



**REPUBLICA DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCION GENERAL DE AGUAS**

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

ETAPA 2

INFORME FINAL PARTE IV

Hidroggeoquímica e Isotopía Regional del Altiplano de Chile

REALIZADO POR:

**Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental
Pontificia Universidad Católica de Chile**

S.I.T. N° 195

Santiago, Noviembre de 2009

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas

Ingeniero Civil Sr. Sergio Bitar C.

Director General de Aguas

Abogado Sr. Rodrigo Weisner L.

Departamento de Estudios y Planificación

Ingeniero Civil Sr. Pedro Rivera I.

Inspector Fiscal

Ingeniero Civil Sr. Luis Rojas B.

EQUIPO TÉCNICO

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA Y AMBIENTAL PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE

Director de Proyecto

Ing. Sr. José Muñoz P.

Jefe de Proyecto

Ing. Sr. Pablo Rengifo O.

Ingeniero a Cargo

Ing. Sr. José Yáñez L.

Especialistas y Profesionales

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

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

Tesistas, Memoristas y Ayudantes

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



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



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

INFORME N^o: 460625

FECHA: 25 DE NOVIEMBRE 2009

“DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS, MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS”



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



1. Tipo Informe Informe Técnico Final	2. Cuerpo del Informe 157 páginas (incluye portada)
3. Título del Proyecto 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	4. Fecha Informe 25 de Noviembre 2009
5. Autor (es) Director de Proyecto: José Francisco Muñoz Pardo Jefe de Proyecto: Pablo Rengifo Oyarce Ingeniero a Cargo: José Yáñez López	6. Contrato MOP – DGA N° 235
6. Nombre y Dirección de la Organización Investigadora DICTUC; Pontificia Universidad Católica de Chile Vicuña Mackenna N° 4860, Casilla 306 – Correo 22, Macul - Santiago	7. Período de Investigación Julio 2008 – Noviembre 2009
8. Antecedentes de la Institución Mandante Nombre: Dirección General de Aguas, MOP. Dirección: Morande 59, 8° Piso RUT: 61.202.200-0 Teléfono: (02) 633 9940	9. Contraparte Técnica Nombre: Luis Rojas Badilla Cargo: Inspector Fiscal
10. Resumen El estudio de los recursos hídricos del altiplano chileno consideró los aspectos hidrográficos, hidrológicos, hidrogeoquímicos, isotópicos e hidrogeológicos de las cuencas cerradas que se ubican en esta franja del norte de Chile. El levantamiento de información sumado a trabajos de terreno y de gabinete orientados a complementar aquellos temas considerados más relevantes son reportados en los 10 tomos de documentos.	

Sr. José Francisco Muñoz P.
Director de Proyecto

Jaime Retamal
DICTUC

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

PRESENTACIÓN

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

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

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

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

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

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

El presente informe corresponde a la **Parte IV** del estudio, denominada “**Hidrogeoquímica e Isotopía Regional del Altiplano de Chile**”.

AGRADECIMIENTOS

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

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

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	MARCO GENERAL DEL ESTUDIO	1
2	INTRODUCCIÓN.....	3
2.1	Objetivos.....	3
2.2	Alcances.....	4
3	MARCO TEÓRICO	5
3.1	Composición y Concentración Química de las Aguas.....	5
3.2	Composiciones Isotópicas.....	12
4	RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES	21
4.1	Recopilación de Antecedentes	21
4.2	Depuración y Tratamiento de la Base de Datos.....	23
4.3	Análisis Estadístico de la Información	26
4.4	Análisis Regional de la Información.....	31
4.4.1	I Región de Tarapacá y XV Región de Arica y Parinacota	33
4.4.2	II Región de Antofagasta.....	33
4.4.3	III Región de Atacama.....	34
5	HIDROGEOQUÍMICA REGIONAL	41
5.1	Introducción y Metodología.....	41
5.2	Parámetros Físico-Químicos.....	41
5.3	Elementos Mayoritarios y Composiciones Químicas	45
5.4	Elementos Minoritarios.....	49
5.5	Variabilidad Espacial de Concentraciones y Composiciones	51
5.6	Calidad de las Aguas.....	56
6	HIDROGEOQUÍMICA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS	63
6.1	Parámetros Físico-químicos.....	63
6.2	Elementos Mayoritarios y Composiciones Químicas	64
6.3	Elementos Minoritarios.....	68
6.4	Variabilidad Temporal y en Profundidad	69
7	HIDROGEOQUÍMICA DE LAS AGUAS SUPERFICIALES	73
7.1	Parámetros Físico-químicos.....	73
7.2	Elementos Mayoritarios y Composiciones Químicas	74
7.3	Elementos Minoritarios.....	78
7.4	Variabilidad Temporal.....	79

8	CARACTERIZACIÓN ISOTÓPICA.....	81
8.1	Valores de Deuterio y Oxígeno-18 en Precipitaciones	81
8.2	Valores de Deuterio y Oxígeno en Aguas Subterráneas	85
8.3	Valores de Deuterio y Oxígeno en Aguas Superficiales.....	87
9	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	91
10	REFERENCIAS	97
ANEXO I	FICHAS RESUMEN DE ESTUDIOS REVISADOS.....	105
ANEXO II	BASE DE DATOS CON ANÁLISIS QUÍMICOS E ISOTÓPICOS DE AGUA.....	133

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1: Representación gráfica de la concentración relativa de iones en un diagrama de Piper (modificado de Custodio y Llamas, 1983).	9
Figura 3.2: Ejemplos de concentraciones químicas según diagramas de Stiff y Stiff modificado.....	10
Figura 3.3: Ejemplo de diagrama de Schoeller.	11
Figura 3.4: Distribución de valores representada con un diagrama de caja.	11
Figura 3.5: Variación del gradiente isotópico desde la zona del ecuador hacia los polos.....	14
Figura 3.6: Direcciones de flujo del agua en los distintos niveles de humedad h , según el modelo de evaporación en condiciones de no equilibrio.	16
Figura 3.7: Relación $\delta D/\delta^{18}O$ en aguas afectadas por evaporación.	17
Figura 3.8: Mezcla de aguas evaporadas de un suelo con aguas de precipitaciones infiltradas en un perfil de suelo.	18
Figura 3.9: Desplazamiento de la composición isotópica de las aguas por el intercambio con minerales del terreno y mezcla con aportes de sublimación de nieve.	19
Figura 4.1: Tipos de puntos de muestreo considerados en la clasificación general de las aguas.....	23
Figura 4.2: Proporción de los puntos de muestreo que corresponden a cada región.....	27
Figura 4.3: Comparación proporcional del tipo de agua analizada en cada punto de muestreo, a nivel global y regional.....	27
Figura 4.4: Comparación del tipo de información disponible en cada región.....	28
Figura 4.5: Calidad de los análisis de elementos mayoritarios en cada región.	29
Figura 4.6: Porcentaje de puntos de muestreo con error de balance correcto.	29
Figura 4.7: Porcentaje de puntos que incluyen datos de elementos minoritarios y trazas.	30
Figura 4.8: Distribución regional de los puntos de muestreo con datos isotópicos.....	30
Figura 4.9: Proporción de información isotópica relacionada con cada tipo de agua.	30
Figura 4.10: Densidad de puntos de muestreo por cuenca.	32
Figura 4.11: Puntos con información química en las regiones de Arica y Parinacota, y de Tarapacá...	35
Figura 4.12: Puntos con información isotópica en las regiones de Arica y Parinacota, y de Tarapacá.	36
Figura 4.13: Puntos con información química en la Región de Antofagasta.	37
Figura 4.14: Puntos con información isotópica en la Región de Antofagasta.....	38
Figura 4.15 Información química recopilada en la Región de Atacama.	39
Figura 4.16 Información isotópica recopilada en la Región de Atacama.....	40
Figura 5.1: Distribución estadística de los parámetros físico-químicos.....	42
Figura 5.2: Comportamiento del pH y temperatura en aguas superficiales (rojo) y subterráneas (gris).	43
Figura 5.3: Relación directamente proporcional entre CE y STD.....	44
Figura 5.4: Distribución de la CE en cada región.	45

Figura 5.5: Distribución estadística de elementos mayoritarios.....	46
Figura 5.6: Composición química según el contenido de Cl^-	47
Figura 5.7: Distribución de las composiciones químicas entre las cuatro regiones.	48
Figura 5.8: Aguas con influencia termal.	49
Figura 5.9: Distribución estadística de las concentraciones de los elementos minoritarios.	51
Figura 5.10: Concentración de Li en relación a la CE por cuenca (AC1: S. de Aguas Calientes 1, AC3: S. de Aguas Calientes 3, ALC: S. de Alconcha, CAN: Cancosa, CAP: S. de Capur, INF: S. de Infieles, ISL: S. de la Isla, LNF: Lgna. del Negro Francisco, MIC: S. de Michincha, PAJ: S. de Pajonales, SUR: S. de Surire).....	52
Figura 5.11: Determinación del rango relativo de concentración promedio de Li y As.	53
Figura 5.12: Mapas de distribución espacial de las concentraciones relativas de Li.	54
Figura 5.13: Mapas de distribución de las concentraciones relativas de As.	55
Figura 5.14: Ubicación de las muestras que cumplen la NCh409.....	60
Figura 5.15: Ubicación de las muestras que cumplen NCh1333.....	61
Figura 6.1: Distribución de los parámetros físico-químicos en aguas subterráneas.....	63
Figura 6.2: Distribución de los elementos mayoritarios de aguas subterráneas.	65
Figura 6.3: Composición química de las aguas subterráneas.	66
Figura 6.4: Composición química de aguas de pozos y napas.	67
Figura 6.5: Composición química de aguas de manantiales y vertientes.	67
Figura 6.6: Distribución de los elementos minoritarios en aguas subterráneas.....	68
Figura 6.7: Variación temporal de la composición química de los elementos mayoritarios de los puntos de muestreo HUA.T003 (izquierda) y HUA.T011 (derecha).....	69
Figura 6.8: Variación temporal de la composición química de los elementos mayoritarios de los puntos de muestreo HUA.F016 (izquierda) y CHU.F002 (derecha).....	70
Figura 6.9: Variación de la composición química con la profundidad en los puntos de muestro LAC.T004 (izquierda) y TEC.T003 (derecha).	71
Figura 6.10: Variación de la composición química con la profundidad en las puntos de muestro AC3.T001 (izquierda) y COL.T001 (derecha).	71
Figura 7.1: Distribución de los parámetros físico-químicos de aguas superficiales.....	73
Figura 7.2: Distribución de los elementos mayoritarios de aguas superficiales.....	75
Figura 7.3: Composición química de las aguas superficiales.	76
Figura 7.4: Composición química de lagunas.	77
Figura 7.5: Composición química de ríos y vertientes.	77
Figura 7.6: Distribución de los elementos minoritarios en aguas superficiales.	78
Figura 7.7: Variación temporal de la composición química en UCH.F006 (izquierda) y HUA.F017 (derecha).....	79

Figura 7.8: Variación temporal de la composición química en CAN.F001 (izquierda) y LAU.F024.1-38 (derecha).....	80
Figura 8.1. Composiciones isotópicas de precipitaciones en el Altiplano chileno.....	82
Figura 8.2: Desajuste de las aguas más enriquecidas en $\delta^2\text{H}$ (detalle Figura 8.1).	84
Figura 8.3: Relación entre la altura topográfica en que cae una precipitación y su composición isotópica promedio ponderada (δD y $\delta^{18}\text{O}$). Elaborado con datos de Aravena et al. (1999) con datos de distintas cuencas de las I y XV Regiones procedentes de lluvias entre 1984 y 1986.	84
Figura 8.4: Composiciones isotópicas de las aguas subterráneas (manantiales y pozos).....	86
Figura 8.5: Composiciones isotópicas de las aguas subterráneas por región	87
Figura 8.6: Composición isotópica de las aguas superficiales.	88
Figura 8.7: Composición isotópica de las aguas subterráneas por región.	89
Figura 9.1: Asociación del tipo de agua a la salinidad y patrón de flujo.	92

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1: Fuentes de información hidrogeoquímica a nivel regional.	22
Tabla 4.2: Nomenclatura utilizada para identificar muestras según cuenca de origen.	25
Tabla 4.3: Puntos de muestreo con ID y tipo de información que entrega.	26
Tabla 4.4: Cobertura espacial de la información disponible a nivel regional.	31
Tabla 4.5: Cuencas con densidad de puntos de muestreo alta (*cuencas piloto).	31
Tabla 4.6: Cuencas con densidad de puntos de muestreo media (*cuencas piloto).	32
Tabla 5.1: Valores máximos y mínimos de los elementos mayoritarios (mg/L).....	46
Tabla 5.2: Resumen de la distribución de las concentraciones (en mg/L) de los elementos minoritarios más comunes.	50
Tabla 5.3: Porcentaje de muestras que no cumplen las normas respectivas.....	57
Tabla 5.4: Calidad de las aguas en puntos de muestreo según norma chilena de agua potable (NCh409).	58
Tabla 5.5: Calidad de las aguas en puntos de muestreo según norma chilena para aguas de riego (NCh1333).....	59
Tabla 6.1: Distribución de los elementos mayoritarios en aguas subterráneas.	65
Tabla 7.1: Distribución de los elementos mayoritarios de aguas superficiales.	75
Tabla 8.1: Valores de LMWL descritas anteriormente en la zona.	82

1 MARCO GENERAL DEL ESTUDIO

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

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

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

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

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

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

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

El estudio considera un análisis a escala regional y otro a nivel local o sistemas pilotos. En ambas escalas de trabajo se abordan, fundamentalmente, aspectos geológicos, hidrológicos, hidrogeoquímicos e hidrogeológicos. Los sistemas piloto son unidades seleccionadas a nivel de cuencas hidrográficas en conjunto con personal de la DGA, actores locales e instituciones

de la zona, en base a criterios de carácter ambiental, demanda comprometida e información disponible.

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

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

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

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

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

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

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

2 INTRODUCCIÓN

Este capítulo recopila y presenta prácticamente toda la información hidrogeoquímica que se ha generado en instituciones y proyectos públicos, o que se encuentra documentada en publicaciones científicas y en informes técnicos sobre el Altiplano de las Regiones XV, I, II y III. Además se han recopilado algunos datos generados por empresas privadas, que han contribuido a ampliar la base de datos que ha sido utilizada posteriormente para realizar un análisis de la información existente (presentada en el ANEXO II).

A modo de presentar de forma clara el trabajo realizado, el presente capítulo se estructura de acuerdo a un orden lógico para el entendimiento del lector, esto es:

- En una primera parte se entrega un marco conceptual hidrogeoquímico, donde se presentan en forma general los conceptos básicos y métodos de análisis utilizados en esta ciencia.
- En una segunda parte, se presenta el proceso de recopilación de antecedentes, el tratamiento de los datos y el análisis de las características de la información a nivel regional, que da cuenta de la confiabilidad y falencias en la información hidroquímica existente en la zona de estudio.
- En una tercera parte, se presenta el análisis y caracterización físico química de las aguas tanto subterráneas como superficiales, y también de precipitaciones, en la zona de estudio. Se explican claramente los procedimientos o metodologías empleadas en el análisis de los datos, las composiciones químicas presentes en las aguas, los elementos con mayor presencia, su variabilidad temporal y la calidad de las mismas de acuerdo a las normas chilenas vigentes de calidad de agua (NCh 409/1, NCh 1333).
- Finalmente se presenta una caracterización isotópica de las aguas del Altiplano para la zona de estudio, realizando una discusión del comportamiento de los isótopos de hidrógeno y oxígeno en aguas subterráneas, superficiales y de precipitación, en relación a los distintos procesos que los afectan.

2.1 Objetivos

En esta parte de carácter regional, se pretende generar una base de datos con información sobre la calidad y composición isotópica del agua a partir de los antecedentes disponibles de la Dirección General de Aguas (DGA), complementándolo con antecedentes bibliográficos especializados y artículos publicados en revistas, congresos y seminarios, tanto nacionales como internacionales, públicos y privados. Con esto se quiere hacer un diagnóstico del conocimiento hidrogeoquímico del todo el sector altiplánico en las regiones que abarca el estudio, dando cuenta de los antecedentes disponibles, su confiabilidad y falencias.

Junto a esto, se desea presentar una descripción general de las composiciones químicas e isotópicas de las aguas analizando las diferencias existentes entre regiones y entre distintos tipos de aguas, para relacionarlas con los procesos existentes a nivel meteorológico, de circulación de cuenca, interacción agua-roca, etc.

2.2 Alcances

Este estudio se basa en una serie de datos provenientes de distintos informes y estudios, que no siempre incorporan los detalles necesarios para homologarlos correctamente. Partiendo por la etapa de muestreo y análisis de aguas, que requiere de una serie de procedimientos que permitan obtener resultados confiables. En este estudio no se ha contado con la información necesario para corroborar que se hayan tomado medidas de este tipo. Cuando ha sido posible, se han intentado identificar muestras poco confiables mediante el error del balance iónico. En otros casos sólo se han considerado los elementos minoritarios, sin embargo éstos pueden dejar de ser representativos bajo un cierto límite de detección, que difiere de un laboratorio a otro, o en algunos casos simplemente indican una concentración cero. Existe también un margen de incertidumbre respecto al tipo de agua que representan ciertos análisis, especialmente aquellos procedentes de manantiales o afloramientos, en que no se conocen las condiciones en que fue obtenida la muestra.

Para los objetivos del estudio, estas incertidumbres pueden considerarse casi despreciables, sin embargo se ha considerado de utilidad incluir una serie de recomendaciones (apartado 9), basadas principalmente en las dificultades que se han debido enfrentar en el marco de este proyecto.

3 MARCO TEÓRICO

La Hidrogeoquímica es la especialidad de la Hidrogeología e Hidroquímica, que estudia los procesos químicos que afectan a la distribución y circulación de los compuestos químicos en las aguas subterráneas. Se diferencia de la Geoquímica, la cual corresponde a la especialidad de las ciencias naturales que sobre la base de la geología y de la química, estudia la composición y dinámica de los elementos químicos en la Tierra. En general la Geoquímica estudia la composición de los materiales geológicos, entre ellos las salmueras que producen la precipitación de minerales y formación de depósitos salinos. También se diferencia de la Hidroquímica, que como especialidad de la Hidrología, estudia los procesos químicos que afectan a la distribución y circulación de los compuestos químicos en las aguas, ésta se basa principalmente en la química, pero también en la biología y geología como ciencias que interactúan con el medio acuoso y que pueden modificar su quimismo. Estas tres ciencias, sin embargo, se interrelacionan en muchos estudios.

3.1 Composición y Concentración Química de las Aguas

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

Los iones disueltos en las aguas se clasifican en mayoritarios, minoritarios y trazas. Los iones mayoritarios, que presentan concentraciones habitualmente superiores a 5 mg/L y suman el 99% en peso de las especies disueltas, suelen ser el cloruro, el bicarbonato, los sulfatos, el calcio, el magnesio, el sodio y el potasio.

