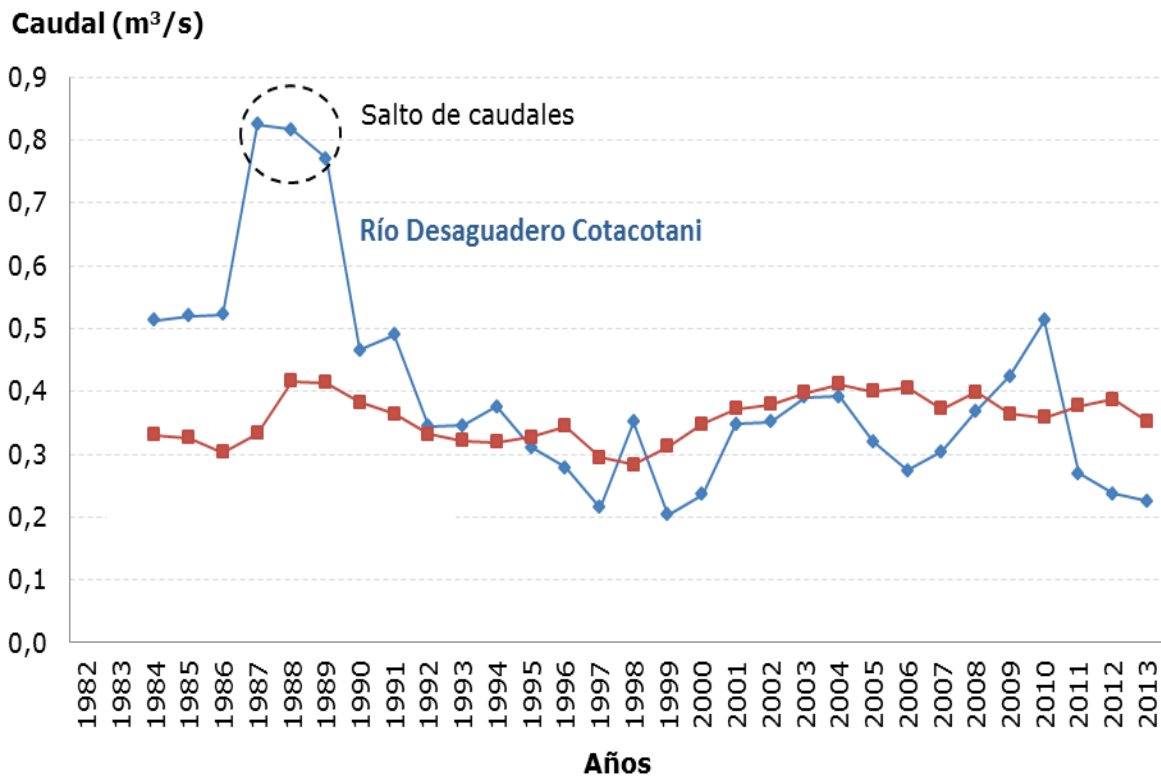


Figura 11-34. Variación anual de los caudales promedio anuales aforados en el río Guallatire en Guallatire y en el río Desaguadero Cotacotani. Fuente: elaboración propia.

11.6.3 CURVAS DE PROBABILIDAD DE EXCEDENCIA

La probabilidad de excedencia se estimó a través de métodos estadísticos: análisis de frecuencia. El objetivo del análisis de frecuencia de la serie de

caudales mensuales es determinar si los años secos y los años lluviosos mantienen el mismo comportamiento que el año hidrológico medio.

Se calcularon los caudales medios mensuales para las probabilidades de excedencia de 5%, 10%, 20%, 50%, 85%, 90% y 95% para cada estación.

RIO DESAGUADERO

En el análisis de los caudales medios mensuales se observó la regulación antrópica que presenta este río. En la salida de las lagunas de Parinacota existen unas compuertas que regulan el caudal que fluye hacia el río Desaguadero y posteriormente hacia el canal Lauca.

Los caudales medios mensuales para distintas probabilidades de excedencia muestran diferentes comportamientos según sean años húmedos o secos (**Figura 11-35**).

En años húmedos los caudales mayores se presentan en los meses de octubre, noviembre, diciembre y mayo, mientras que los menores de enero a marzo y de junio a agosto.

En años secos los caudales más elevados se producen sólo en los meses de octubre a noviembre, pero los más bajos se observan de enero a marzo.