El ión nitrato se suele considerar dentro de los elementos mayoritarios aunque raramente sus altas concentraciones son de origen natural. Los iones minoritarios presentan concentraciones entre los 10 y 0,01 mg/L, y suman en general alrededor del 1% del contenido iónico total. Los más habituales suelen ser: bromuro, yoduro, sílice, litio, estroncio, fosfato, nitrito, hierro, manganeso, aluminio, amonio, sulfuro y fluoruro. Los elementos traza son los que se encuentran en cantidades inferiores, generalmente por debajo de los 0,1 mg/L, y que requieren técnicas muy resolutivas para su determinación. Entre ellos encontramos por ejemplo los metales pesados.

Las aguas de circulación regional tienden a ir aumentando su mineralización hasta irse saturando en los diferentes iones. La evolución normal en un agua de circulación regional y de origen meteórico es que sucesivamente vayan dominando los siguientes iones:

aniones: $\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{Cl}^-$

cationes: $\text{Ca}^{2+} \rightarrow \text{Mg}^{2+} \rightarrow \text{Na}^+$

De este modo, la composición de un agua puede llegar a ser muy distinta a la de la roca por la cual circula dados los índices de saturación de cada especie disuelta. Por ejemplo, el ión Cl^- no llega a saturar normalmente, por lo que rocas con contenidos bajos de este elemento, y ricas en otras sales solubles, pueden dar origen a aguas predominantemente cloruradas si ha transcurrido tiempo suficiente como para ir disolviendo la cantidad de Cl^- encontrada, mientras los otros aniones permanecen constantes por estar saturados. Este efecto se produce también en las aguas superficiales afectadas por el proceso de evaporación.

Por otro lado, las aguas de origen magmático o con aporte de especies disueltas por la absorción, disolución, o hidrólisis de los gases ascendentes procedentes de las cámaras magmáticas, obtienen composiciones particulares dependiendo de la concentración de estos gases (H_2S , CO_2 , HCl , N_2 , CH_4 , etc.), y de la interacción agua roca que se produce a mayores temperaturas en los campos geotermales.

Por lo tanto puede resumirse que el aumento de la salinidad y los cambios en la composición de un agua, subterránea o superficial, puede deberse a los siguientes factores: a) mayor tiempo de residencia en el medio, por lo que se van incorporando especies iónicas en disolución producto de la interacción agua-roca, b) evaporación de las aguas produciendo la concentración de sus especies disueltas, c) aporte de elementos disueltos por la absorción de gases magmáticos y aceleradas interacciones agua-roca en áreas con anomalías geotermales, d) contaminación antrópica de las aguas y e) cambios en los niveles piezométricos o cursos de aguas superficiales, o eventos de precipitaciones líquidas que produzcan la redisolución de fases minerales con una alta solubilidad, como la halita y el yeso.

En el caso de aguas que alcanzan la saturación de sus especies disueltas por, en general, el efecto de la evaporación, se produce la precipitación de distintos minerales. Bajo condiciones ambientales dadas, cuando la concentración de las especies en solución constitutivas de una sal es igual al producto de solubilidad, la condición es de equilibrio y la solución se denomina saturada. En cambio, cuando el producto de solubilidad es mayor que la constante de equilibrio, la condición es de desequilibrio y la solución se denomina sobresaturada, y empieza la precipitación de sales en el orden de sus solubilidades crecientes. La precipitación se produce mientras descenden las concentraciones y el producto de solubilidad es igual a la constante de equilibrio. Cuando éste es menor, la precipitación de minerales cesa (Risacher et al., 1999).

En los salares, la sucesión general de precipitación de minerales producto de la evaporación ocurre en el siguiente orden: CaCO_3 , CaSO_4 y por último NaCl .

Elementos minoritarios y trazas

El origen de estos compuestos en las aguas se encuentra ligado a la lixiviación de minerales durante la meteorización del suelo y disolución de especies en la zona no saturada durante la infiltración, y por la interacción agua-roca durante el movimiento del flujo subterráneo. Las distintas reacciones que generan este aumento de especies disueltas son la oxidación-reducción, la disolución, la hidrólisis, etc. Por lo tanto, la mayor o menor concentración de estos elementos en las aguas dependerá también de los materiales por los cuales circulan las aguas y de si existen procesos, como por ejemplo anomalías geotérmicas, que aceleren estos procesos.

Calidad de los análisis químicos

Con el objetivo de evaluar la calidad de los análisis químicos debe realizarse, en primer lugar, el balance iónico a todas las muestras, donde la suma de miliequivalentes de aniones debe ser prácticamente igual a la suma de miliequivalentes de cationes. Este análisis, se hace tanto para las aguas subterráneas como superficiales, las cuales deben mostrar siempre un equilibrio entre las cargas eléctricas de sus especies disueltas.

Esta condición se comprueba teniendo en cuenta las contribuciones iónicas de los elementos mayoritarios calculando el error de balance mediante la siguiente fórmula:

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

Los errores admitidos (en valor absoluto) son en general hasta un máximo de un 10%, aunque en ocasiones para aguas muy dulces, con conductividades eléctricas (CE) menores a 200 $\mu\text{S/cm}$, pueden aceptarse errores un poco mayores. Custodio y Llamas (1983) proponen los siguientes rangos:

CE ($\mu\text{S/cm}$)	<50	51-200	201-500	501-2000	>2000
Error máx. admisible (%)	30	10	8	4	4

En general, las muestras con errores de balance superiores a los admitidos son descartadas para su estudio comparativo con otras muestras y/o fechas de análisis. Los errores de balance negativos indican que la concentración de alguna (o algunas) de sus especies aniónicas han sido sobreestimadas, o bien que los análisis de las especies catiónicas han subestimado alguna de estas concentraciones. Los errores de balance positivos, indican lo contrario.

Existen además otras verificaciones que pueden hacerse para evaluar la calidad de los análisis químicos. Por ejemplo, los análisis de aguas deben cumplir también las siguientes relaciones, que consideran los sólidos totales disueltos (STD) y CE:

$$STD(ppm) \approx [0,55 - 0,76] \times CE(\mu S / cm)$$

$$STD(ppm) = \sum [iones(ppm)] + [Si(ppm)]$$

$$CE_{18^{\circ}C}(\mu S / cm) \approx [85 - 90] \times \sum [cationes(meq / L)]$$

y en general en las aguas subterráneas observaremos que:

$$Na^{+} (meq/L) \gg K^{+} (meq/L)$$

$$Ca^{2+} (meq/L) \geq Mg^{2+} (meq/L)$$

$$Ca^{2+} (meq/L) \geq SO_4^{2-} (meq/L)$$

$$Na^{+} (meq/L) \geq Cl^{-} (meq/L)$$

Representación de las composiciones químicas

La composición de las aguas suele ser estudiada mediante gráficos clásicos hidrogeoquímicos (diagramas de Piper, de Stiff, de Schoeller, entre otros), los cuales representan el quimismo de las muestras a partir de las concentraciones de sus compuestos mayoritarios (Cl^{-} , HCO_3^{-} , SO_4^{2-} , Na^{+} , Ca^{2+} , K^{+} y Mg^{2+}).

Los *diagramas de Piper* proporcionan una visión de la composición de las aguas, sin tener en cuenta su grado de salinización. Permiten representar un número ilimitado de muestras en un mismo gráfico lo que, en una determinada área, proporciona una visión global de las distintas composiciones de agua existentes. También se pueden utilizar para estudiar la composición de una misma muestra en el tiempo. Las proporciones relativas de cationes y aniones son representadas en dos diagramas triangulares, y proyectadas en un diagrama en forma de rombo que muestra la relación entre los aniones y cationes en conjunto (Figura 3.1). Cada muestra está representada con un mismo símbolo en cada uno de los diagramas.

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

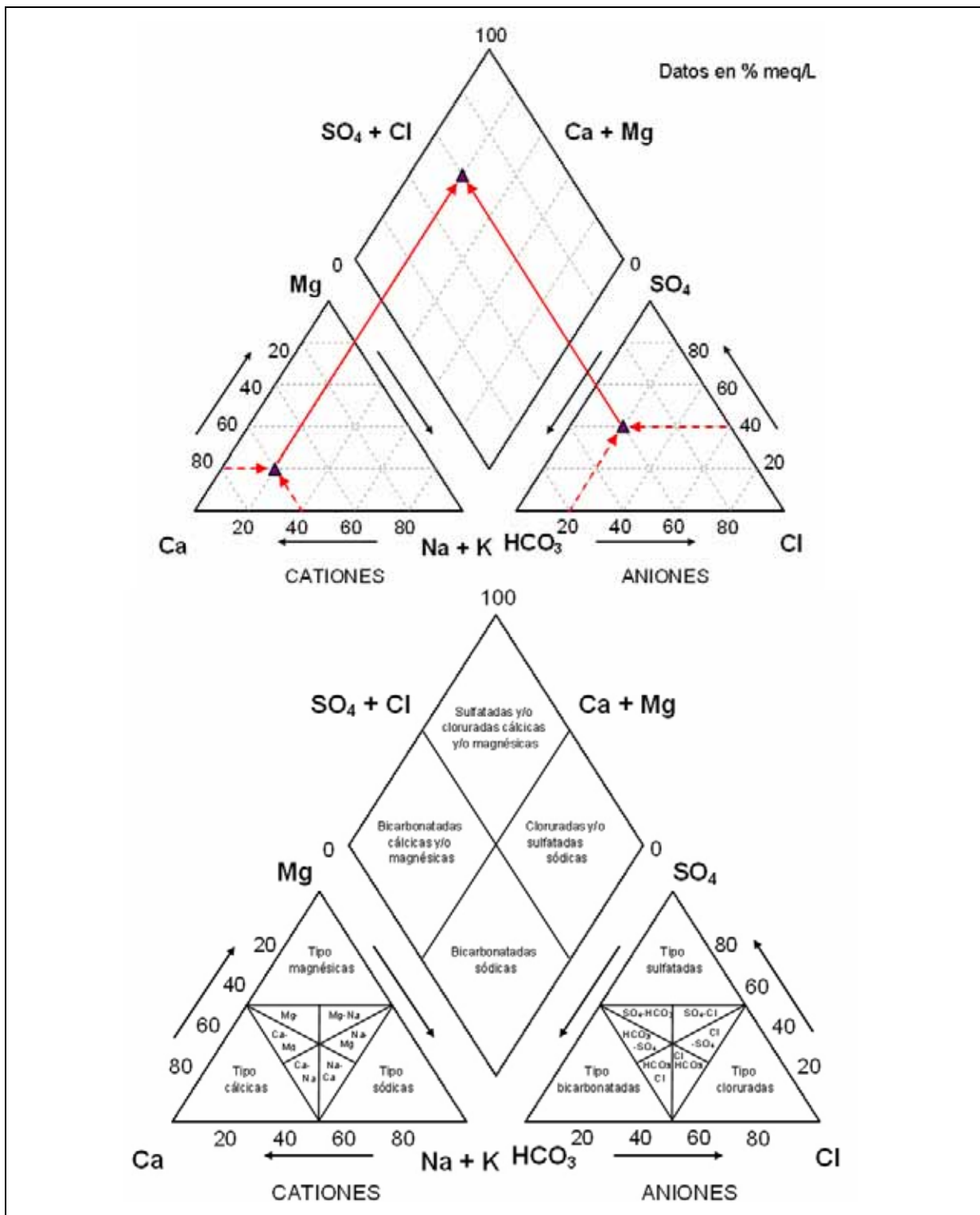


Figura 3.1: Representación gráfica de la concentración relativa de iones en un diagrama de Piper (modificado de Custodio y Llamas, 1983).

Los *diagramas de Stiff* (o de *Stiff modificado*) también consideran la concentración de los elementos mayoritarios y son muy útiles para su representación espacial en un mapa, con el fin de entender las variaciones composicionales y de aumentos de concentraciones a lo largo de los sentidos de flujo, o atravesando sistemas hídricos particulares (salares, campos geotermales, formaciones geológicas particulares, etc.). Nos permiten identificar muy bien los distintos tipos de agua existentes en un área, además del grado de salinización de las mismas.

Los diagramas de Stiff representan las concentraciones en miliequivalentes por litro (meq/L) de $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} y $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$, mientras que los diagramas de Stiff modificado, muy utilizados también en los estudios de hidrogeoquímica, representan las concentraciones de Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} y HCO_3^- (Figura 3.2). Estos diagramas se encuentran divididos mediante una línea vertical, representando los aniones en el lado izquierdo y los cationes en el lado derecho. Las concentraciones son proporcionales a la escala gráfica horizontal de la figura por lo que cuanto más ancho es un diagrama, más mineralizada se encuentra el agua a la que representa.

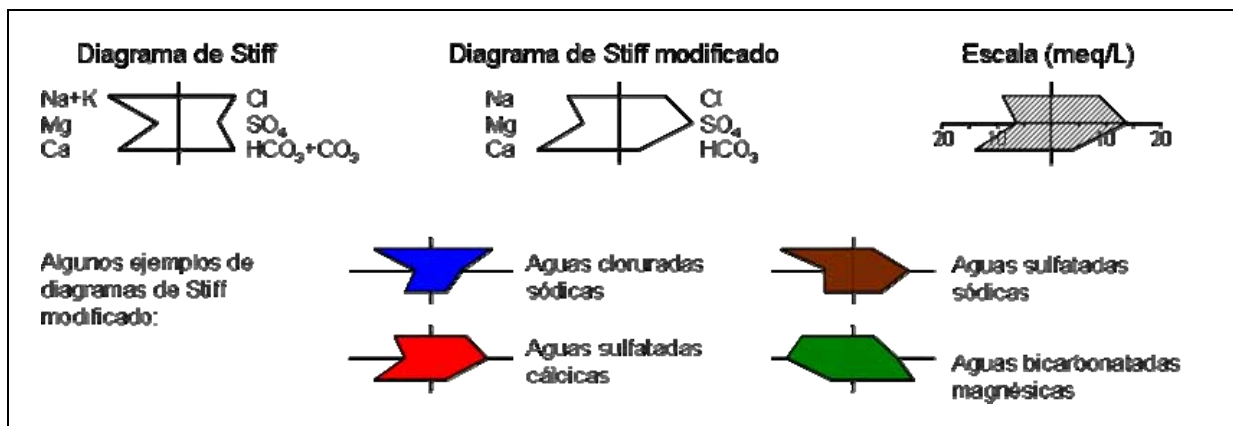


Figura 3.2: Ejemplos de concentraciones químicas según diagramas de Stiff y Stiff modificado.

Los *diagramas de Schoeller* (o de *columnas verticales*), permiten representar también varios análisis a la vez, facilitando su comparación. Se representan las concentraciones de distintos aniones, cationes o una suma de ellos, en miliequivalentes por litro (meq/L) utilizando una escala logarítmica, y uniendo los puntos que indiquen la concentración de los elementos de una misma muestra mediante una línea, generando de esta forma una serie de trazos cuya forma obedece a la composición de las aguas.

Si bien la escala logarítmica no es apropiada para observar pequeñas diferencias en la concentración de cada ión entre distintas muestras de agua, sí es útil para visualizar en un mismo gráfico las concentraciones de todos los elementos mayoritarios aunque estén presentes en concentraciones con distintos órdenes de magnitud, e incluso comparar muestras de

salinidades muy diferentes. Se pueden observar bien las relaciones entre iones asociadas a la inclinación de las líneas (Figura 3.3).

Sirve por lo tanto para estudiar evoluciones temporales de agua en un mismo punto y variaciones composicionales en aguas de diferentes localidades.

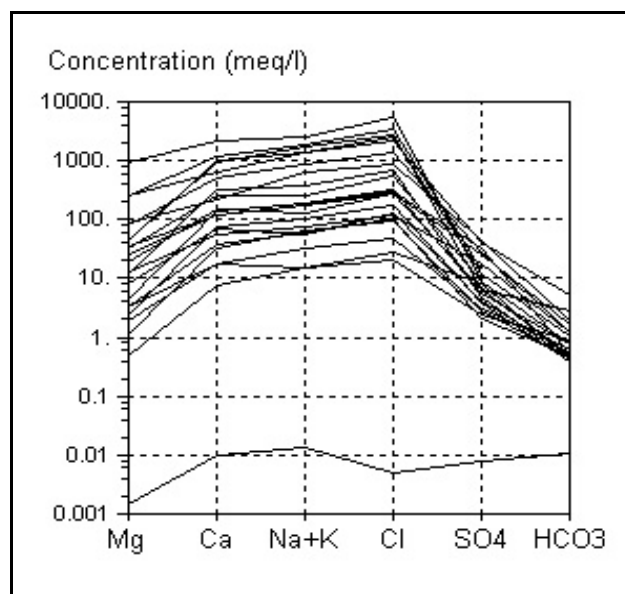


Figura 3.3: Ejemplo de diagrama de Schoeller.

Para estudiar los rangos de concentraciones existentes en los distintos grupos de aguas (subterráneas, superficiales, precipitaciones) se pueden utilizar los *diagramas de caja* o *box-whisker*. Éstos permiten conocer la distribución estadística (normal o asimétrica) de cada parámetro representado en cuartiles, junto con los valores máximos y mínimos. Permiten visualizar además la simetría o asimetría de la distribución junto a su dispersión (Figura 3.4).

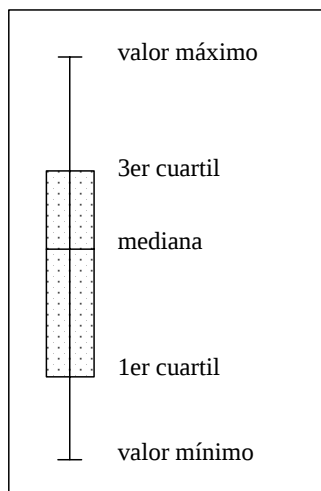


Figura 3.4: Distribución de valores representada con un diagrama de caja.

3.2 Composiciones Isotópicas

La molécula de agua está compuesta por oxígeno e hidrógeno. Estos elementos poseen isótopos estables, cada uno de ellos con rangos muy distintos de abundancia promedio en la Tierra, como se señala a continuación:

Hidrógeno	^1H	99,984 %	
	^2H	0,015 %	D (deuterio)
	^3H	10^{-14} a 10^{-16} %	T (tritio: radioactivo)
Oxígeno	^{16}O	99,76 %	
	^{18}O	0,1 %	
	^{17}O	0,037 %	

Fuente: [Domenico y Schwartz, 1998]

La diferencia de masa entre los isótopos de un mismo elemento produce que tengan distintas velocidades de reacción y finalmente que se encuentren en proporciones distintas en las aguas (o vapores) afectadas por diferentes procesos.

La *composición isotópica* de un agua expresa la proporción de los isótopos “raros” (^2H y ^{18}O) respecto a los más abundantes (^1H y ^{16}O). Estas relaciones de $^2\text{H}/^1\text{H}$ y $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ se expresan respecto a un estándar internacional de referencia, que para la molécula de agua es el V-SMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water), que representa la composición promedio del agua oceánica y es reproducido y entregado a los laboratorios de análisis por la Agencia Internacional de Energía Atómica (IAEA; International Atomic Energy Agency) con sede en la ciudad de Viena, Austria.

Los resultados se expresan entonces mediante la desviación isotópica $\delta^{18}\text{O}$ en partes por mil, respecto al patrón internacional, a partir de la expresión de Clark y Fritz (1997):

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{muestra}} = \frac{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}}\right)_{\text{muestra}} - \left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}}\right)_{\text{V-SMOW}}}{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}}\right)_{\text{V-SMOW}}} \times 1.000 \cdot \text{‰} \cdot \text{SMOW}$$

Valores positivos de $\delta^{18}\text{O}$ indican que la muestra tiene una mayor concentración del isótopo pesado (^{18}O) que el estándar, está enriquecida, y al contrario, un valor negativo, indica que la muestra está empobrecida en el isótopo pesado respecto al patrón internacional. El mismo procedimiento se aplica para obtener la composición δD .

Cuando se produce una reacción o cambio de estado de un cuerpo de agua y éste cambia su composición isotópica (por diferencias de reactividad de los isótopos), se dice que se ha producido un *fraccionamiento isotópico*.

La utilización de las composiciones isotópicas de la molécula de agua para analizar su fraccionamiento, permite interpretar procesos físico-químicos que la han afectado y por lo tanto conocer su origen y evolución. Desde este punto de vista y como se verá a continuación, el análisis se hace partiendo de la caracterización isotópica del agua de lluvia, dado que ésta representa en general la mayor fuente de recarga hídrica en los acuíferos.

Composición de las precipitaciones: rectas meteóricas y composición promedio ponderada

Las composiciones isotópicas (δD y $\delta^{18}O$) de cualquier lluvia caída en cualquier lugar del planeta, presentan una relación entre ellas que las sitúa encima de la recta denominada Recta Meteórica Mundial (MWL; Meteoric Water Line), la cual según Craig, 1961 (en Domenico y Schwartz, 1998) tiene la forma:

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

A nivel local se pueden reconocer rectas que se alejan levemente de la MWL, denominadas Rectas Meteóricas Locales (LMWL; Local Water Line). Éstas diferirán ligeramente en la pendiente de la ecuación, con valores en general entre 7,8 y 8,0 y en el coeficiente de posición (denominado “exceso de deuterio”), variando entre 9,7 y 15,2.

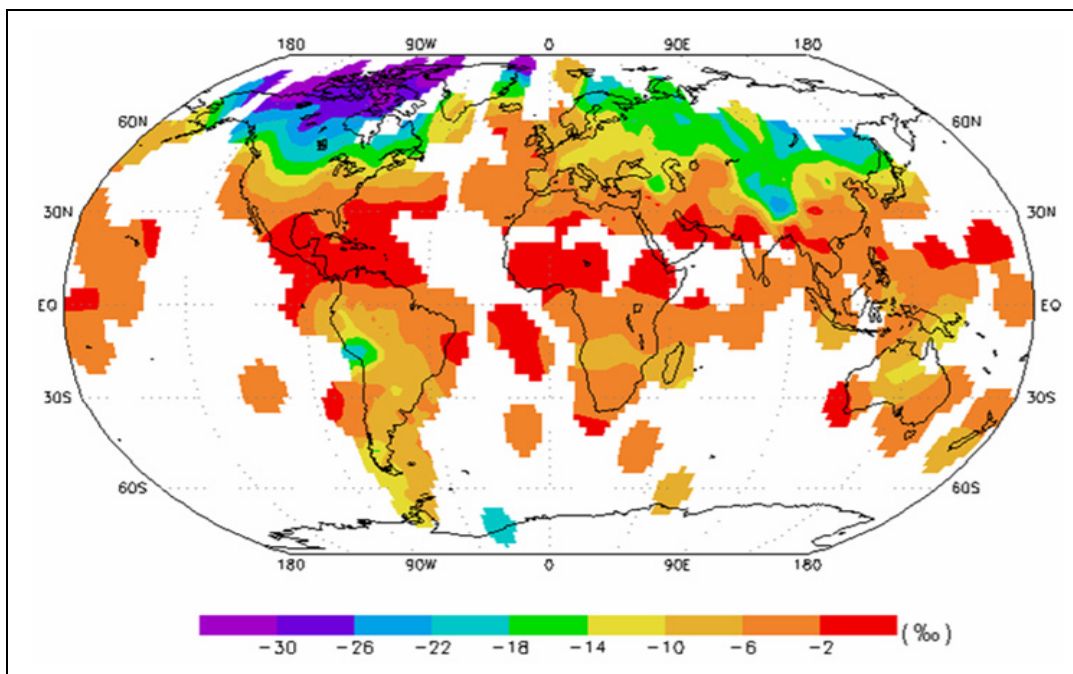
Las condiciones que generan que se produzcan diferencias en la composición isotópica de las lluvias caídas en distintos sectores, o incluso en una misma localidad, obedecen a las temperaturas de evaporación y condensación de la molécula de agua, y por la proporción de ellas dentro del cuerpo de agua, que resulten afectadas por estos procesos. Esto porque los isótopos de 2H y ^{18}O tienen una menor afinidad para permanecer en la fase vapor, siendo en promedio los últimos que se evaporan y los primeros que precipitan. A estas condiciones las denominamos “efectos” y están determinadas principalmente por la configuración geográfica, siguiendo el comportamiento que se describe a continuación, basado en Clark y Fritz (1997).

- *Efecto temperatura:* la composición isotópica del agua de lluvia depende de la temperatura a la cual se evaporó el agua de mar y, aún más, de la temperatura a la que se produjo la condensación de la lluvia o nieve. A mayor temperatura las composiciones isotópicas son mayores en una relación:

$$\delta^{18}O = 0,7 \times T^a - 13\text{‰}, \quad \text{equivalente a un aumento de } 0,7\text{‰/}^\circ\text{C}$$

$$\delta D = 5,6 \times T^a - 1.000\text{‰}, \quad \text{equivalente a un aumento de } 5,6\text{‰/}^\circ\text{C}$$

- *Efecto estacionalidad*: las variaciones estacionales de temperatura y precipitaciones causan variaciones en el contenido isotópico del agua de recarga. En general, las lluvias invernales son más ligeras que las estivales, pudiendo alcanzar diferencias de hasta 10‰. Este fenómeno se aplica para determinar tasas de circulación de agua subterránea, respuestas de la cuenca a la precipitación, y momento durante el año en que se produce la mayor recarga.
- *Efecto latitud*: debido a las diferencias de temperatura entre la zona del ecuador y los polos, las precipitaciones que se producen a mayor latitud registran generalmente valores isotópicos más negativos (empobrecidos en isótopos pesados) que las que se producen en la zona tropical. Sus gradientes fluctúan del orden de -0,6‰ a -2‰ para el $\delta^{18}\text{O}$ por cada grado de latitud. Sin embargo en Sudamérica, y específicamente en el norte de Chile, se puede encontrar en algunos sectores un comportamiento inverso, caracterizado por un aumento del gradiente isotópico a mayor latitud (Figura 3.5).
- *Efecto altitud*: la disminución general de la temperatura con la altitud favorece la sobresaturación de la humedad del aire, por lo que las precipitaciones de cotas más altas presentan menores concentraciones de isótopos pesados, i.e. que son isotópicamente más ligeras, con valores de δ más negativos. Dependiendo del lugar, su gradiente varía en un rango de -1,5 a -4‰ por cada 100 m de altitud para el δD , y entre -0,15 a -0,5‰ por cada 100 m de altitud para el $\delta^{18}\text{O}$.



Fuente: [IAEA, 2001]

Figura 3.5: Variación del gradiente isotópico desde la zona del ecuador hacia los polos.

- *Efecto cantidad:* este efecto describe la relación entre la cantidad de lluvia caída y su contenido isotópico. Se relaciona con la composición isotópica promedio de la fase vapor presente en la atmósfera antes de su condensación, y la proporción de agua precipitada. Es decir, los grandes eventos lluviosos presentan en general contenidos isotópicos más ligeros en comparación con eventos de lluvia menores, ya que las precipitaciones incorporan preferentemente isótopos pesados en un principio y progresivamente isótopos ligeros.
- *Efecto continentalidad:* las lluvias generadas por las masas de vapor de agua desde la costa hacia el interior de los continentes, presentan una disminución en los valores de δ de las lluvias que se van generando. Este proceso ocurre de manera similar el efecto cantidad, pues si las nubes no reciben una fuente de humedad adicional, las primeras lluvias generadas estarán enriquecidas en isótopos pesados (^2H y ^{18}O) y la fase vapor residual aumentará su proporción de isótopos livianos.

Dadas las diferencias que se pueden producir entre los distintos eventos de lluvia en una misma cuenca, es importante conocer la composición isotópica promedio de las lluvias del lugar, que representará la composición del agua de recarga del sistema y normalmente será muy parecida a la de las aguas subterráneas, siempre que éstas no hayan sido afectadas por otros procesos que produzcan fraccionamientos.

El cálculo de esta composición promedio, deberá ponderarse por la cantidad de lluvia de cada evento y será tanto más precisa cuanto más extensa sea la serie de registro local de agua caída y composiciones isotópicas.

Esta *composición promedio ponderada* se calculará a partir de los milímetros (mm) de agua caída P , medidos en cada evento de precipitación i y de su composición isotópica (δD , $\delta^{18}\text{O}$) a partir de las siguientes ecuaciones.

$$\overline{\delta\text{D}} = \frac{\sum \delta\text{D}_i P_i}{\sum P_i} \qquad \overline{\delta^{18}\text{O}} = \frac{\sum \delta^{18}\text{O}_i P_i}{\sum P_i}$$

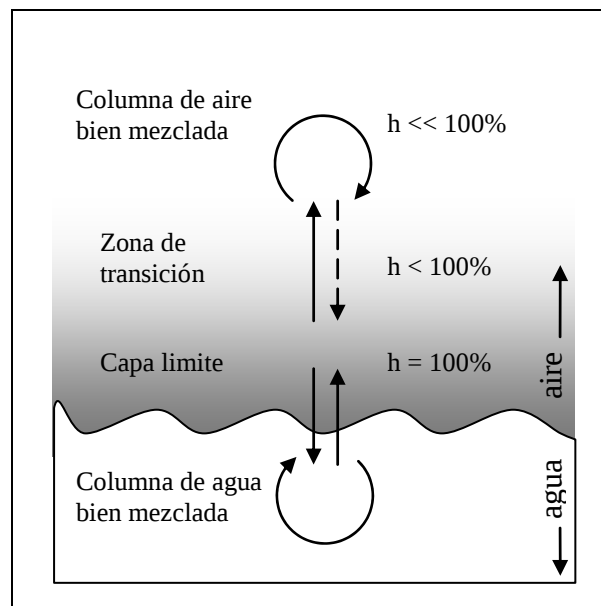
De este modo, en las áreas con distintos períodos de lluvias en el año, y que presentan orígenes y composiciones isotópicas diferentes, la composición promedio ponderada del lugar representará con mayor fidelidad al régimen de lluvias que aporte la mayor proporción de agua caída.

Procesos modificadores de las composiciones isotópicas de las aguas superficiales y/o subterráneas:

Generalmente, como se ha descrito con anterioridad, las composiciones isotópicas de las aguas subterráneas son muy similares a los valores promedio ponderados de las precipitaciones del área de recarga del acuífero, lo que permite hacer predicciones sobre la localización de ésta.

Sin embargo, existen un gran número de procesos que pueden cambiar la composición isotópica de las aguas superficiales, las aguas de infiltración, las nieves acumuladas en las cimas de las montañas, las del acuífero, etc. y que deben tenerse en cuenta en el momento de comparar las composiciones de las aguas de los acuíferos con las de las precipitaciones. Entre estos procesos, considerando como referencia Clark y Fritz (1997), encontramos:

- *Evaporación en lamina libre:* como se mencionó anteriormente, las moléculas de agua con los isótopos pesados de ^2H y ^{18}O , tienen una menor afinidad a estar en la fase vapor, i.e. que son más resistentes a la evaporación. Por lo tanto en sistemas abiertos expuestos a este fenómeno, como los cuerpos de agua superficiales, se produce un enriquecimiento de no equilibrio de las aguas residuales. Esto quiere decir que aumentan sus composiciones de δD y $\delta^{18}\text{O}$ (no a la misma velocidad) producto del intercambio entre las fases vapor y líquido del agua. Esto se explica por la difusión molecular que se produce en la capa micrométrica de humedad, que se genera encima del cuerpo de agua que se está evaporando (Figura 3.6), y que afecta de manera diferente a los isótopos de ^2H y de ^{18}O . El resultado es un enriquecimiento de las composiciones isotópicas del agua residual, que gráficamente se van alejando de la MWL, ubicándose en una recta de pendiente entre 4 y 6.



Fuente: [Clark y Fritz, 1997]

Figura 3.6: Direcciones de flujo del agua en los distintos niveles de humedad h , según el modelo de evaporación en condiciones de no equilibrio.

- *Evaporación desde el terreno:* durante la evaporación que se produce desde la zona no saturada y el suelo, muy importante en zonas áridas, los efectos cinéticos y de difusión de vapor son mayores que los asociados a la evaporación desde superficies libres (Figura 3.7). Esto porque la capa de humedad mencionada en el párrafo anterior y que produce estos efectos, puede adquirir mayor grosor en el terreno. El resultado es que las composiciones isotópicas del agua residual de la humedad del suelo se enriquecen más rápido, ubicándose sobre una recta de menor pendiente (<4), y por lo tanto alejándose también de la MWL. En el caso de las zonas áridas este fenómeno es tan importante, que las aguas que realmente recargan al acuífero, presentan composiciones entre la MWL y la MWL sin exceso de deuterio (Figura 3.8).

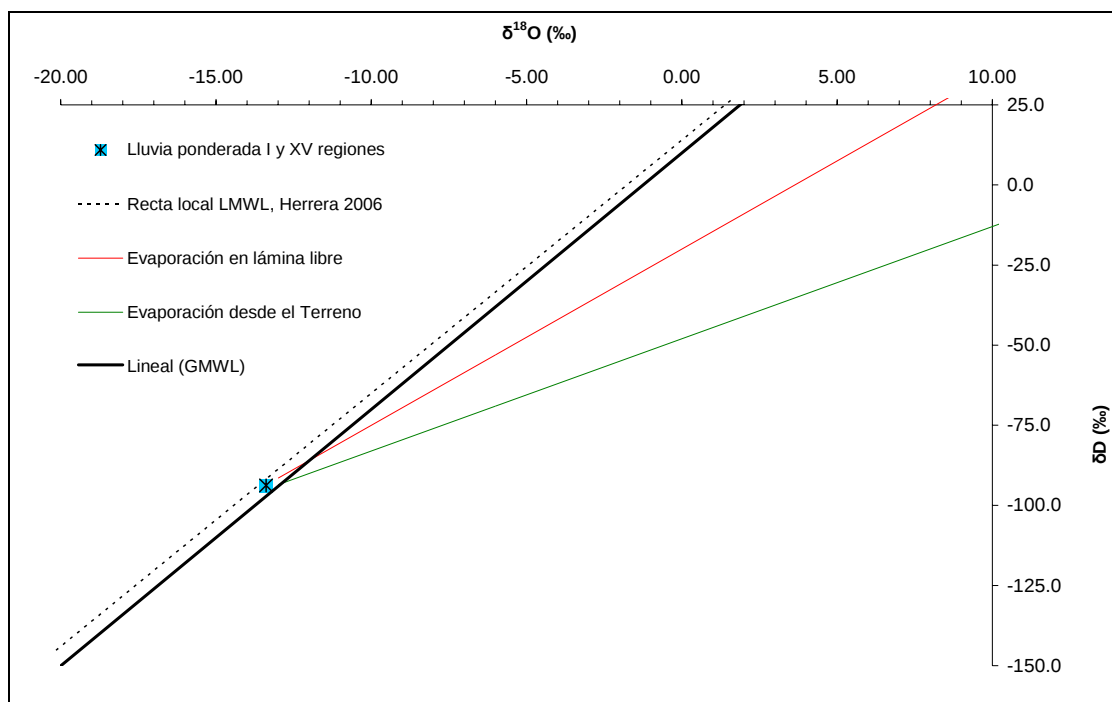
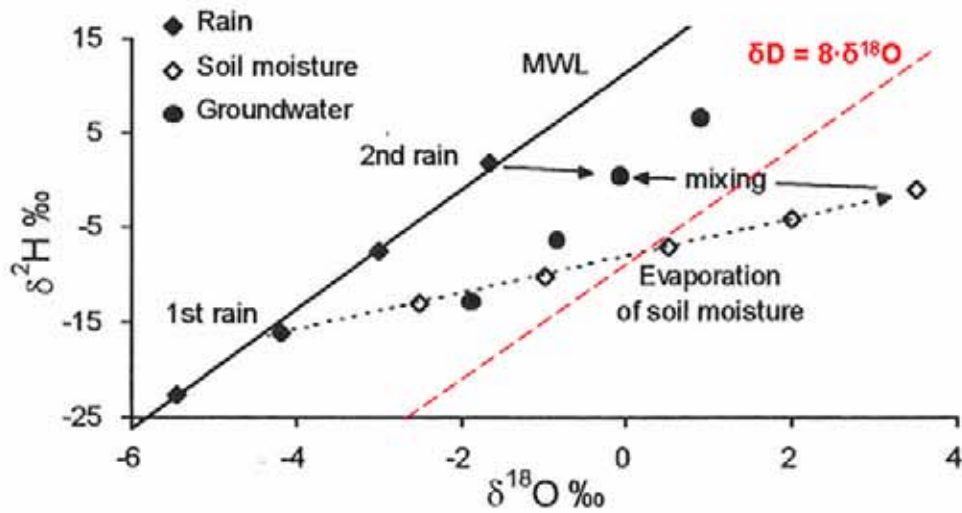


Figura 3.7: Relación $\delta D/\delta^{18}O$ en aguas afectadas por evaporación.

- *Sublimación de las nieves:* similar al proceso de evaporación, los cuerpos de nieve pierden humedad debido a la sublimación, produciéndose también un enriquecimiento del agua residual, alejando a las composiciones de la MWL, ubicándose sobre una recta de pendiente 5,75.
- *Efecto de intercambio con minerales:* los minerales que forman las rocas del acuífero contienen una gran cantidad del elemento oxígeno en su estructura, con una marca isotópica característica. De hecho, el oxígeno es el elemento más abundante en la corteza terrestre al formar parte de los minerales más comunes (silicatos). Por lo tanto, la interacción agua-roca y el intercambio de isótopos que se puede producir entre ellos,

afecta en mayor proporción a los átomos de oxígeno. Este fenómeno, común en áreas con anomalías geotermales, se puede observar como un desplazamiento de las composiciones del agua únicamente a lo largo del eje de las abscisas en el diagrama $\delta^{18}\text{O} / \delta\text{D}$ (Figura 3.9).



Fuente: [Clark y Fritz, 1997]

Figura 3.8: Mezcla de aguas evaporadas de un suelo con aguas de precipitaciones infiltradas en un perfil de suelo.