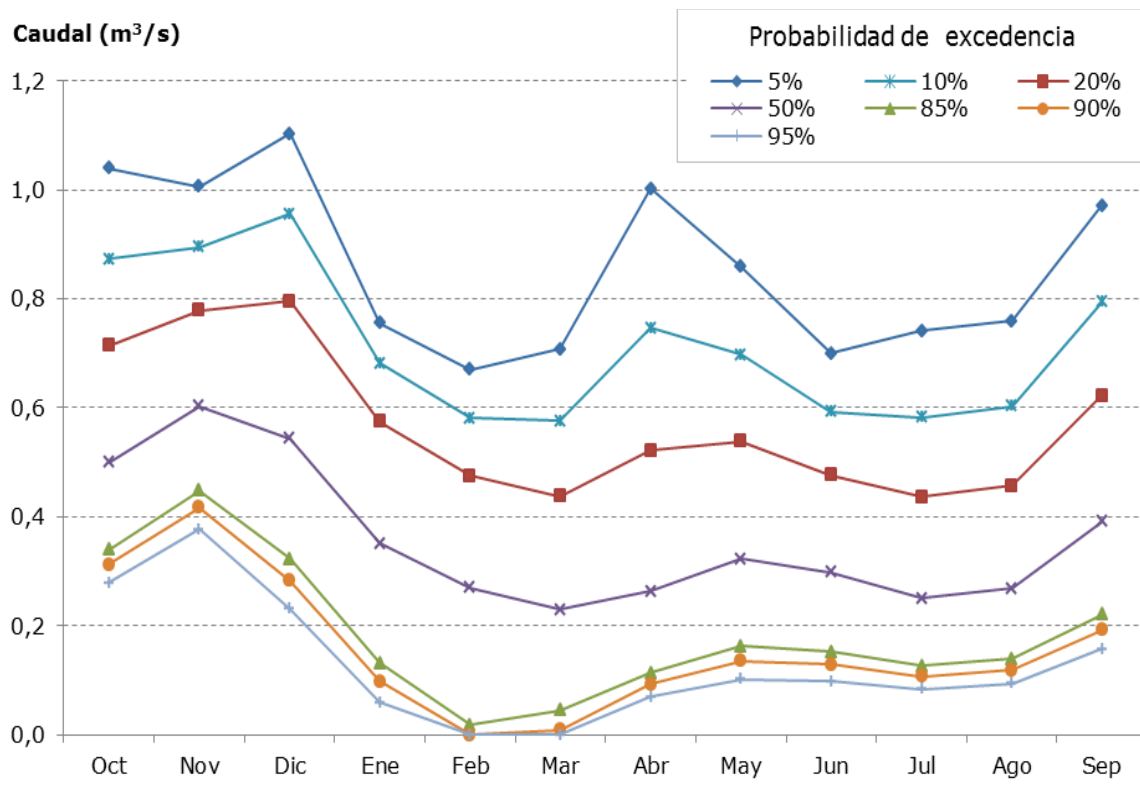


Figura 11-35. Caudales medios mensuales para distintas probabilidades de excedencia en la estación "Río Desaguadero en Cotacotani" (periodo 1984-2013). Fuente: elaboración propia.

RIO LAUCA

En el río Lauca se analizaron las curvas de probabilidad de excedencia para la estación de Río Lauca en Estancia el Lago. No se calculó para la estación Río Lauca en Sifón N° 1 por ser un canal que está regulado y no contempla la variación natural del río Lauca.

El análisis de caudales medios mensuales mostró que presentan un régimen pluvial, ya que los caudales más elevados se producen durante los meses de enero a marzo a causa de las lluvias altiplánicas que ocurren durante los meses de verano.

Al calcular los caudales medios mensuales para distintas probabilidades de excedencia se observa que tanto en los años húmedos (menor probabilidad de excedencia) como en los años secos (mayor probabilidad de excedencia), los caudales más elevados continúan manteniéndose durante los meses de verano, mientras que en el resto del año se observan caudales bastante similares y no muestran variaciones importantes (**Figura 11-36**).

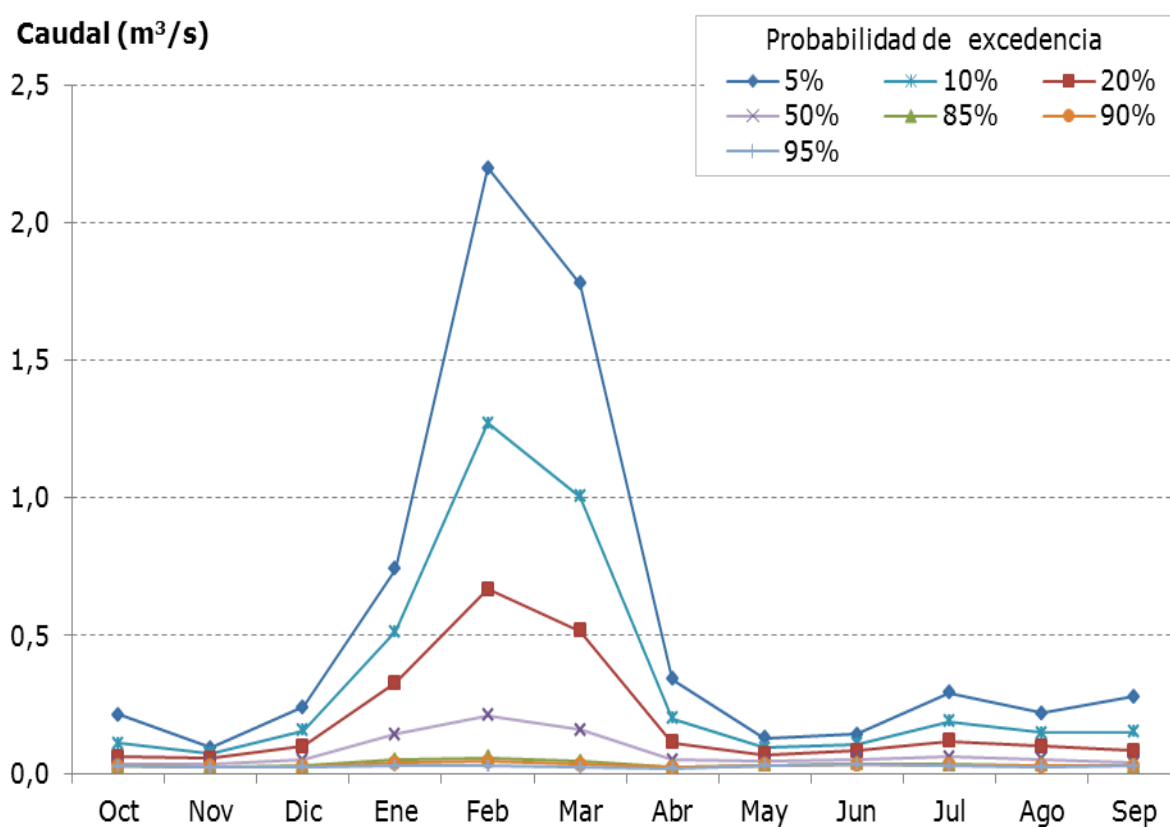


Figura 11-36. Caudales medios mensuales para distintas probabilidades de excedencia en la estación "Río Lauca en Estancia el Lago" (periodo 1984-2013). Fuente: elaboración propia.