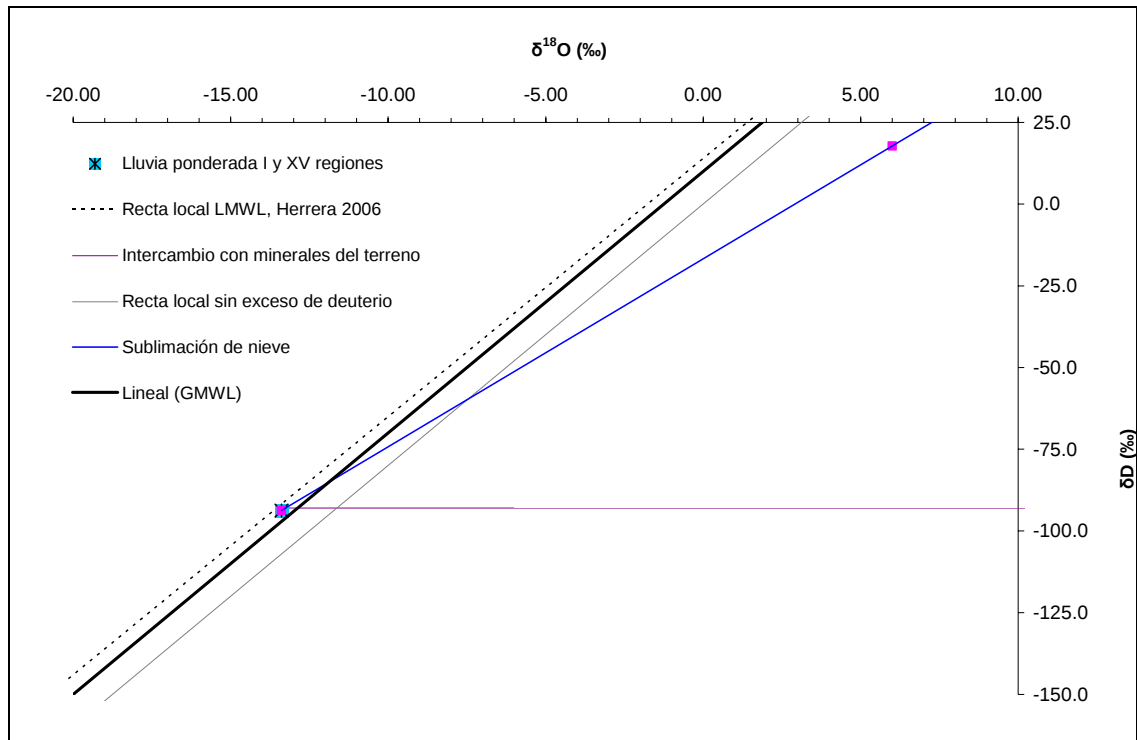


Figura 3.9: Desplazamiento de la composición isotópica de las aguas por el intercambio con minerales del terreno y mezcla con aportes de sublimación de nieve.

4 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE ANTECEDENTES

4.1 Recopilación de Antecedentes

La recopilación de datos hidrogeoquímicos e isotópicos en las regiones de estudio se realizó sobre los antecedentes hidrogeoquímicos recopilados por la DGA. Esta institución proporcionó una extensa base de datos que fue ampliada a partir de la revisión de nuevos antecedentes.

La recopilación de datos se realizó en base a publicaciones e informes con contenidos de análisis químicos e isotópicos de aguas superficiales, subterráneas y de precipitaciones, enmarcadas dentro del área de estudio (Tabla 4.1). Con esta información se elaboró además una ficha para cada una de las publicaciones utilizadas, de manera de contar con una herramienta de consulta y trabajo donde se describen aspectos relevantes de interés para este estudio, como son: el tipo de recurso hídrico (agua superficial, subterránea o precipitación), región estudiada, tipo de análisis realizado (elementos químicos, valores isotópicos) y un breve resumen del contenido del estudio (ANEXO I). Se pretende lograr así una visión global del contenido y ubicación de los antecedentes hidrogeoquímicos disponibles, sirviendo como referencia de consulta rápida para posteriores estudios en la materia.

Posteriormente se añadieron a la base de datos los análisis químicos e isotópicos del Altiplano de la Región de Antofagasta proporcionados por la consultora GeoAguas Ltda., en el marco del Proyecto Mundo. También se incluyó la información de los análisis de algunos mapas hidrogeológicos publicados por SERNAGEOMIN (Salar de Pedernales, Salar de Maricunga y Ciénaga Redonda).

Una vez depurada la información recolectada se obtuvo la base de datos definitiva, en la que se basa el análisis hidrogeoquímico e isotópico a nivel regional y que luego será incorporada a los análisis de los sistemas pilotos. Como apoyo gráfico se generaron distintos mapas y gráficos concernientes a la zona en estudio, que reflejan la calidad, cantidad y distribución espacial de la información recopilada. Su formato SIG permite su aplicación como plataforma de consulta y trabajo no sólo para este trabajo, sino que también para proyectos futuros.

Los datos de análisis químicos generados en el marco de este proyecto forman parte de los análisis de sistemas pilotos (partes VIII, IX y X), para los que este capítulo sirve como antecedente general.

Tabla 4.1: Fuentes de información hidrogeoquímica a nivel regional.

Autor y año	Título	Referencia
Risacher et al. 1999	"Geoquímica de aguas en cuencas cerradas I, II, III regiones, Chile."	DGA, UCN, Institut de Recherche pour le Développement (ex ORSTOM)
Risacher et al. 2002	"Hydrochemistry of two adjacent acid saline lakes in the Andes of northern Chile."	Chemical Geology
Risacher et al. 2003	"The origin of brines and salts in Chilean salars: a hydrochemical review."	Earth-Science Reviews
Rech et al. 2003	"Isotopic evidence for the source of Ca and S in soil gypsum, anhydrite and calcite in the Atacama Desert, Chile"	Geochimica et Cosmochimica
Godfrey et al. 2003	"Stable isotope constraints on the transport of water to the Andes between 22 degrees and 26 degrees S during the last glacial cycle."	Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology
Cortecci et al. 2005	"New chemical and original isotopic data on waters from El Tatio geothermal field, northern Chile"	Geochemical Journal
Herrera et al. 2006	"Relación de aguas superficiales y subterráneas en el área del lago Chungará y lagunas de Cotacotani, norte de Chile: un estudio isotópico"	Revista Geológica de Chile
Quade et al. 2007	"Soils at the hyperarid margin: The isotopic composition of soil carbonate from the Atacama Desert, northern Chile."	Geochimica et Cosmochimica
Houston et al. 2007	"Recharge to groundwater in the Turi Basin, northern Chile: An evaluation based on tritium and chloride mass balance techniques."	Journal Of Hydrology
Boschetti et al. 2007	"New and past geochemical data on fresh to brine waters of the Salar de Atacama and Andean Altiplano, northern Chile."	Geofluids

4.2 Depuración y Tratamiento de la Base de Datos

El proceso de depuración de los datos disponibles consistió en extraer los análisis que no correspondían al área de estudio y verificar que los registros analíticos no se encontraran repetidos, ya que dos o más trabajos de recopilación previos podrían haber utilizado las mismas fuentes de información. El resultado obtenido es un registro total de 1.460 análisis químicos y/o isotópicos, correspondientes a 918 puntos de muestreo de aguas superficiales, subterráneas y de precipitaciones. El tipo de agua asignado a cada muestra se rige en términos generales por su punto de procedencia, como se especifica en la Figura 4.1.

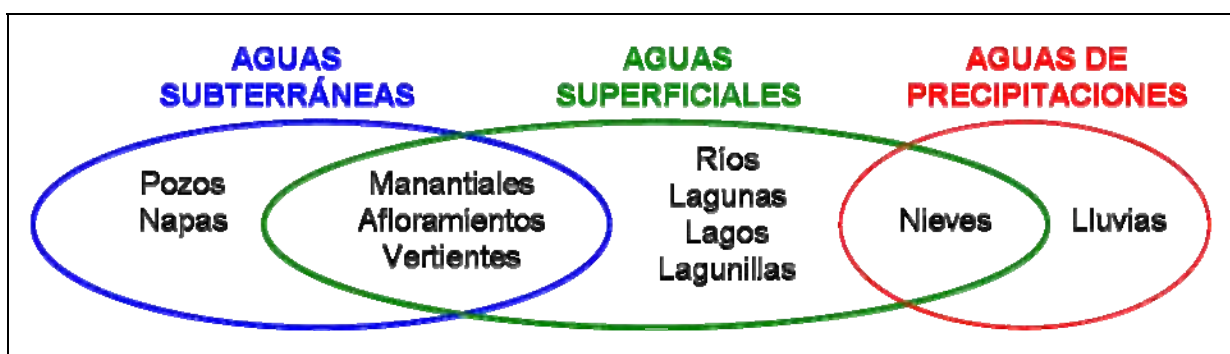


Figura 4.1: Tipos de puntos de muestreo considerados en la clasificación general de las aguas.

En este sentido, en el análisis estadístico de la información recopilada (apartado 4.3), los análisis químicos descritos como manantiales, vertientes y afloramientos han sido considerados dentro del grupo de aguas superficiales, junto con la información procedente de ríos, lagunas, o pozas. Las nieves en este se consideraron junto con la lluvia como precipitaciones, pero por la escasez de datos no se han analizado particularmente.

Sin embargo en el análisis propiamente hidrogeoquímico que se presenta en el apartado 0 de este capítulo, los manantiales puntuales, vertientes y afloramientos se caracterizan dentro de las aguas subterráneas, ya que éstas suelen estar alimentadas por flujos subterráneos que afloran a la superficie. Así, cuando todavía no se reconocen patrones correspondientes a procesos superficiales como la evaporación (manantiales difusos), estos flujos pueden considerarse representativos del quimismo del acuífero. Se deduce así que conocer el punto de muestreo exacto y el método utilizado para obtener la muestra son factores claves para la buena interpretación de los resultados analíticos.

Luego se procedió a evaluar la calidad de los datos, calculado en primer lugar el balance iónico, siempre que se dispusiera de la concentración de los elementos mayoritarios (Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- , Na^+ , K^+ , Mg^{+2} y Ca^{+2}), siendo dispensable únicamente el ión NO_3^- .

El error admitido (en valor absoluto) fue un 10%, siendo considerados poco confiables aquellos ubicados sobre este límite.

De los 918 puntos de muestreo, 878 presentaron análisis químicos, de los que 634 disponían de los parámetros necesarios para realizar el cálculo del error de balance, ubicándose 572 de ellos bajo el límite de error máximo admisible.

Para el análisis de calidad de los demás parámetros analizados (características físico-químicas y elementos minoritarios) se realizó una revisión crítica de cada uno de los resultados. Para ello se identificaron las altas/bajas concentraciones irreales de un sólo compuesto en una muestra, comparándolo además con los STD. Otro criterio utilizado fue la correlación lineal entre el STD y la CE.

Los valores cuya calidad generara incertidumbre fueron revisados, y corregidos en los casos correspondientes, según su fuente de origen cuando ésta se encontraba disponible. La base de datos de la DGA por ejemplo, fue sometida a una revisión de este tipo, ya que estaba compuesta por información que procedía de otros estudios originales (publicaciones, estudios internos, etc.). Los 23 valores corregidos fueron marcados con un formato especial. Los errores que no pudieron ser verificados o descartados, también fueron marcados, esta vez como “sospechosos de erróneos” para poder ser revisados más adelante y evitar su utilización en la interpretación de resultados.

En la base de datos, a cada análisis químico y/o isotópico se le asignó un código identificador o ID, compuesto por el nombre abreviado de la cuenca a la que pertenece (Tabla 4.2) seguido de una letra que representa el tipo de agua; F aguas superficiales, T aguas subterráneas y P precipitaciones.

Tabla 4.2: Nomenclatura utilizada para identificar muestras según cuenca de origen.

ID cuencas XV y I Región		ID cuencas II Región	
UCH	Uchusuma-Caquena	ALC	Salar de Alconcha
CHU	Lago Chungará	OLL	Salar de Ollague-Laguani
LAU	Río Lauca	CAR	Salar de Carcote
SUR	Salar de Surire	ASC	Salar de Ascotán
ISA	Río Isluga	TAR	Salar de Tara
CAQ	Cariquima	AC1	Salar de Aguas Calientes 1
CAN	Cansosa	PJA	Salar de Pujsa
LLA	Laguna Lagunilla	HEL	Laguna Helada
HUA	Salar de Huasco	LOY	Salar de Loyoques o Quisquiro
COP	Salar de Coposa	AC2	Salar de Aguas Calientes 2
MIC	Salar de Michincha	LEJ	Laguna Lejía
ID cuencas III Región		MIS	Laguna Miscanti
AZU	Salar de la Azufrera	MIN	Laguna Miñiques
AMA	Salar de Agua Amarga	TUY	Laguna Tuyajto
GOR	Salar de Gorbea	COL	Pampa Colorada
ISL	Salar de la Isla	TEC	Pampa Las Tecas
AGI	Salar de Aguilar	LAC	Salar del Laco
PAR	Salar de las Parinas	AC3	Salar de Aguas Calientes 3
INF	Salar de Infieles	CAP	Salar de Capur
GRA	Salar Grande	VAR	Pampa Varela
LGN	La Laguna	INC	Salar de Incahuasi
BRA	Lagunas Bravas	LAZ	Laguna de la Azufrera
PIE	Salar de Piedra Parada	PAJ	Salar de Pajonales
JIL	Lagunas del Jilguero	PTN	Puntas Negras
BAY	Laguna del Bayo		
PED	Salar de Pedernales		
ESC	Laguna Escondida		
WHE	Wheelwright		
PPZ	Piedra Pómez		
LVE	Laguna Verde		
MAR	Salar de Maricunga		
LNF	Laguna del Negro Francisco		

4.3 Análisis Estadístico de la Información

Para este análisis se contabilizaron y anotaron las características de cada punto de muestreo, por cuenca y región (p. ej. Tabla 4.3) según:

- Muestra de agua correspondiente (superficial, subterránea o precipitación).
- Información más representativa del punto (concentraciones químicas, datos isotópicos o ambos).
- Número de análisis realizados en dicho punto (puede tener p.ej. un registro a lo largo del tiempo o a distintos niveles de profundidad en el caso de aguas subterráneas).
- Si presenta o no análisis completo de elementos mayoritarios.
- Confiabilidad del análisis según el error de balance iónico obtenido.
- Si presenta o no análisis de elementos minoritarios.

Tabla 4.3: Puntos de muestreo con ID y tipo de información que entrega.

Punto	Nº muestras	Tipo de muestra	Tipo de análisis			Elem. mayoritarios completos	Error <10%	Elem. minoritarios
			Químico	Químico+ isotópico	Isotópico			
CUENCA.F001	5	Superficial	Si	No	No	Si	Si	No
CUENCA.F001	1	Subterránea	Si	No	No	No	Si	Si
CUENCA.F001	7	Precipitación	No	Si	No	No	No	No
CUENCA.F001	2	Superficial	No	No	Si	No	-	Si

La agrupación de los 918 puntos de muestreo por regiones, indica que éstos se distribuyen uniformemente entre ellas, aunque su distribución espacial dentro de cada una es altamente heterogénea (Figura 4.2).

Respecto al tipo de agua muestreada, predominan claramente las aguas superficiales con un 73%, sólo un 25% corresponde a aguas subterráneas y un 2% a precipitaciones. Analizando cada región por separado, las aguas superficiales representan el 69% de los puntos de muestreo en las I y XV, al igual que en la III, mientras que en la II abarcan el 79%. La información de aguas subterráneas representa entre el 20% y el 31% del total de los puntos de muestreo. En las regiones I y XV la cantidad de puntos de muestreo enfocados a análisis de precipitación es de un 8%, mientras que en la II 1% y en la III no hay datos de ese tipo (Figura 4.3).

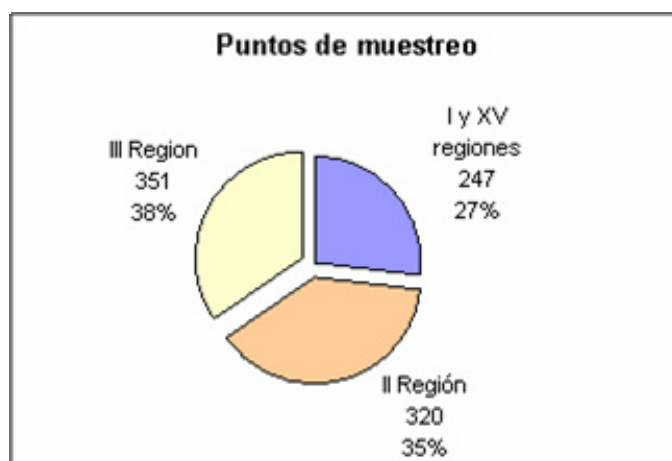


Figura 4.2: Proporción de los puntos de muestreo que corresponden a cada región.

En relación al tipo de análisis efectuado en los 918 puntos de muestreo hidrogeoquímico, se distinguen puntos de muestreo sólo con análisis químico (sin isótopos), con ambos tipos de información (química e isotópica) y muestras sólo con datos isotópicos. La mayor parte de los puntos (76%) cuenta con análisis químico sin datos de isótopos, estando estos disponibles sólo en un 4% del total de los puntos de muestreo. A nivel regional hay claras diferencias, destaca que en la I Región un 43% de los puntos presenta datos isotópicos, mientras que en la III el 100% de los puntos posee información de análisis químicos (Figura 4.4).

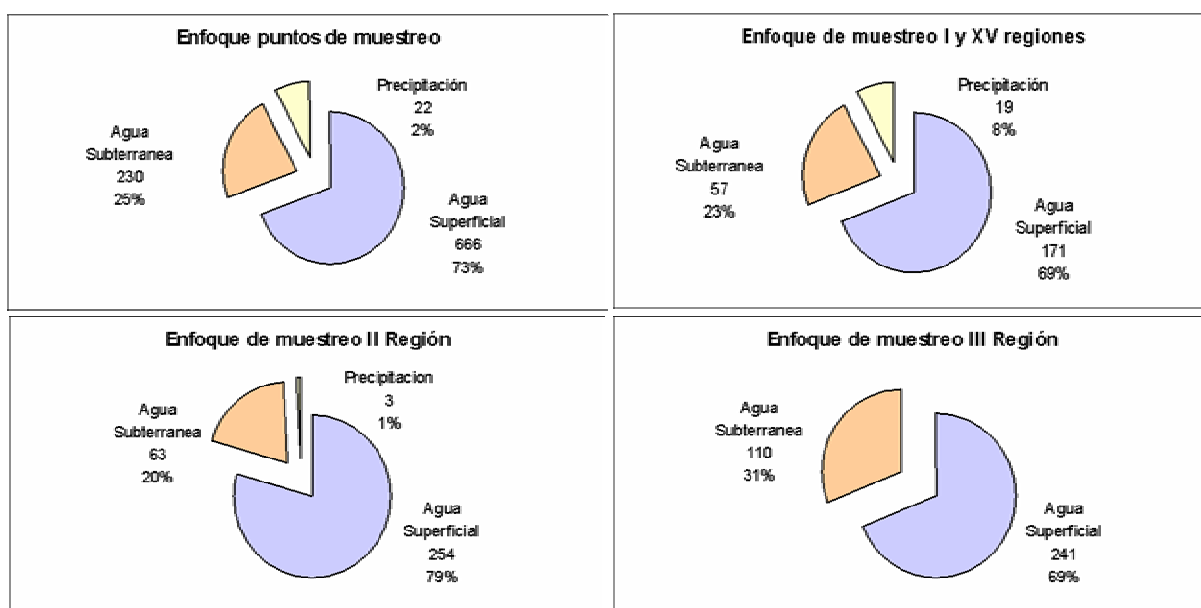


Figura 4.3: Comparación proporcional del tipo de agua analizada en cada punto de muestreo, a nivel global y regional.

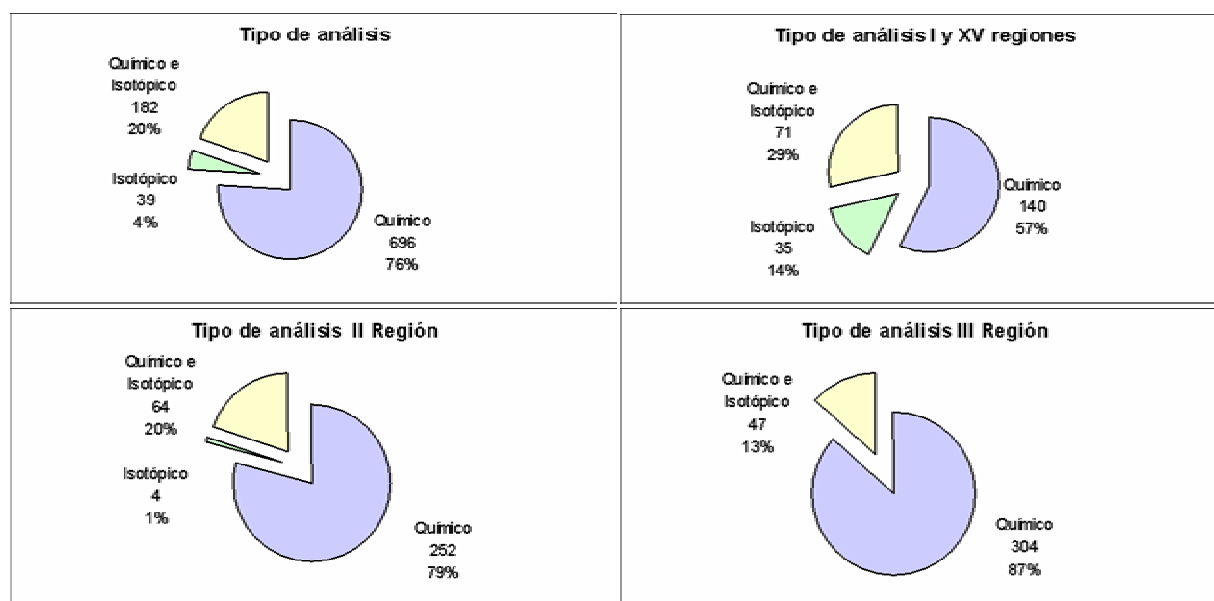


Figura 4.4: Comparación del tipo de información disponible en cada región.

Respecto a los 211 puntos con información química, en las I y XV regiones un 53% tiene información de los ocho elementos mayoritarios, mientras que un 37% tiene información sólo de los siete fundamentales (sin NO_3^-). Por lo tanto es posible calcular el balance químico y su error asociado en un 90% de los puntos.

En la II Región, de los 316 puntos de muestreo con información química, la mayoría (75%) tiene información de los ocho elementos mayoritarios y sin considerar al NO_3^- , este porcentaje asciende al 85%.

En la III Región hay 351 puntos con información química, pero sólo el 45% tiene información completa de los elementos mayoritarios y un 5% tiene información sin análisis de NO_3^- (Figura 4.5).

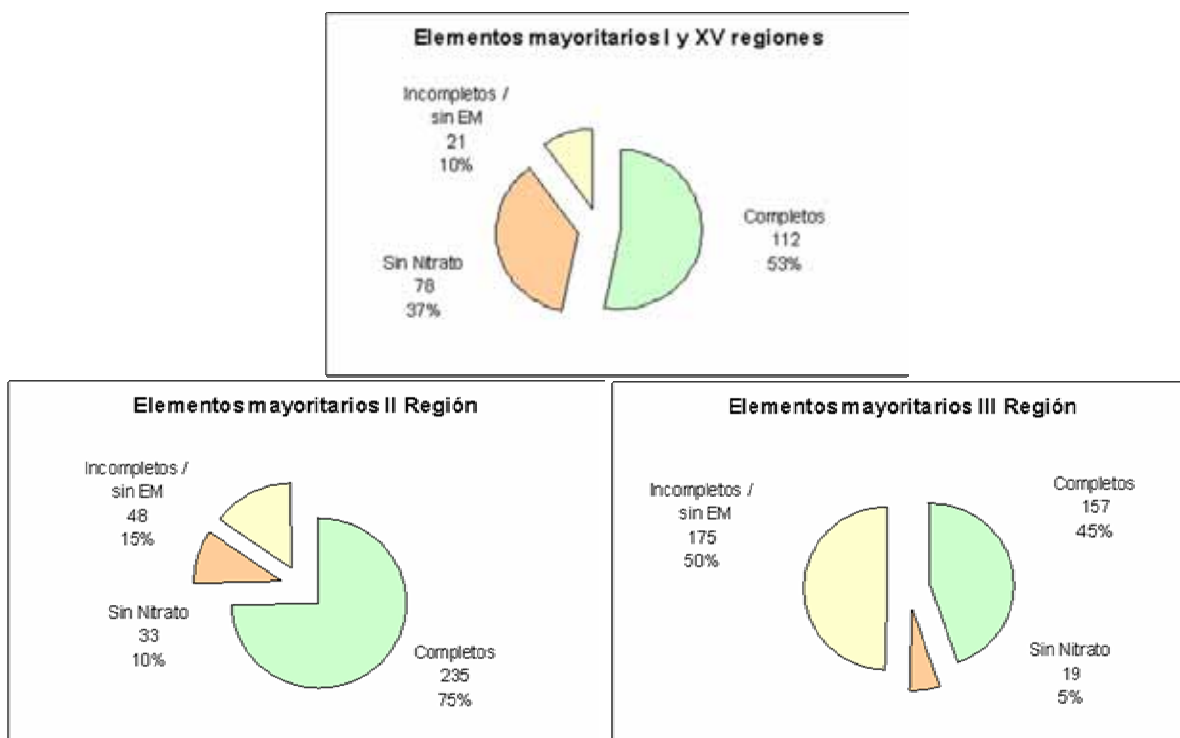


Figura 4.5: Calidad de los análisis de elementos mayoritarios en cada región.

En los puntos donde fue posible calcular el error de balance se obtuvieron generalmente resultados dentro del margen considerado aceptable (Figura 4.6).

Otro criterio fue la cantidad de elementos minoritarios y trazas (Al, Si, Ba, B, Cd, As, Co, Cu, Cr, P, Fe, I, Li, Mn, Mo, Hg, Ni, Pb y Zn) que fueron considerados en los análisis de cada punto de muestreo. En general todas las regiones poseen un alto porcentaje de datos de este tipo (Figura 4.7), siendo los más comunes B, As, I, Li y Si.

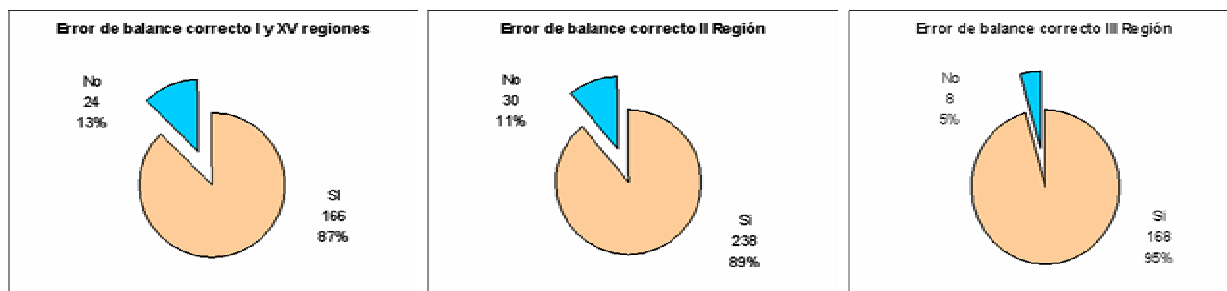


Figura 4.6: Porcentaje de puntos de muestreo con error de balance correcto.

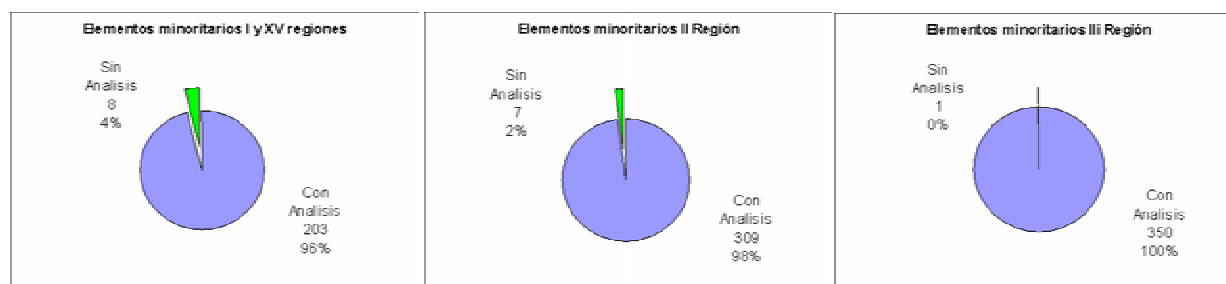


Figura 4.7: Porcentaje de puntos que incluyen datos de elementos minoritarios y trazas.

Casi la mitad de los puntos con información de análisis isotópicos se concentra en las regiones I y XV, mientras que la II y III alcanzan un 31% y 21% respectivamente (Figura 4.8). De los 106 puntos con información isotópica en las regiones I y XV, un 79% corresponde a aguas superficiales, 18% a precipitaciones y apenas un 3% a aguas subterráneas. Ésta es lejos la zona que cuenta con una mayor cantidad de información isotópica de lluvias (Figura 4.9).

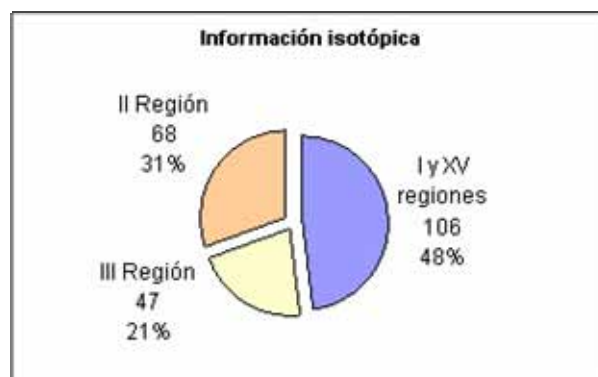


Figura 4.8: Distribución regional de los puntos de muestreo con datos isotópicos.

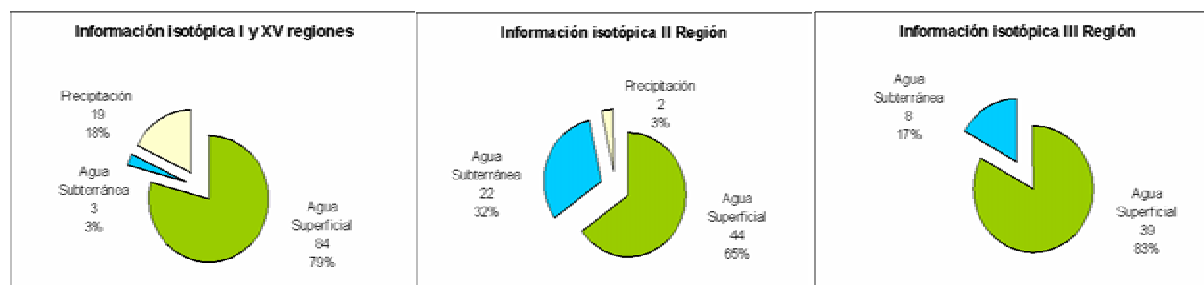


Figura 4.9: Proporción de información isotópica relacionada con cada tipo de agua.

4.4 Análisis Regional de la Información

Para contextualizar el análisis espacial de la información realizado más adelante, en la Tabla 4.4 se presentan las áreas que abarcan las cuencas altiplánicas dentro de cada región (se diferencia el área total a nivel internacional y dentro de Chile), cuántas han sido definidas, el total de puntos de muestreo y su densidad. Todas tienen una densidad de cobertura similar, por lo que la III Región de Atacama al ser más extensa, presenta un mayor número de puntos de muestreo, mientras que en las regiones I y XV ocurre lo contrario. Se debe tener en consideración la diferencia que existe entre densidad y calidad de cobertura, ya que la distribución de los puntos no suele ser homogénea.

Tabla 4.4: Cobertura espacial de la información disponible a nivel regional.

Región	Área total cuencas (km ²)	Área nacional cuencas (km ²)	Nº cuencas	Puntos de muestreo	Densidad de puntos (nº pto./km ²)*
I- XV	15.611	11.470	14	247	0,0215
II	23.271	14.717	41	320	0,0217
III	16.830	15.699	32	351	0,0224

* Tomando como referencia el área de la cuenca en territorio chileno.

La representación gráfica de la densidad de información considera la cantidad de puntos de muestreo que existen por kilómetro cuadrado de superficie (Figura 4.10). Se definen como cuencas con buena cobertura a aquellas con más de 0,028 puntos/km² (Tabla 4.5). En un rango intermedio se agrupan las cuencas que tienen entre 0,02 y 0,028 puntos/km² (Tabla 4.6), mientras que valores inferiores a 0,02 se asocian a cuencas con baja representatividad.

Tabla 4.5: Cuencas con densidad de puntos de muestreo alta (*cuencas piloto).

I- XV	II	III
Lago Chungará	Salar de Carcote	Salar de Gorbea
Salar de Surire	Salar de Ascotán	La Laguna
Salar de Huasco*	Laguna Helada	Salar de Piedra Parada
Salar de Michincha	Laguna Miscanti	Lagunas del Jilguero
	Salar de Aguas Calientes 3	Wheelwright
	Salar del Laco*	Piedra Pómez
		Salar de Maricunga*

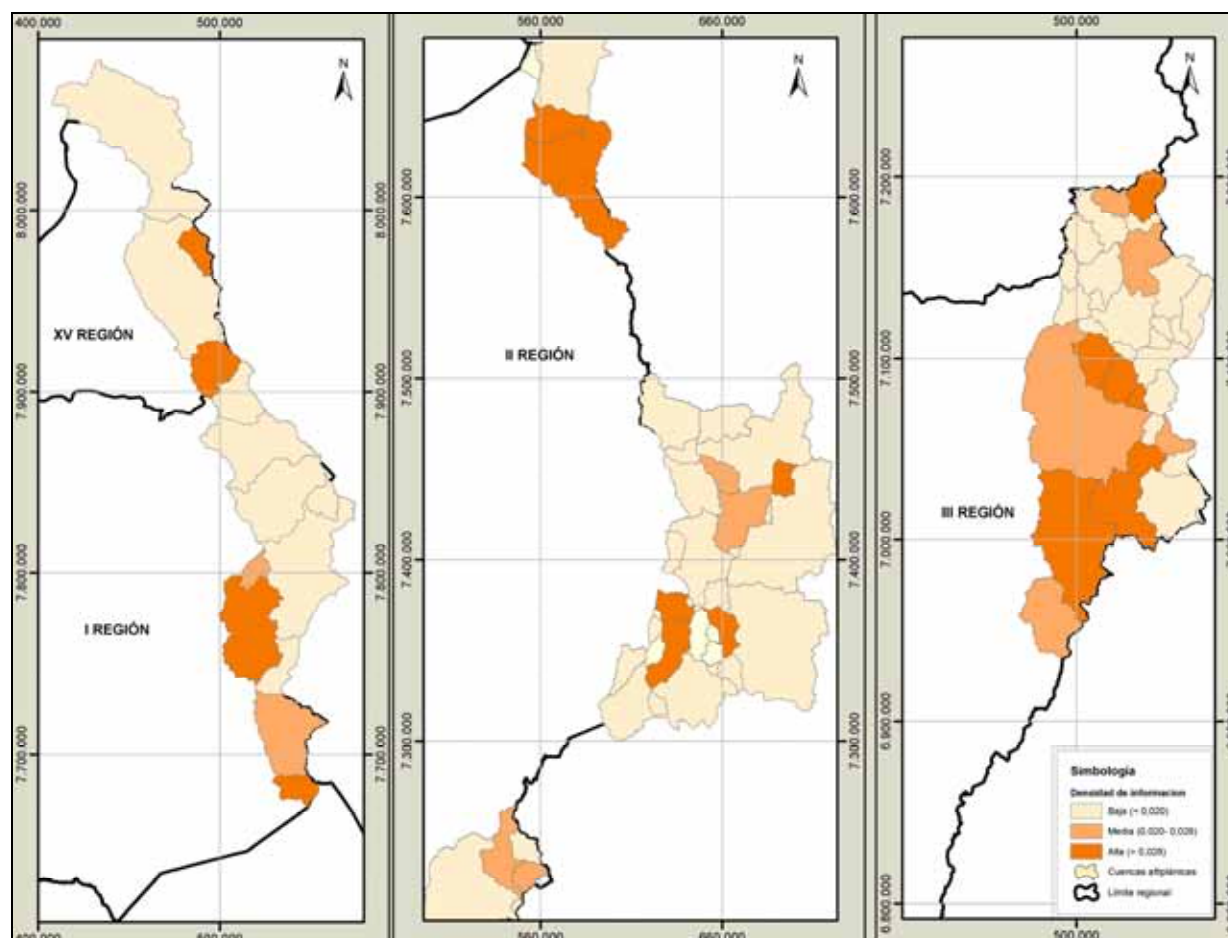


Figura 4.10: Densidad de puntos de muestreo por cuenca.

Tabla 4.6: Cuencas con densidad de puntos de muestreo media (*cuencas piloto).

I - XV	II	III
Laguna Lagunilla	Salar de Aguas Calientes 1	Salar de la Azufrera
Salar de Coposa	Salar de Loyoques	Salar de la Isla
	Salar de Aguas Calientes 4	Salar de Pedernales*
	Laguna de la Azufrera	Laguna Escondida
		Laguna del Negro Francisco

4.4.1 I Región de Tarapacá y XV Región de Arica y Parinacota

Posee mayor concentración de análisis químicos en cuencas como la del Lago Chungará, parte de la cuenca del Río Lauca y de los salares de Surire y Huasco.

Las cuencas Uchusuma- Caquena, Río Todosantos, Cariquima, Quebrada Umo Khauo, Cancosa, Laguna Lagunilla y Quebrada Carcas, carecen de información sobre concentración de elementos químicos. La cuenca piloto del Salar de Huasco presenta 20 puntos de muestreo de agua superficial, dos de aguas subterráneas y uno de precipitaciones (Figura 4.11).

En cuanto a la distribución de la información isotópica en las regiones I y XV, los datos pertenecen mayoritariamente a las cuencas del Lago Chungará, Río Lauca, y de los salares de Surire, Huasco y Michincha (Figura 4.12). En Salar de Huasco existen 31 puntos con antecedentes isotópicos provenientes de aguas superficiales, dos de aguas subterráneas y dos de precipitaciones. Cada uno de ellos cuenta con varios análisis, procedentes del estudio de Aravena et al., 1999. En Laguna Lagunilla destaca también un punto de precipitación con 29 datos, que forma parte del mismo trabajo.