12 ANEXO- SEGUNDA CAMPAÑA DE TERRENO ABRIL 2015

A continuación se presentan los resultados de las muestras tomadas en la segunda campaña de terreno ejecutada durante el mes de abril del 2015. El orden en que aparecen los resultados es el mismo que ha sido usado para presentar los resultados de la primera campaña de septiembre 2014 al interior del cuerpo de la memoria.

En la Figura 12-1 se muestra la ubicación y los valores de las temperaturas registradas durante la campaña de abril de 2015.

En la Figura 12-2 se presenta la distribución espacial del pH registrado en abril del 2015.

El rango de conductividad eléctrica registrada durante la campaña de abril de 2015 varía entre 180 y 1.060 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figura 12-3).

En la Figura 12-4 se muestran las ubicación y la composición hidroquímica de las aguas superficiales y subterráneas recogidas en abril de 2015.

En la Figura 12-5 se ubican las muestras tomadas en la tercera campaña, 25-LS-3, 24-LS-3, 23-LS-3 y 40-LS-3.

En la Figura 12-6 se muestra el mapa de la zona de estudio con los rangos de los valores de las concentraciones de As analizados en la campaña de muestreo de abril 2015.

En la Figura 12-7 se presentan las concentraciones de Fe para la campaña de abril del 2015, en donde sólo la muestra 40-LS-3 muestra un valor sobre la norma.

En la Figura 12-8 se observa que en 6 puntos analizados en el sector central-norte de la cuenca en abril de 2015 han sufrido un descenso en la concentración de boro en relación con la campaña de septiembre 2014, siendo inferior a 0,5 mg/L. Estas muestras son: 24-LS-3, 38-LV-3. Este descenso en las concentraciones puede ser causa de la dilución producida por las aguas de lluvia que ingresan al sistema durante los meses de verano.

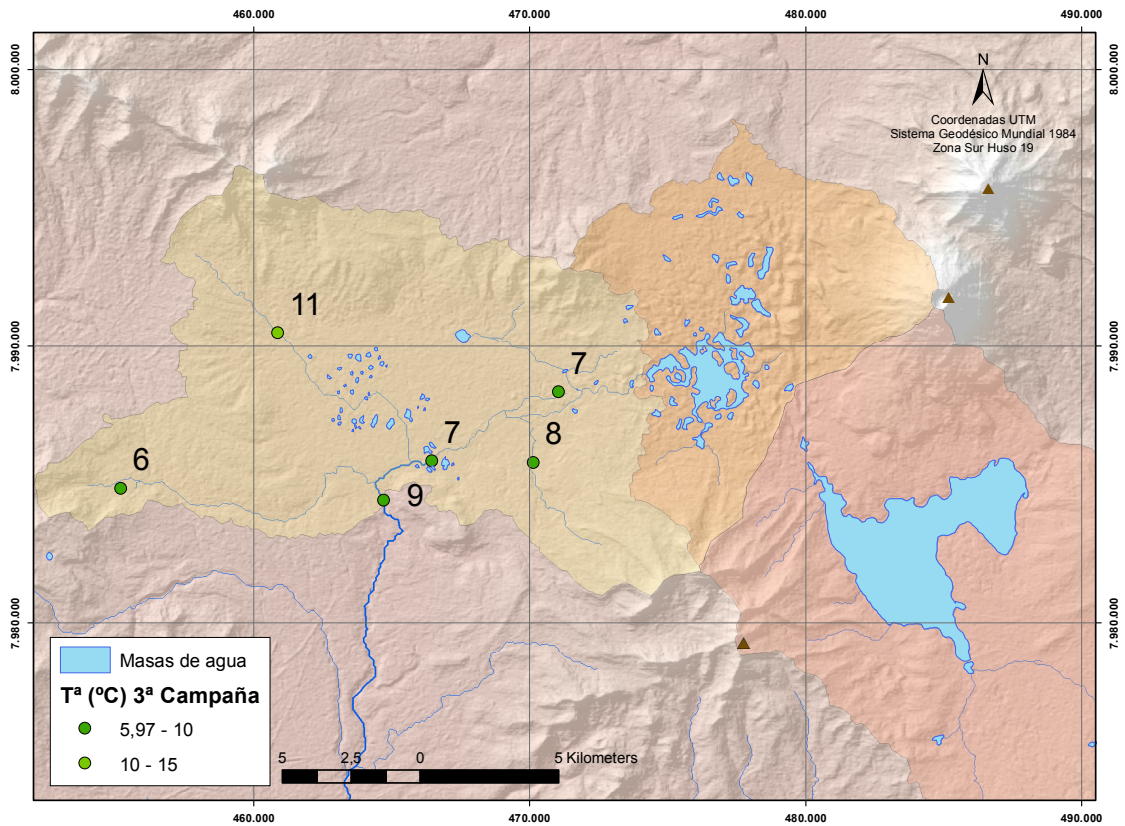


Figura 12-1. Mapa de los valores de temperatura (°C) medidos en la tercera campaña de terreno, abril de 2015. Fuente: elaboración propia.