4.4.2 II Región de Antofagasta

En esta región hay una mejor distribución espacial de los puntos con información química, a pesar de que las cuencas se encuentran agrupadas en tres bloques. En particular, destaca la mayor concentración de datos en las cuencas de los salares de Alconcha, Carcote y Ascotán en el sector norte, y en la zona central de la región las que corresponden a los salares de Tara, Loyoques, Aguas Calientes 3 y del Laco, Laguna Miñiques y Laguna Tuyajto (Figura 4.13).

La mayoría de las cuencas compartidas con Bolivia y Argentina, junto con las abarcan áreas muy pequeñas, no tienen puntos de análisis químico. Los sectores en que se han analizado muestras de precipitación se restringen a las cuencas de los salares de Ascotán y del Laco.

En cuanto a las cuencas piloto, la que posee mayor información es la de Laguna Tuyajto con 29 puntos de muestreo de aguas superficiales y 4 de aguas subterráneas, seguida de Salar del Laco que tiene 13 en total, luego Pampa Colorada que cuenta con 7 y la del Salar de Aguas Calientes 2 posee sólo 4.

Los puntos de muestreo con información isotópica se limitan a la cuenca de Laguna Tuyajto, con 15 de agua superficial y 2 de aguas subterráneas, Salar del Laco con un total de 10 puntos, 4 enfocados aguas subterráneas, 5 a superficial y 1 agua de lluvia, mientras que Pampa Colorada sólo tiene datos de agua subterránea en 5 puntos. Otras cuencas como las de los salares de Ascotán, Loyoques, Pajonales y Aguas Calientes 4 presentan a lo más un par de puntos con datos isotópicos (Figura 4.14).

4.4.3 III Región de Atacama

Las cuencas de esta región presentan una distribución relativamente uniforme de los puntos de muestreo de aguas analizados químicamente. Entre las cuencas mejor caracterizados se puede mencionar la de Piedra Pómez y de los salares de Piedra Parada, Pedernales y Maricunga, junto con la de la Laguna del Negro Francisco. En el límite norte de la región, los que cuentan con mayor información química son las cuencas de los salares de Gorbea y de la Isla (Figura 4.15).

En las cuencas piloto se cuenta con un total de 146 puntos con datos químicos. La cuenca del Salar de Pedernales posee 77 puntos de muestreo, 51 de tipo superficial y 26 subterráneos, mientras que la cuenca del Salar de Maricunga tiene 69 puntos en total, de los cuales 14 están enfocados al análisis químico de agua subterránea. Como se ha señalado al principio, no existen análisis químicos de precipitaciones en esta región.

La información isotópica, en ésta como en las demás regiones, es más escasa (Figura 4.16). Las cuencas de los salares de Piedra Parada y Pedernales son las que cuentan con la mayor cantidad de puntos, la primera sólo con análisis de muestras de agua superficial y la segunda con puntos de muestreo de ambos tipos de aguas. Las cuencas de los salares de Gorbea y Maricunga, junto con La Laguna, también poseen un par de puntos aislados con datos isotópicos.

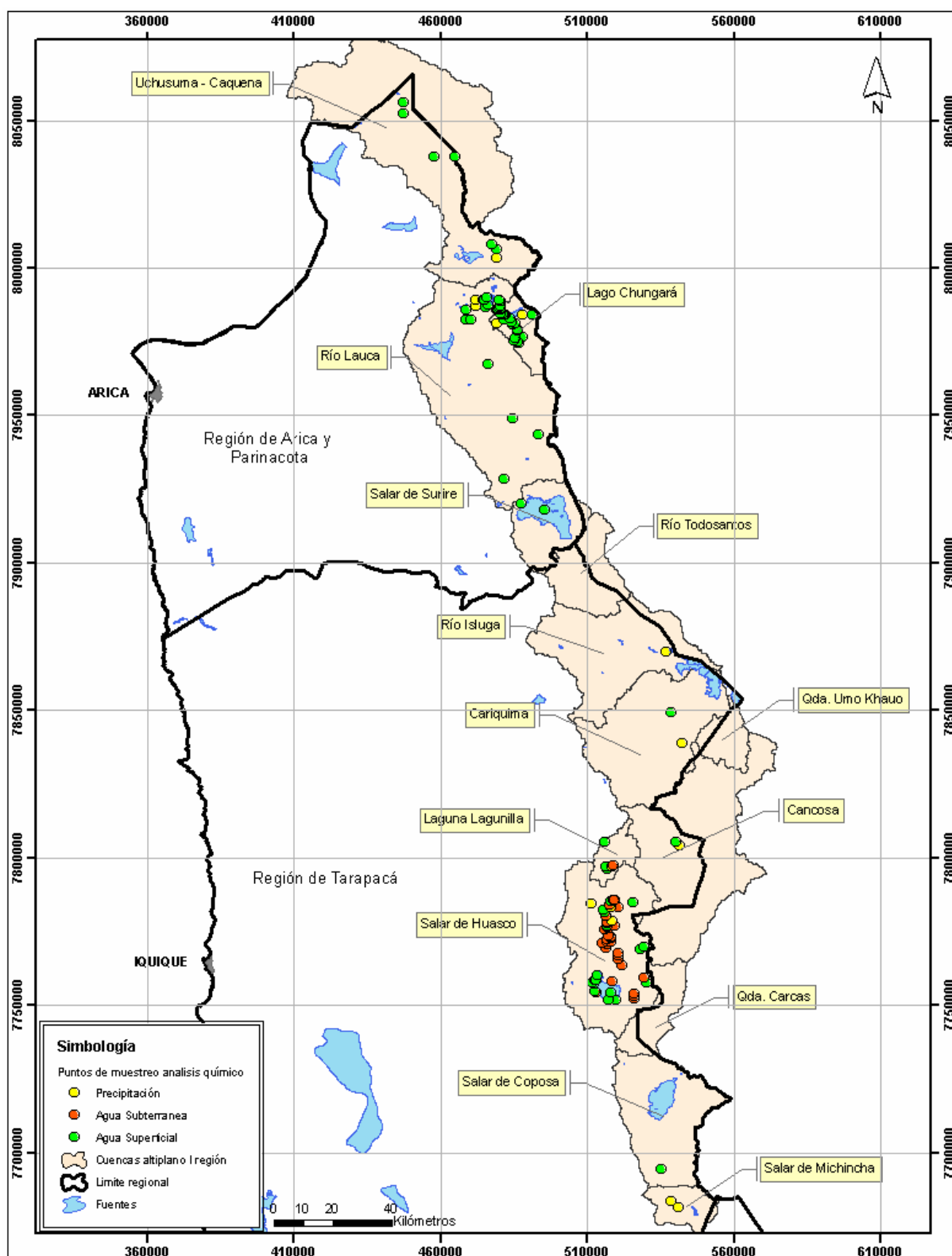


Figura 4.11: Puntos con información química en las regiones de Arica y Parinacota, y de Tarapacá.

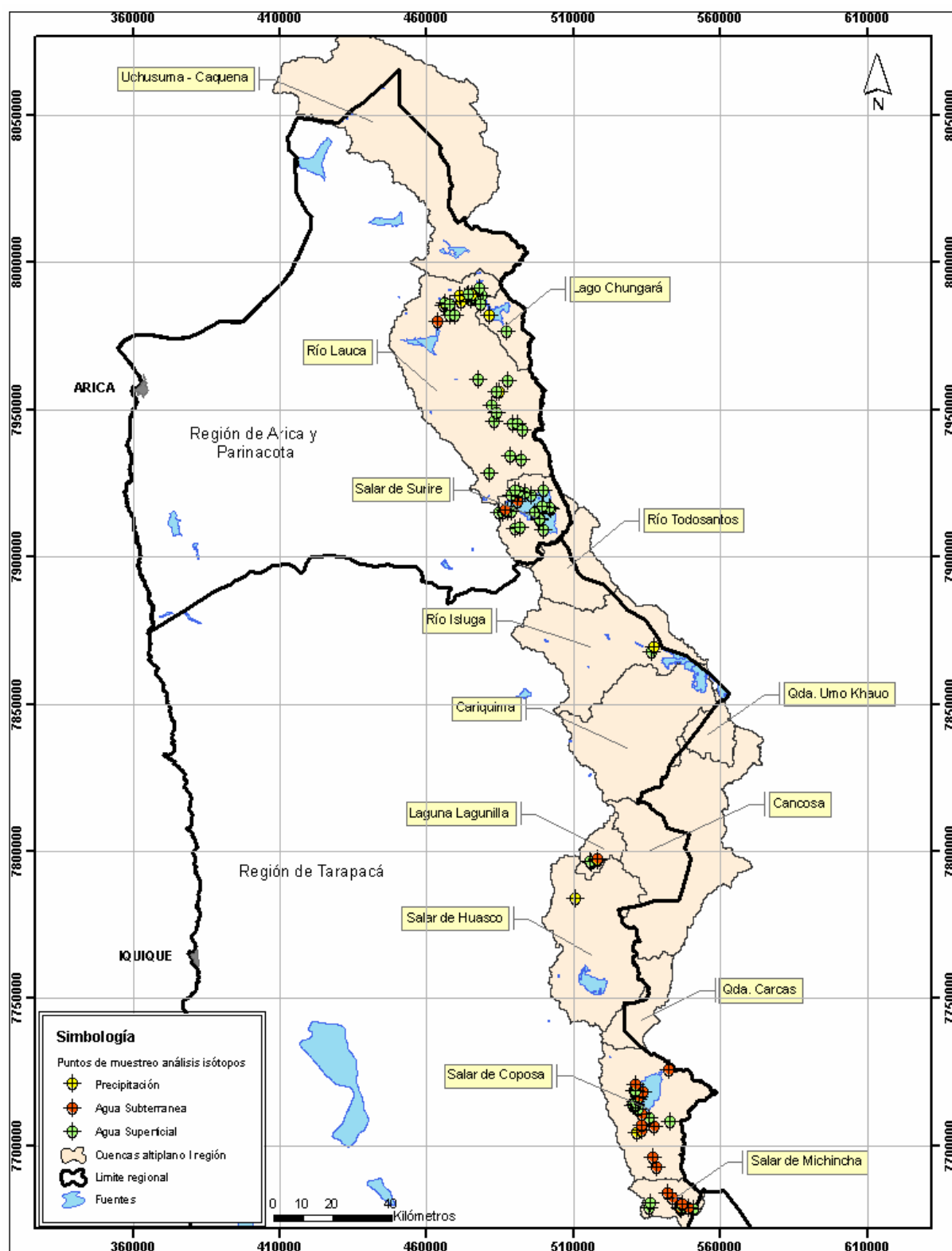


Figura 4.12: Puntos con información isotópica en las regiones de Arica y Parinacota, y de Tarapacá.

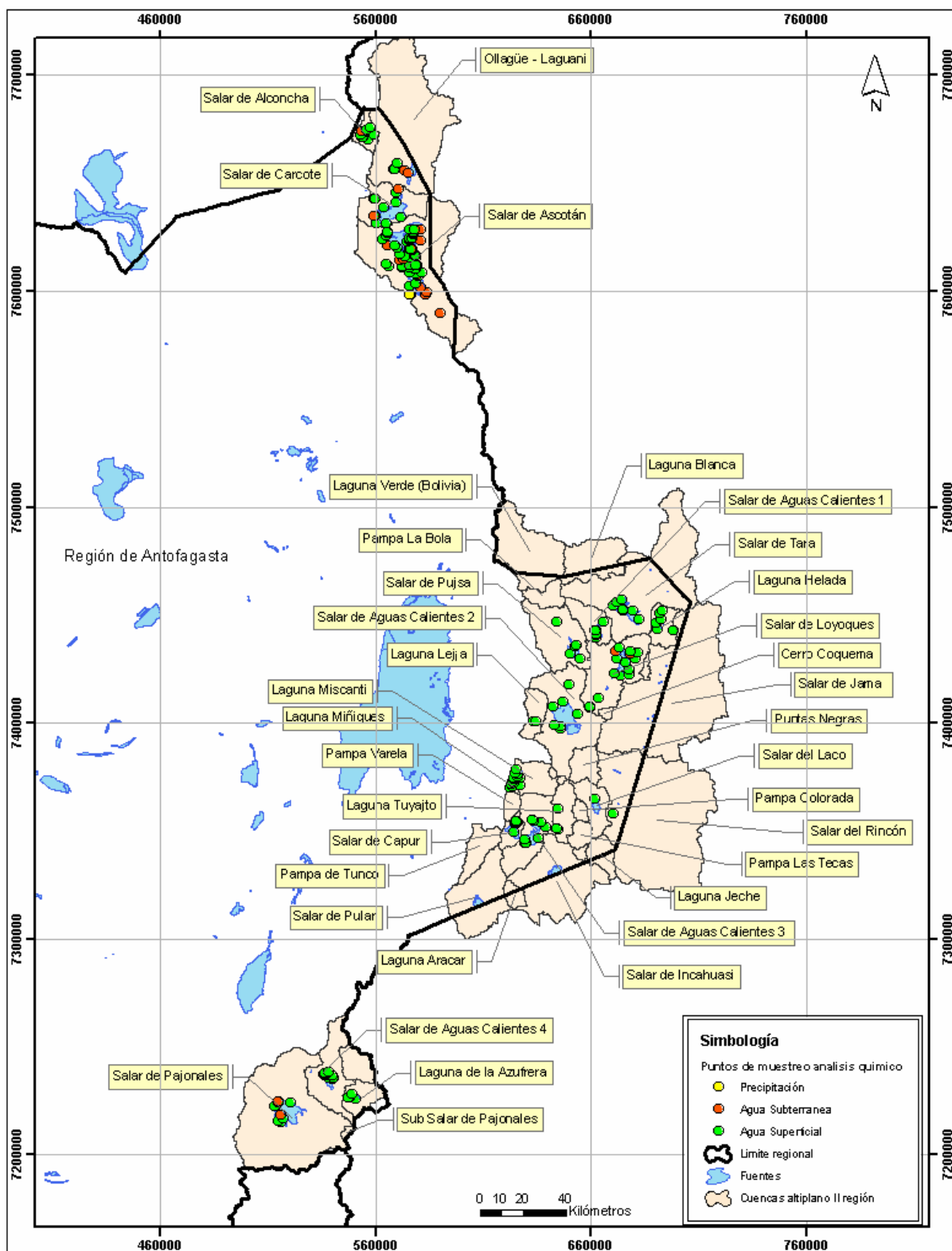


Figura 4.13: Puntos con información química en la Región de Antofagasta.

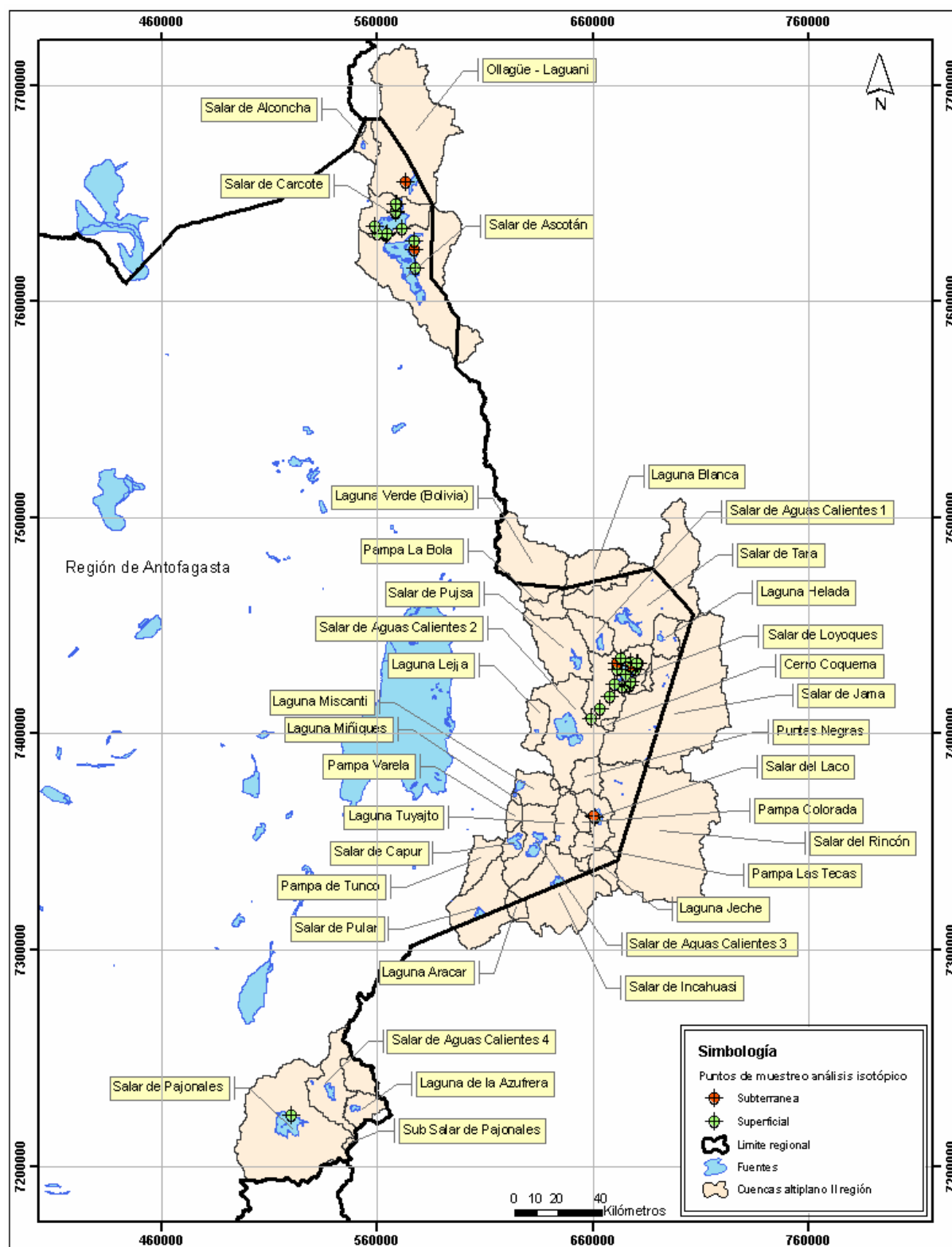


Figura 4.14: Puntos con información isotópica en la Región de Antofagasta.

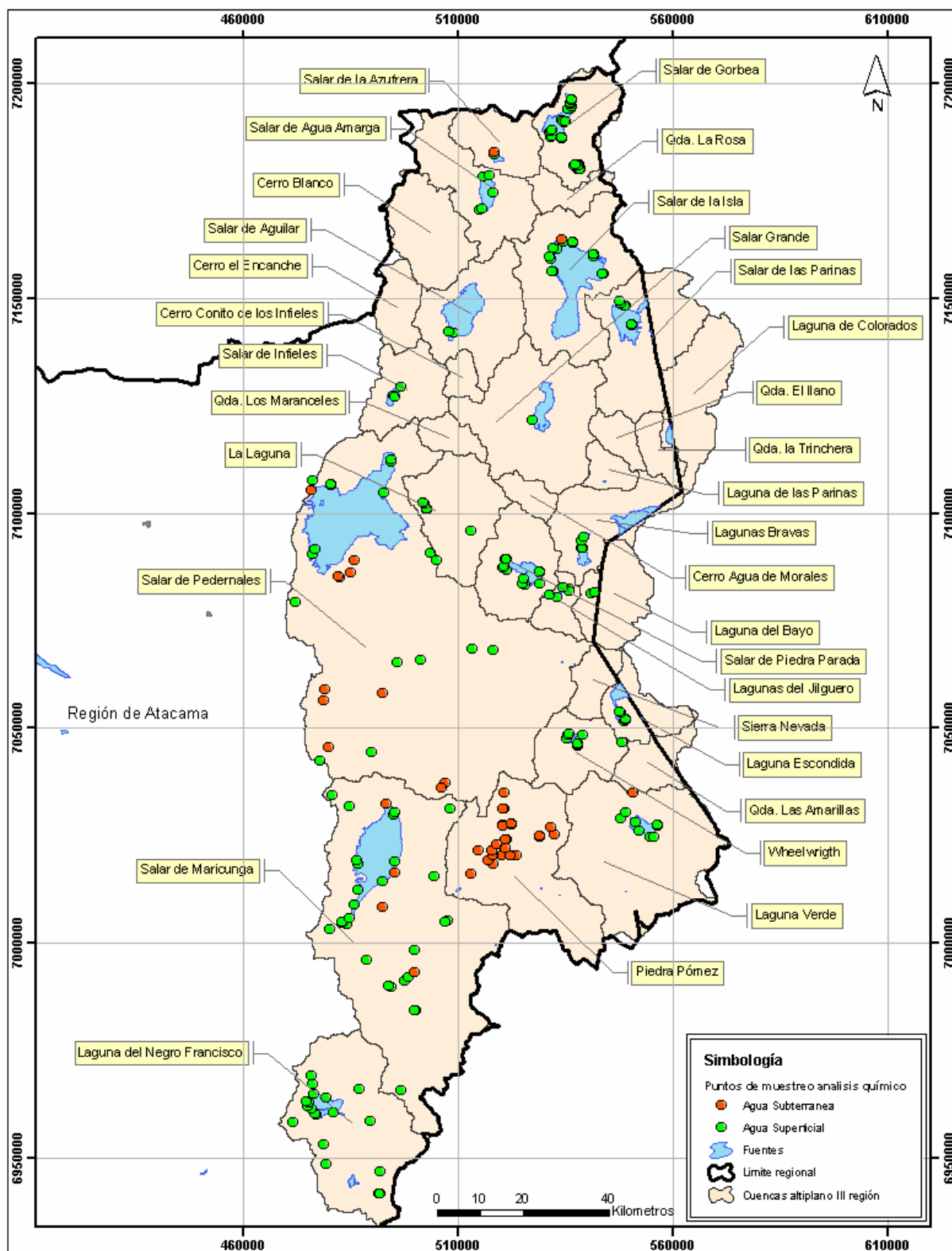


Figura 4.15 Información química recopilada en la Región de Atacama.

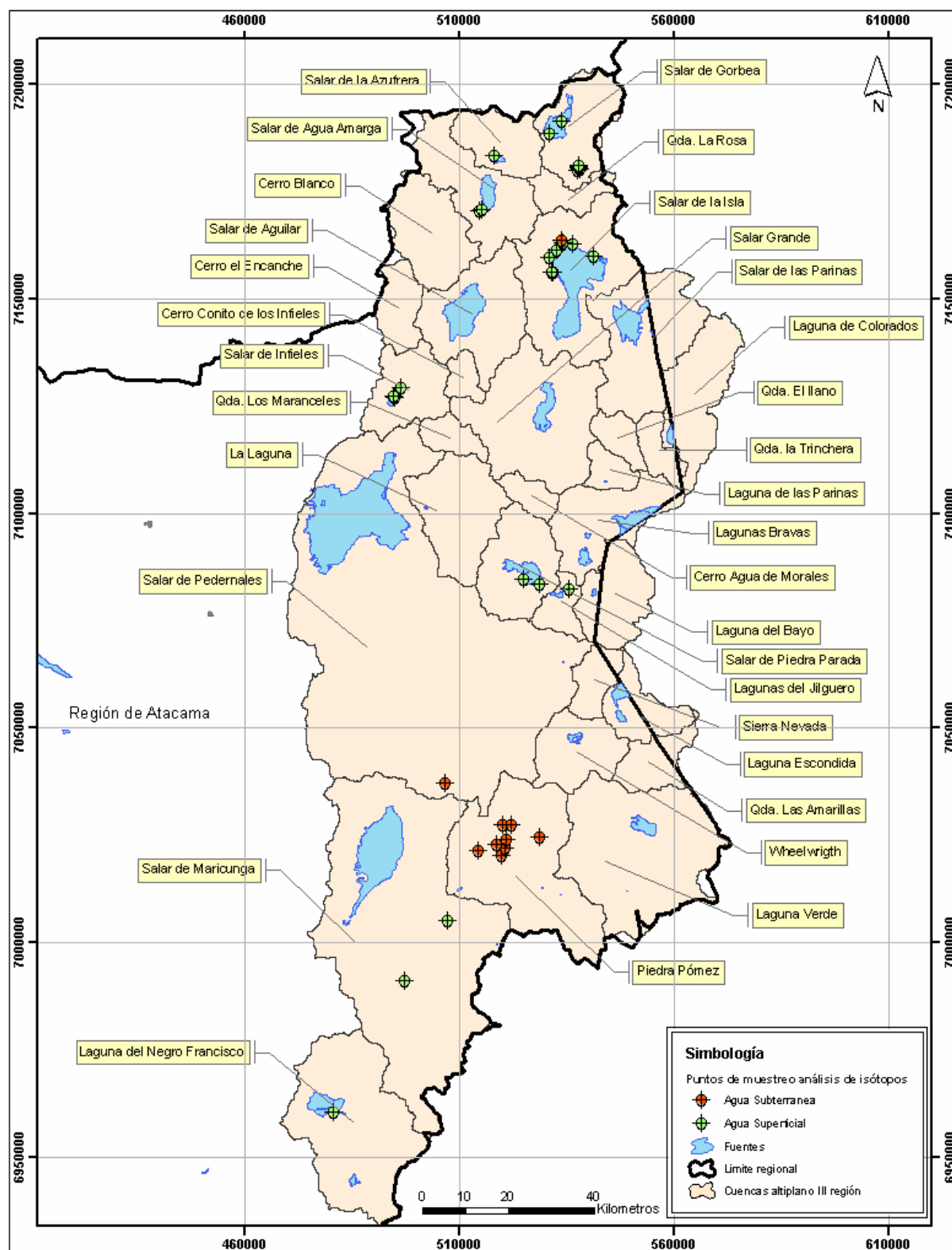


Figura 4.16 Información isotópica recopilada en la Región de Atacama.

5 HIDROGEOQUÍMICA REGIONAL

5.1 Introducción y Metodología

El objetivo de esta sección es describir a grandes rasgos algunos parámetros físico-químicos, composición química y contenidos isotópicos del Altiplano en el norte de Chile. El análisis respectivo se basa principalmente en comparaciones a nivel regional que puedan conducir a algunas interpretaciones generales sobre el comportamiento de las aguas superficiales y subterráneas.

Se analiza la distribución y rangos de valores de temperatura, pH y CE, junto con las concentraciones de elementos mayoritarios y minoritarios, enfocándolas según su variabilidad espacial y temporal, además de determinarse la calidad de las aguas en relación a las normas chilenas de agua potable (NCh 409) y de riego (NCh 1333).

La información con la que se trabajaron los parámetros físico-químicos abarca los 1.460 análisis disponibles, pero para los elementos mayoritarios solamente se consideraron los análisis que cumplen con el error de balance (820 muestras). Entre los elementos minoritarios el que cuenta con mayor cantidad de análisis (1.169) es el boro. Ya que estos compuestos se encuentran en concentraciones muy bajas, el error de balance no se asocia necesariamente a la calidad de su análisis. Por otro lado, son numerosas las muestras en que por falta de datos no ha sido posible calcular el balance iónico, pero sí se han considerado de utilidad en cuanto a la información que entregan sobre elementos minoritarios.

Es necesario recordar que en este capítulo y los siguientes, se han agrupado como aguas superficiales los ríos, esteros, lagunas y pozas, además de manantiales difusos, comunes en las zonas de bofedales. Las aguas de pozos, piezómetros, punteras y manantiales puntuales, se asocian con las aguas subterráneas.

5.2 Parámetros Físico-Químicos

En esta sección se considera temperatura, pH y CE de las aguas subterráneas y superficiales en conjunto.

Temperatura

El rango de temperatura medido en los distintos tipos de agua varía entre -1 y 53,4 °C (Figura 5.1). Influye en este parámetro la temperatura promedio del aire en el Altiplano (2- 6 °C), en el caso de las aguas superficiales su exposición a la radiación solar y en el caso de las aguas subterráneas, pueden aumentar su temperatura por el gradiente geotermal que se produce en

profundidad (3,3 °C/km), cuya fuerza aumenta cerca de centros de actividad hidrotermal. Un caso excepcional son los géiser de El Tatio, donde las aguas que afloran pueden alcanzar 86 °C (Fernández-Turiel et al., 2005). Pero normalmente las temperaturas promedio son muy similares entre las aguas superficiales y subterráneas, siendo éstas últimas ligeramente más cálidas (Figura 5.2).

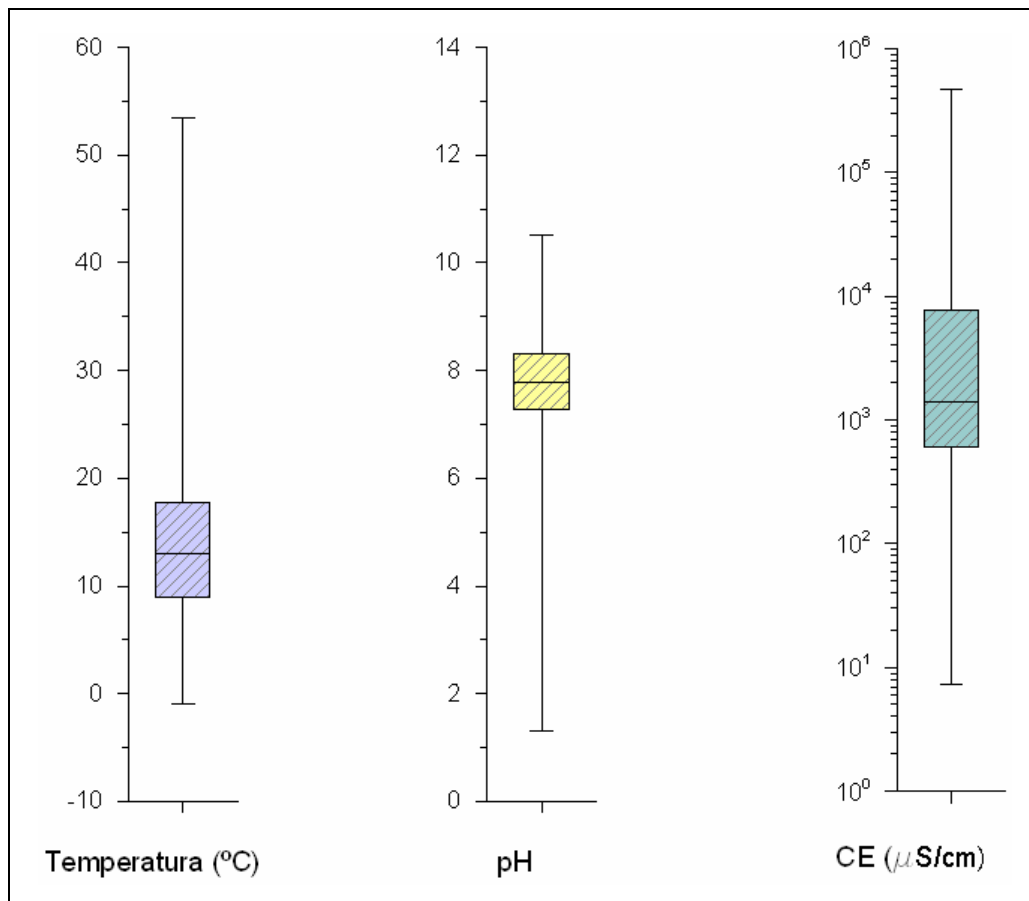


Figura 5.1: Distribución estadística de los parámetros físico-químicos.

Rango de pH

Los valores de pH varían entre 1,32 y 10,5, pero normalmente tanto las aguas superficiales como subterráneas se concentran en torno a un pH neutro (Figura 5.1Figura 5.2). La mayor parte de los valores de aguas subterráneas van de neutros a ligeramente alcalinos, siendo aún así levemente más ácidas que las aguas superficiales. La restringida distribución del rango de pH es determinada por la capacidad de *buffer* en contra de la acidificación de las rocas carbonatadas y volcánicas, junto a sus fluidos y/o gases asociados. El valor mínimo es parte de

una serie de muestras de un afloramiento superficial en el Salar de Gorbea (Región de Atacama), que ha sido registrado en distintas fechas con los mismos resultados.

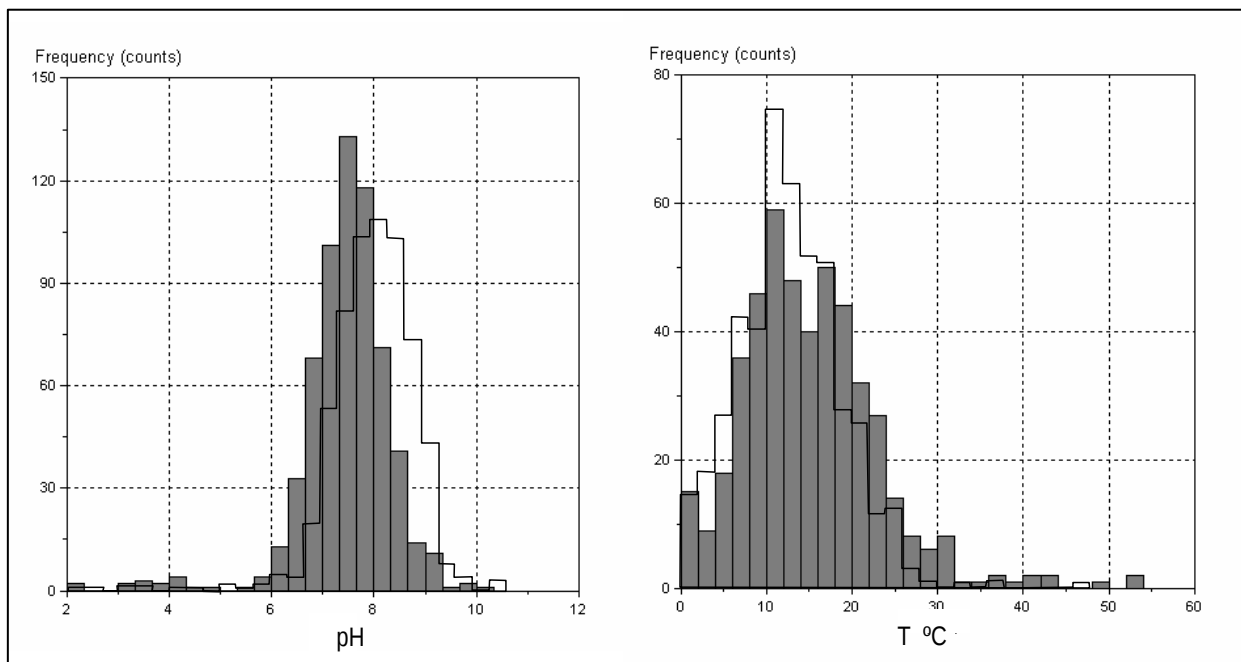


Figura 5.2: Comportamiento del pH y temperatura en aguas superficiales (rojo) y subterráneas (gris).

Conductividad eléctrica

La CE aumenta en forma proporcional con la concentración de STD en el agua, ya que las sales en disolución aumentan la carga iónica del medio acuoso. La relación entre estos dos parámetros suele ser:

$$STD(ppm) \approx [0,55 - 0,76] \times CE(\mu S / cm)$$

Ya que ambos parámetros se comportan de manera similar, basta con describir el comportamiento de la conductividad eléctrica. Generalmente aumenta desde las zonas de recarga, topográficamente más altas, hasta las zonas topográficamente más bajas de las cuencas. Durante el trayecto recorrido por los flujos subterráneos se produce un aumento de los sólidos disueltos que, en el caso además de la existencia de lagunas y salares en los depocentros de las cuencas, la evaporación contribuye a aumentar.

Por lo anterior, las muestras recopiladas en este estudio poseen un amplio rango de variabilidad, desde aguas con valores de conductividad de 7,3 $\mu S/cm$ hasta valores de 474.000

$\mu\text{S/cm}$. En la Figura 5.3 se aprecia como las aguas que en promedio son más salinas, corresponden a las muestras de agua superficial, como ríos, lagunas y pozas, especialmente de la zona cercana a los salares. Dentro de las aguas más dulces encontramos la mayoría de las aguas provenientes de pozos, una gran cantidad de manantiales, algunos ríos y lagunas, y por supuesto, las precipitaciones.

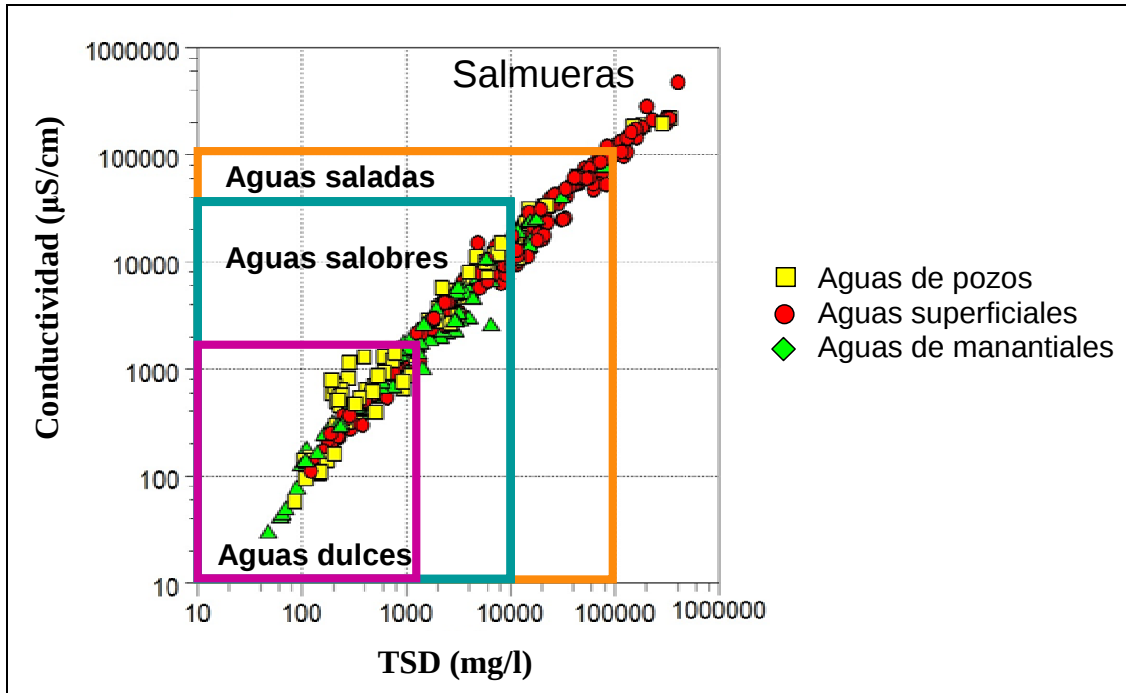


Figura 5.3: Relación directamente proporcional entre CE y STD.