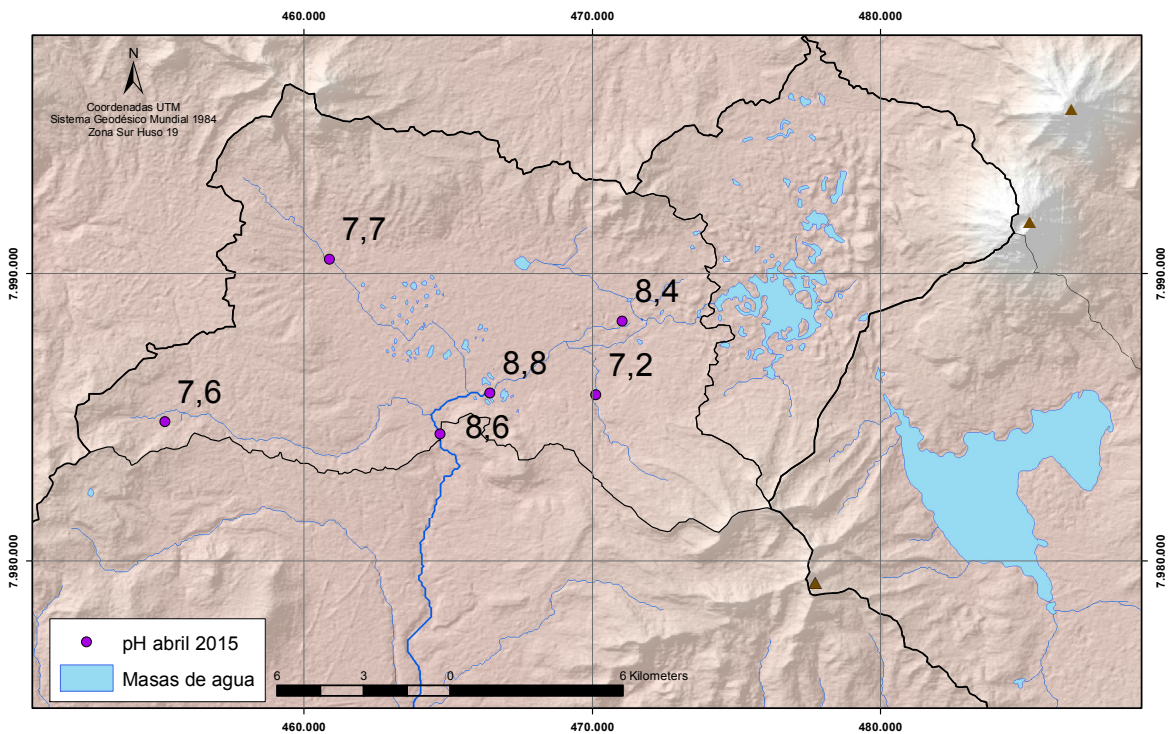


Figura 12-2. Mapa de los valores de pH medidos en la tercera campaña de terreno, abril 2015. Fuente: elaboración propia.

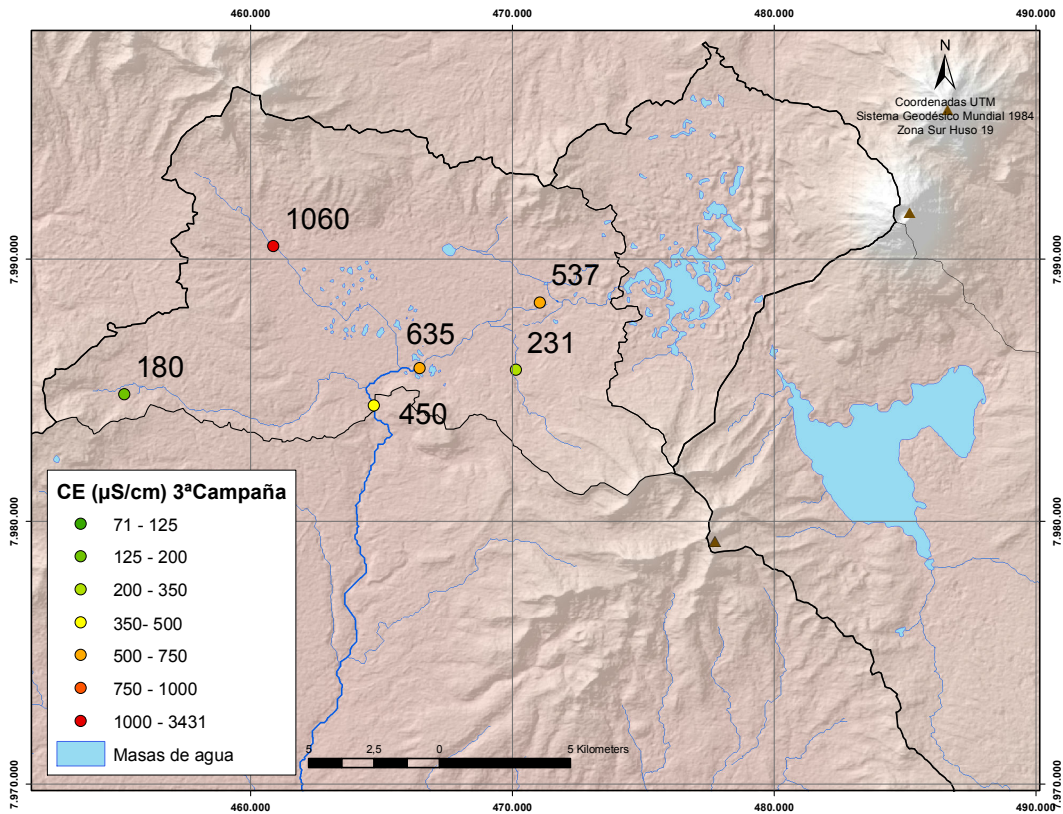


Figura 12-3. Mapa de los valores de conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) medidos en la tercera campaña de terreno, abril 2015. Fuente: elaboración propia.

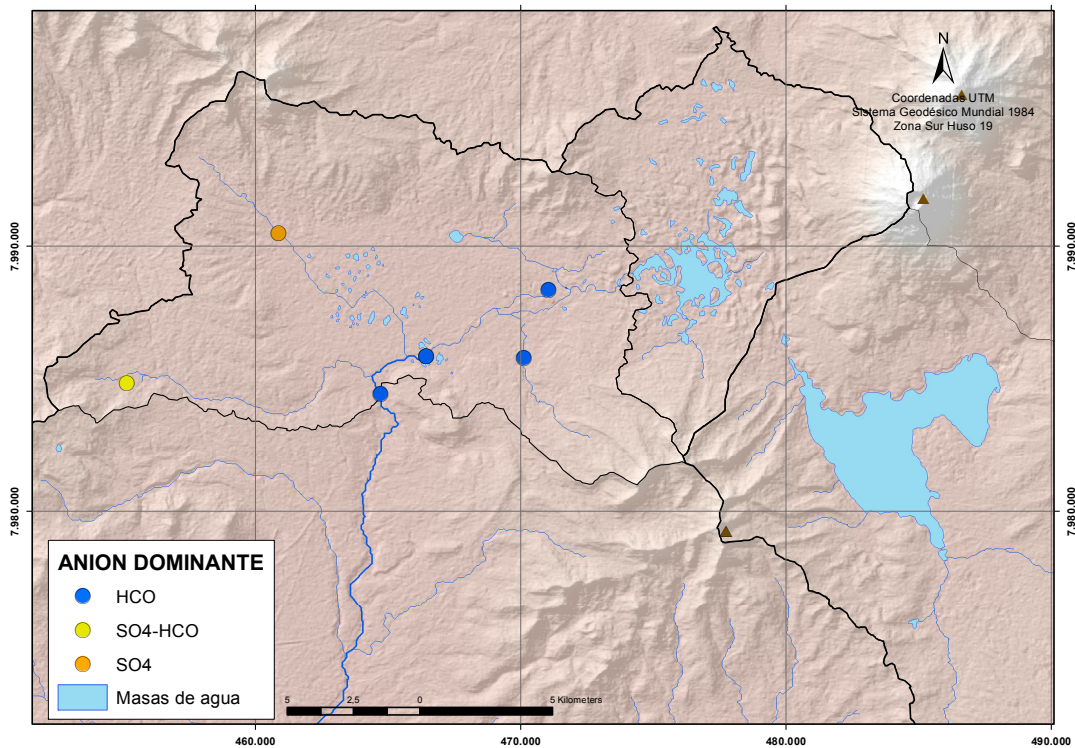


Figura 12-4. Mapa de los sectores de la cuenca del río Lauca, muestras recogidas en abril de 2015. Fuente: elaboración propia.

Sector Parinacota-Cotacotani (Abril 2015)

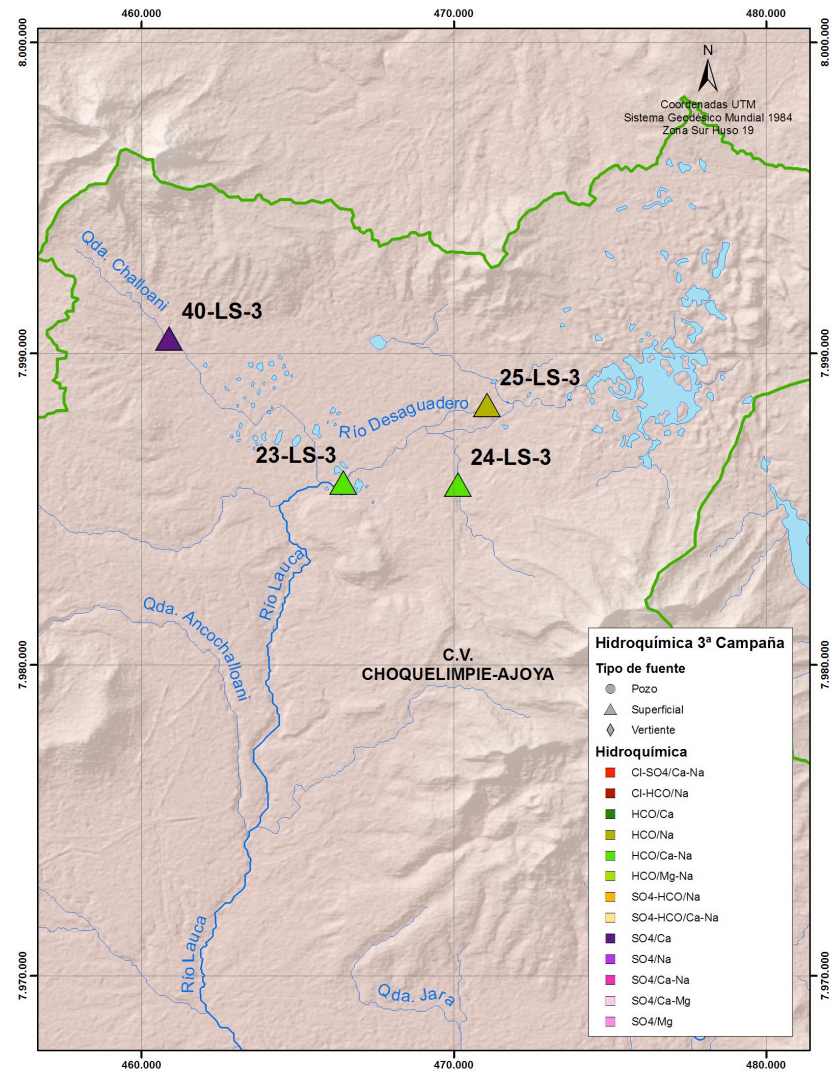
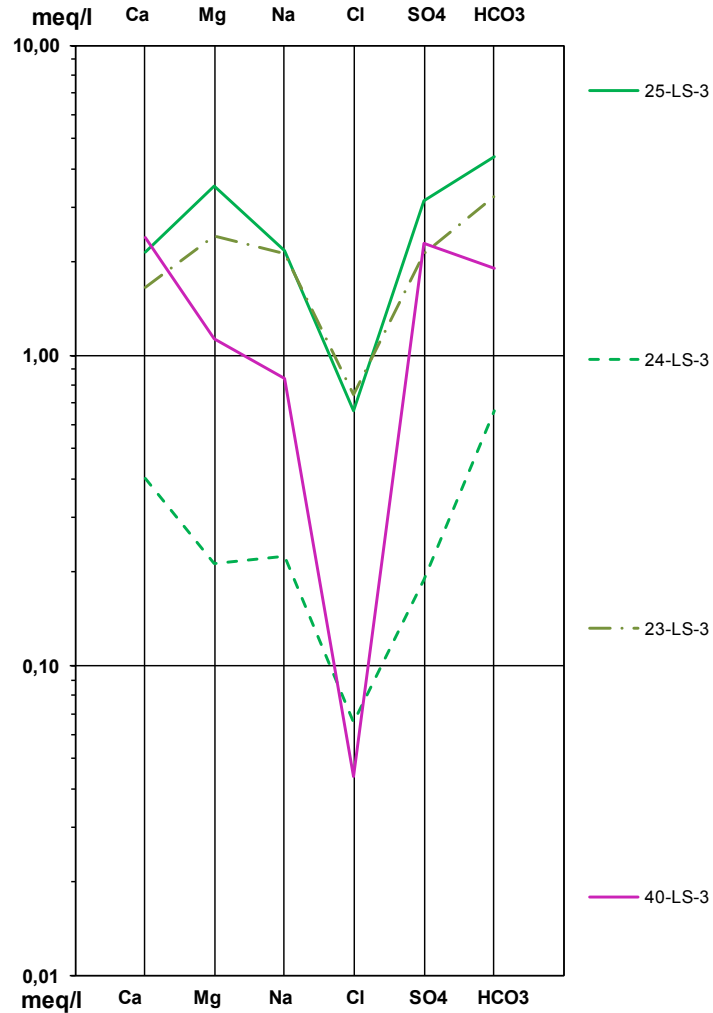


Figura 12-5. Diagrama Schöeller y mapa de ubicación de las muestras en el sector Parinacota-Cotacotani en la tercera campaña de terreno, abril 2015. Fuente: elaboración propia.

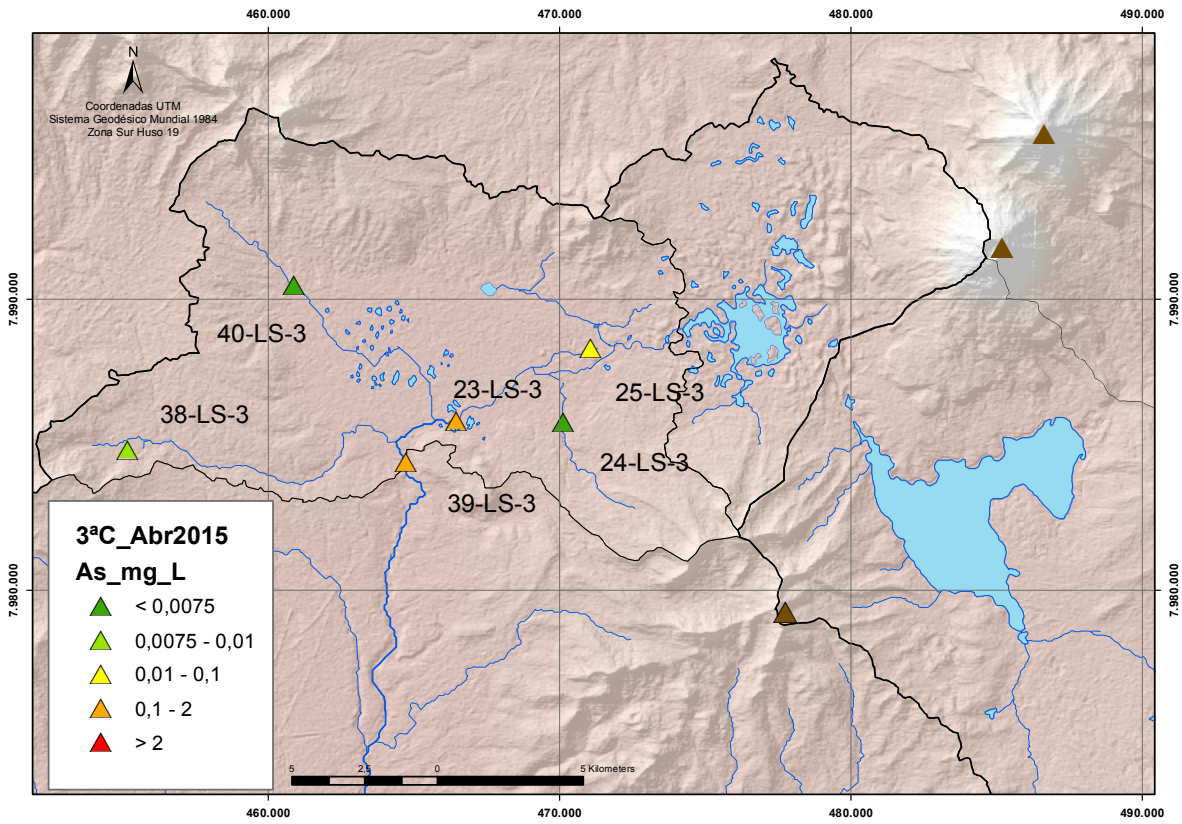


Figura 12-6. Mapa de concentración de As (mg/L) en los puntos de muestreo de la tercera campaña de terreno, abril 2015. Fuente: elaboración propia.

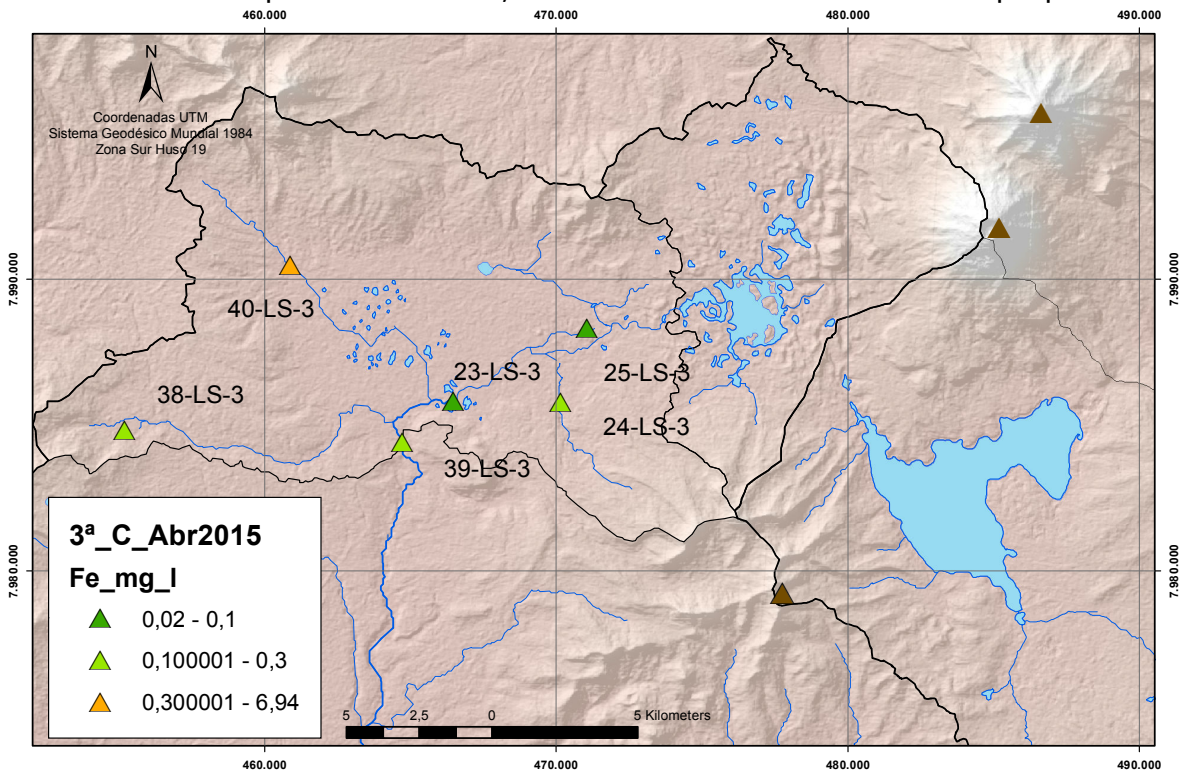


Figura 12-7. Mapa de concentración de Fe (mg/L) en los puntos de muestreo de la tercera campaña de terreno, abril 2015. Fuente: elaboración propia.

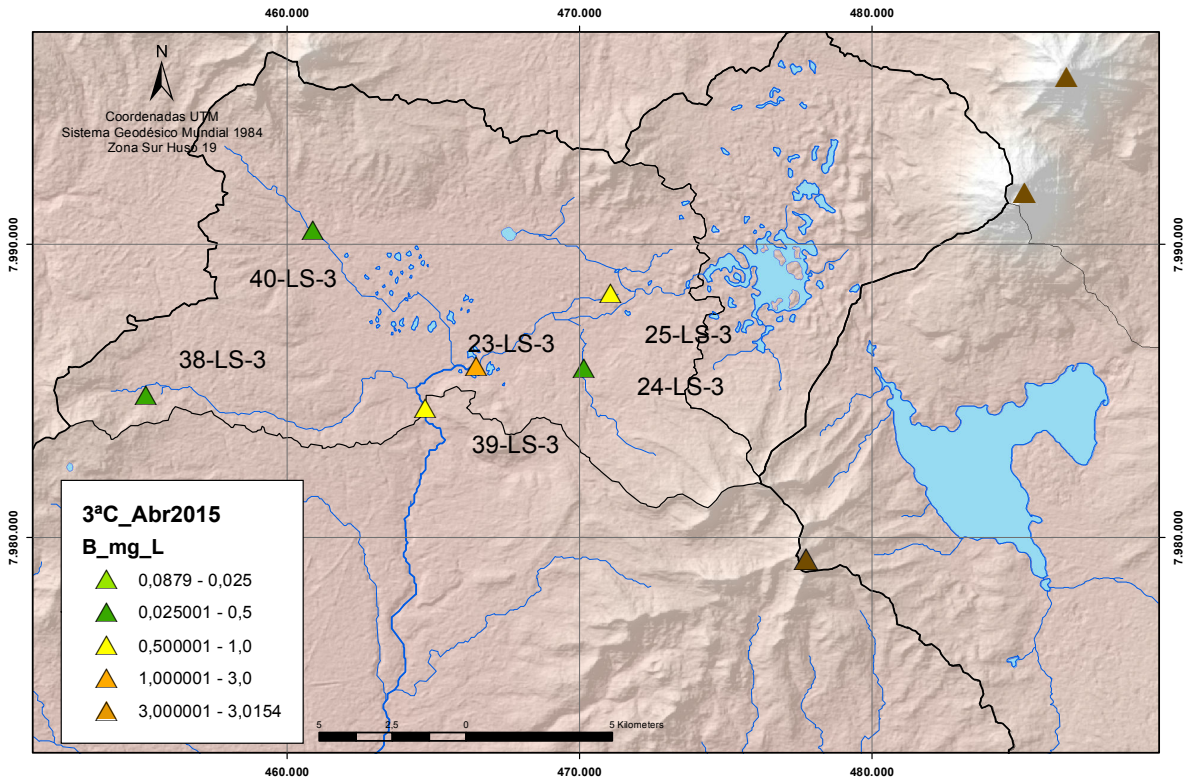


Figura 12-8. Mapa que muestra la concentración de B (mg/L) en los puntos de muestreo de la tercera campaña de terreno, abril 2015. Fuente: elaboración propia.

13 ANEXO - DATOS HIDROQUÍMICA

Muestra	Coord.	Coord.	Fecha	CE	pH	Cl	NO3	NO2	SO4	Alcalinidad Parcial (CaCO3)	Alcalinidad Total (CaCO3)	Bicarbonato (CaCO3)	As	B	Ca	Fe	K	Mg	Na	SiO2	Balance Ionico (%)
	Este	Norte	muestra	uS/cm		mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	mg/l
08-LS-1	485709	7978552	sept-14	338.00	8.4	3.9	20.6	<0,039	67.3	<3	75.0	71.4	0.0	0.1	19.5	0.1	3.8	12.6	26.3	55.2	-1.4
09-LV-1	484854	7975408	sept-14	65.00	6.4	2.8	0.9	<0,039	2.8	<3	22.0	22.3	0.0	0.2	5.6	11.4	2.6	0.9	4.3	23.1	1.5
12-LV-1	480448	7984782	sept-14	99.00	7.7	1.9	2.4	<0,039	16.3	<3	23.0	22.8	0.0	0.1	5.9	<0,02	3.1	1.6	7.1	36.2	-4.6
13-LV-1	469831	7991815	sept-14	68.00	6.6	1.3	3.0	<0,039	<0,112	<3	25.0	25.0	0.0	0.1	5.4	3.2	2.2	1.0	5.0	42.2	3.5
23-LS-1	466460	7985840	sept-14	853.00	8.8	28.8	9.0	<0,039	129.0	15.0	198.0	168.9	0.2	0.9	35.8	0.0	6.7	33.2	59.7	17.5	-2.1
24-LS-1	470119	7985816	sept-14	113.00	7.7	1.9	3.7	<0,039	13.4	<3	30.0	29.6	0.0	0.1	7.9	0.3	2.2	1.8	7.1	38.7	-4.4
25-LS-1	471053	7988338	sept-14	980.00	9.1	26.9	<0,203	<0,039	181.0	32.0	237.0	173.7	0.0	0.5	51.1	0.0	7.0	38.9	58.6	13.1	-4.3
26-LS-1	476247	7986356	sept-14	1249.00	8.6	45.7	15.0	9.3	182.0	17.0	338.0	304.2	0.0	0.8	36.4	0.1	24.3	53.3	98.2	24.2	-4.1
37-LS-1	464803	7984027	sept-14	990.00	7.4	48.3	1.0	<0,039	128.0	<3	143.0	142.8	0.4	2.6	27.4	0.0	6.5	25.8	65.5	18.2	-2.9
38-LV-1	455344	7984754	sept-14	103.00	7.4	5.1	6.8	<0,039	16.5	<3	17.0	16.6	0.0	0.2	7.5	0.0	2.8	1.9	6.8	51.1	-2.2
39-LS-1	464715	7984414	sept-14	593.00	8.8	17.3	2.4	<0,039	83.2	11.0	142.0	119.1	0.2	0.7	33.4	0.1	4.7	15.9	39.5	29.1	-2.8
23-LS-3	466459	7985843	abr-15	648.00	8.8	26.5	3.4	<0,039	102.0	16.0	195.0	163.3	0.1	1.1	33.1	0.1	7.0	29.5	48.9	19.7	3.4
24-LS-3	470135	7985786	abr-15	88.00	7.2	2.3	1.3	<0,039	9.1	<3	33.0	32.9	0.0	0.1	8.1	0.3	3.1	2.6	5.2	44.1	0.8
25-LS-3	471053	7988338	abr-15	784.00	8.4	23.5	1.4	<0,039	152.0	7.0	233.0	218.5	0.0	0.5	43.2	0.0	7.2	42.6	49.9	11.8	3.1
38-LS-3	455180	7984847	abr-15	164.00	7.6	8.1	1.4	<0,039	28.4	<3	33.0	32.9	0.0	0.4	12.5	0.1	5.8	5.1	7.7	45.2	0.7
39-LS-3	464719	7984419	abr-15	449.00	8.6	12.8	1.4	<0,039	72.9	8.0	145.0	129.2	0.1	0.6	33.0	0.1	3.3	15.3	33.7	36.4	3.7
40-LS-3	460882	7990485	abr-15	411.00	7.7	1.6	3.9	<0,039	110.0	<3	95.0	94.6	0.0	0.1	47.9	0.9	6.3	13.7	19.4	50.3	2.7

Tabla 13-1. Datos de nombres, coordenadas e hidroquímica de todas las muestras obtenidas durante ambas campañas de muestreo. Fuente: elaboración propia.