Si se analizan estos resultados por región vemos que los valores de CE se distribuyen de forma logarítmica, lo que genera diferencias más marcadas entre los valores más altos (Figura 5.4). Por ejemplo el valor del tercer cuartil en las regiones I y XV es de $1.250 \mu\text{S/cm}$, en la II, $13.400 \mu\text{S/cm}$ y en la III $25.375 \mu\text{S/cm}$.

Las diferencias en el régimen de precipitaciones, así como los valores anuales promedio e incluso el tipo de precipitación (lluvia o nieve), explican estas variaciones latitudinales. En la I Región existe una precipitación promedio anual mayor que en las II y III por la influencia del *invierno altiplánico* (Parte III), lo que contribuye a la dilución de las aguas. Además los valores de evaporación en las regiones II y III son más altos que en la I, contribuyendo a la salinidad de las aguas superficiales. Por último, la distribución de CE se atribuye también al tipo de muestras predominante en cada región.

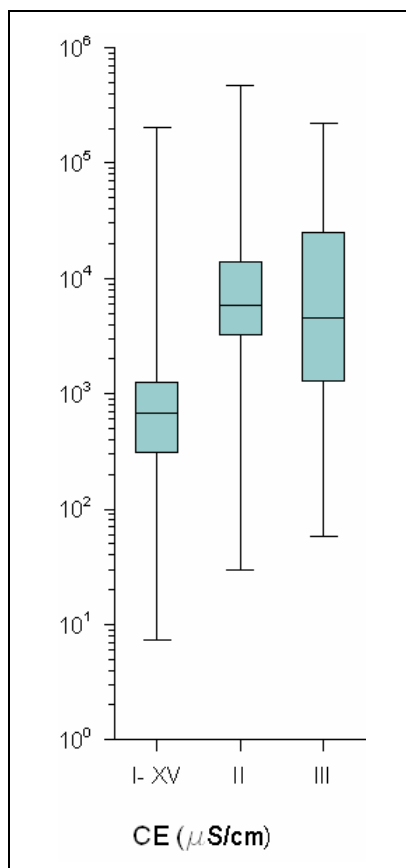


Figura 5.4: Distribución de la CE en cada región.

5.3 Elementos Mayoritarios y Composiciones Químicas

Para la presentación de estos resultados, solamente se han considerado las muestras con un error de balance iónico menor que 10%, que comprenden un total de 820, de las que 673 incluyen además análisis de NO_3^- .

Los rangos de concentraciones se detallan en la Tabla 5.1 y son representados gráficamente en la Figura 5.5. Los elementos que alcanzan las mayores concentraciones son Cl^- y Na^+ , formadores de la halita (sal común) que al ser una de las sales más solubles permite que estos elementos precipiten en último lugar.

Posteriormente tenemos la concentración de SO_4^{2-} y después de HCO_3^- y el Ca^{2+} que, a pesar de formar uno de los compuestos con la solubilidad más baja (carbonato de calcio) son bastante abundantes. Los iones mayoritarios en las aguas proceden de la meteorización química de los suelos, la alteración de rocas y la redisolución de sales que, combinadas con el proceso de la evaporación llevan a un incremento paulatino de los elementos disueltos. Luego

el medio acuoso alcanza su nivel de saturación y sobresaturación para los distintos compuestos, produciéndose así la precipitación de sales en el orden que determinan los productos de solubilidad de las mismas.

Tabla 5.1: Valores máximos y mínimos de los elementos mayoritarios (mg/L).

Elemento	N° datos	Máximo	Mínimo	Percentil 25	Mediana	Percentil 75
Cl ⁻	820	150.000	0,249	28,40	194,5	2.791
SO ₄ ²⁻	820	37.800	<0,100	83,93	243,5	690
HCO ₃ ⁻	820	1.980	1,590	62,43	128,5	259
NO ₃ ⁻	673	275	<0,002	0,10	0,7	3
Na ⁺	820	92.000	2,140	42,80	184,0	1.640
K ⁺	820	64.030	<0,010	7,40	31,0	134
Mg ²⁺	820	6.340	<0,080	13,40	41,2	126
Ca ²⁺	820	21.000	0,168	35,90	78,8	281

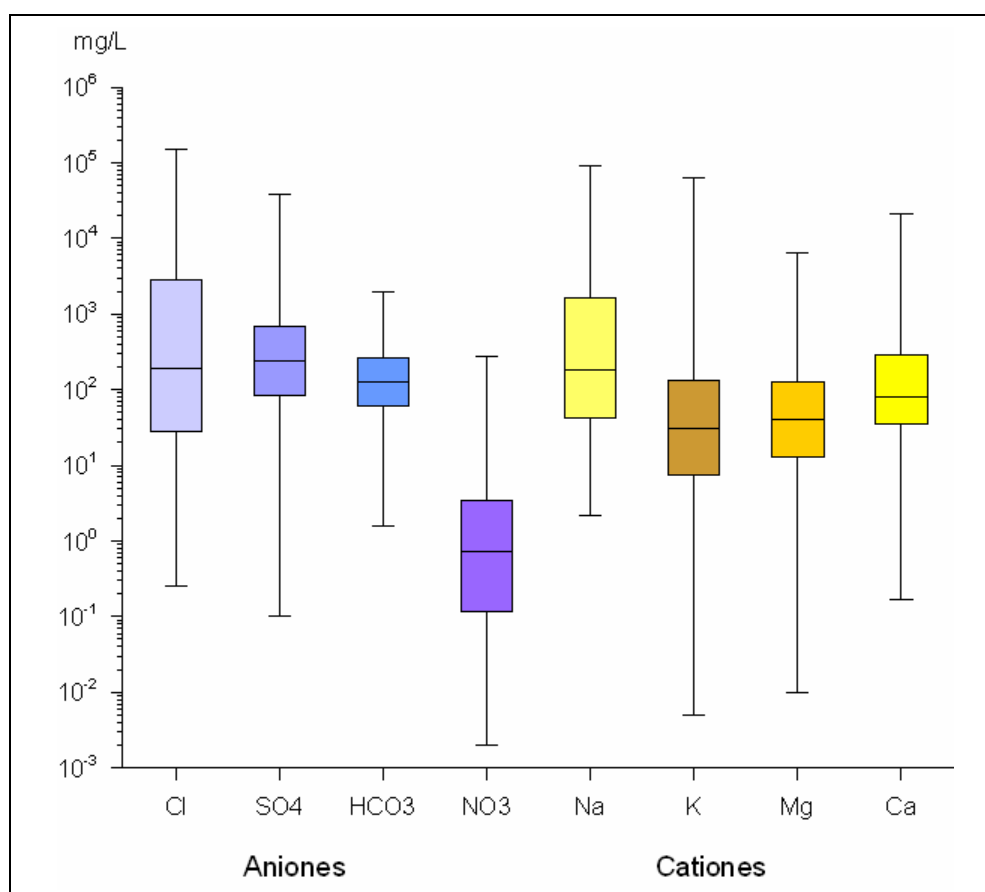


Figura 5.5: Distribución estadística de elementos mayoritarios.

Se calcularon los índices de saturación del CaCO_3 , CaSO_4 y NaCl . Aproximadamente la mitad de las muestras se encuentran saturadas en CaCO_3 , mientras que solamente en los salares se encontraron muestras de aguas saturadas en CaSO_4 . La saturación del NaCl no se encontró en ningún análisis.

Para estudiar la composición química se han realizado dos grupos según la salinidad de las aguas. El mismo procedimiento se realiza para las aguas subterráneas y superficiales en los apartados 6.2 y 7.2. Según Risacher et al. (1999), las aguas que reciben su mineralización mayoritariamente a través de la alteración de rocas tienen valores de cloruro inferiores a 200 mg/L, mientras que las aguas con valores de cloruro superiores envuelven otros procesos como la disolución de costras de sal o la evaporación.

La Figura 5.6 presenta las composiciones de estos dos grupos representadas en los diagramas de Piper. Existe un rango de composiciones desde aguas bicarbonatadas, sulfatadas y cloruradas, con composiciones catiónicas desde cálcicas a sódicas, con una proporción de magnesio que no suele superar el 60% de la concentración de cationes en meq/L.

Las composiciones químicas de las aguas con un contenido de $\text{Cl}^- < 200$ mg/L presentan composiciones mayoritariamente bicarbonatadas y sulfatadas, con composiciones catiónicas intermedias, en general con una mayor proporción de calcio, pero algunas también con altas concentraciones relativas de Na^+ . Para las aguas superficiales procedentes de lagunas la componente magnésica puede ser más importante, sin llegar a ponderar nunca más del 60% de las especies catiónicas mayoritarias.

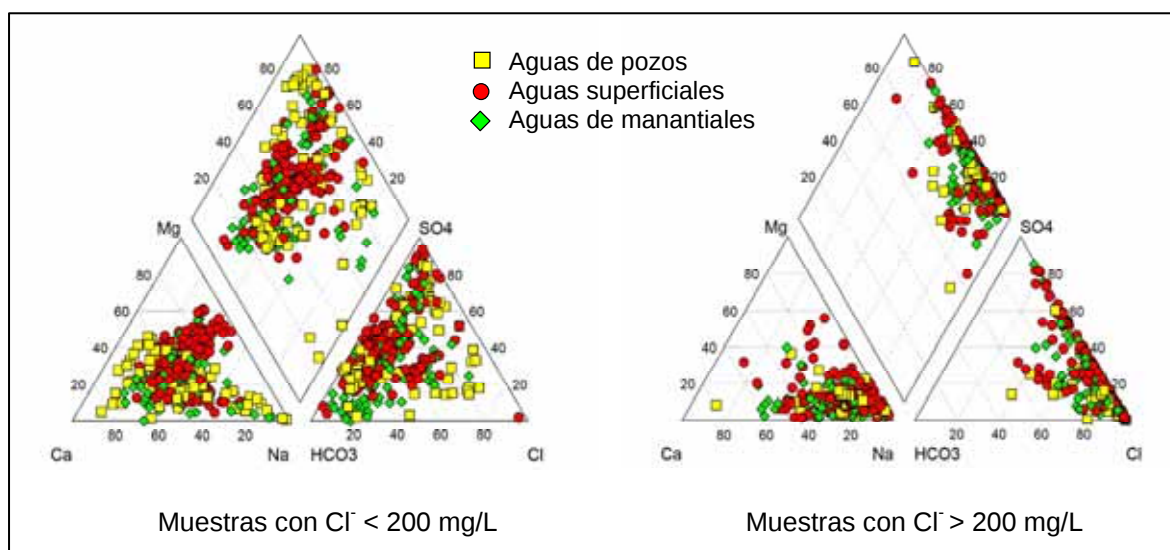


Figura 5.6: Composición química según el contenido de Cl^- .

Las aguas con un contenido de $\text{Cl}^- > 200 \text{ mg/L}$ presentan composiciones mayoritariamente cloruradas, algunas sulfatadas, y apenas alcanza proporciones del 40% de HCO_3^- en la mayoría de las aguas. En cuanto a los cationes suele dominar el Na^+ , con algunas pocas aguas de composición intermedia, cálcicas a magnésicas.

Estos resultados muestran que las composiciones químicas son en parte dependientes del contenido de STD en las aguas, aún cuando en estos gráficos no se observan grandes diferencias respecto al tipo de agua analizada, lo que permite suponer que los procesos que las afectan o el origen de sus compuestos, son parecidos.

Las Regiones I y XV presentan aguas más dulces con composiciones mayoritariamente bicarbonatadas a sulfatadas intermedias, mientras que las regiones II y III, con muestras más salobres, son principalmente del tipo clorurada sódica (Figura 5.7).

En la Figura 5.8 se presentan las composiciones de las muestras de manantiales que se relacionan con una influencia termal. Según Marini (2008) las aguas hidrotermales tienen cuatro composiciones típicas que son aguas cloruradas sódicas, sulfatadas ácidas, bicarbonatadas sódicas y aguas cloruradas-sulfatadas ácidas. También pueden encontrarse mezcladas. Las aguas neutras a bicarbonatadas sódicas proceden de la zona de condensación de vapores geotermales, mientras que las aguas neutras cloruradas sódicas se encuentran típicamente en sistemas geotermales profundos, y parecen ser el origen de la composición de estas muestras.

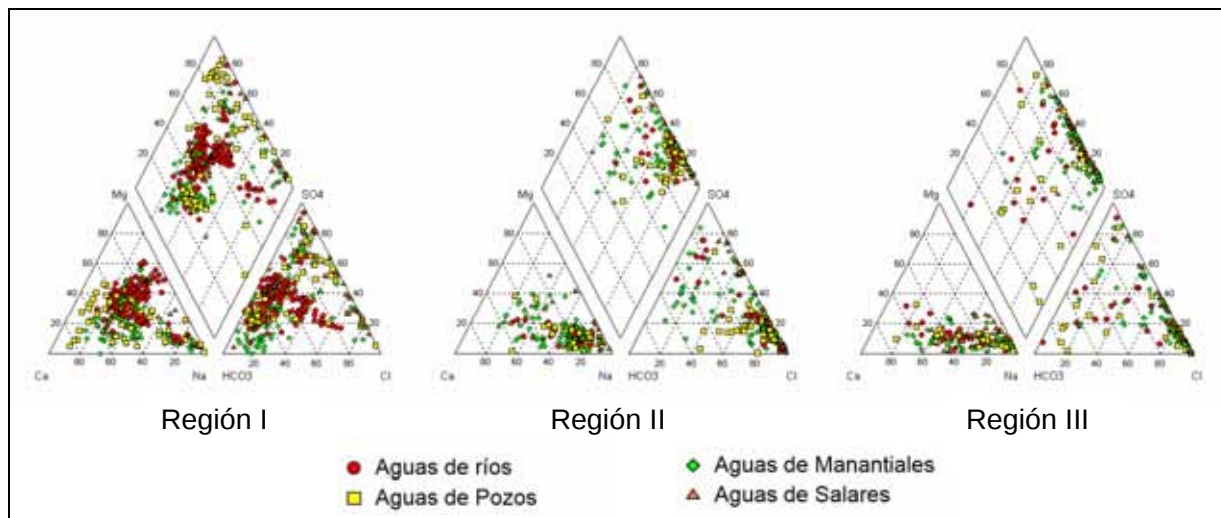


Figura 5.7: Distribución de las composiciones químicas entre las cuatro regiones.

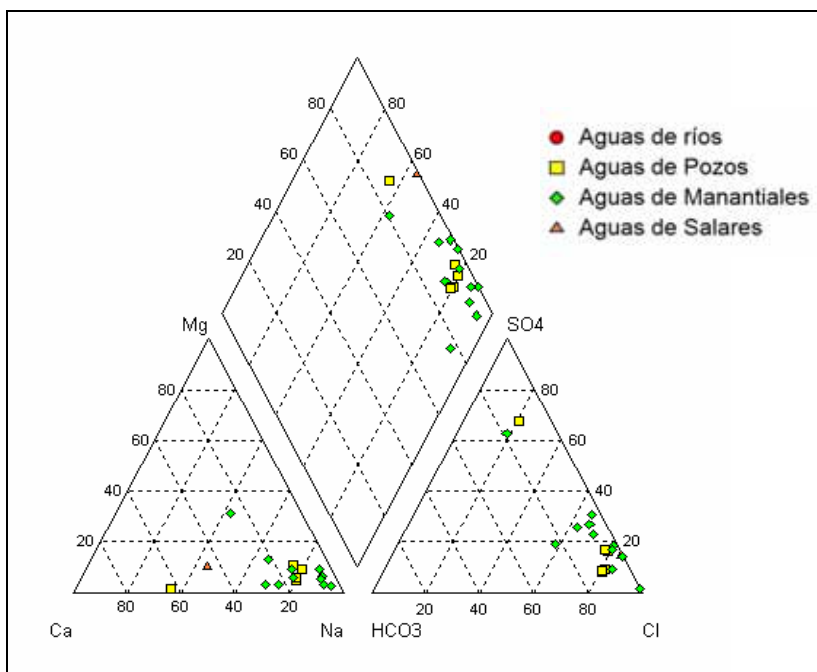


Figura 5.8: Aguas con influencia termal.

5.4 Elementos Minoritarios

Los altos contenidos de elementos minoritarios disueltos en las aguas salinas de las cuencas endorreicas, concentrados por las condiciones de aridez, han generado históricamente muchas investigaciones sobre el origen de dichos elementos. Éstos son producto de alteraciones de rocas (Risacher et al., 2003), volcanismo (Risacher et al., 1999), presencia de aguas hidrotermales (Tassi et al., 2008) y transporte eólico (Rech et al., 2003). Un resumen de los rangos de concentración de cada elemento se presenta en la Tabla 5.2 y se ilustra en la Figura 5.9. No se señala el valor de la concentración mínima de cada elemento, sino que el límite de detección comúnmente señalado en los análisis de laboratorios. Para representar de alguna forma este dato en el análisis estadístico, se ha asumido que la concentración del elemento corresponde a un cuarto del valor del límite de detección.

Los elementos minoritarios más abundantes en promedio (>2 mg/L) son el B, Si y Li. Los que alcanzan los valores de concentración más alto son el As, B, Al, Li, PO_4^{3-} y Mn. Muchos autores (Risacher y Alonso, 1996; Risacher et al., 1999) asocian el origen del B y el Li con la actividad volcánica que predomina en el sector andino.

El Si procede de la disolución de los silicatos que forman las rocas ígneas, en los que se presenta como tetraedro de SiO_4^{4-} cuya disposición varía según la clase de silicato. Generalmente su solubilidad es muy baja, pero aumenta con la temperatura. Los altos

contenidos en Si no disminuyen cuando posteriormente las temperaturas decrecen (Fournier y Truesdell, 1970). Por su parte el B y el Li se comportan como elementos conservativos, por lo que suelen concentrarse en la fase acuosa a medida que las aguas evolucionan y otros elementos van precipitando.

Tabla 5.2: Resumen de la distribución de las concentraciones (en mg/L) de los elementos minoritarios más comunes.

Parámetro		Nº datos	L.D.	Perc. 25	Mediana	Perc. 75	Máximo
Al	Aluminio	152	0,05	0,0100	0,100	7,250	4.560,00
As	Arsénico	1.153	0,0002	0,0200	0,100	0,658	6.100,00
B	Boro	1.169	0,5000	2,2000	24,300	118,000	3.415,00
Ba	Bario	139	0,2- 1,0	0,0050	0,034	0,200	1,17
Cr	Cromo	145	0,005- 0,020	0,0100	0,053	0,134	1,53
Cu	Cobre	393	0,005	0,0053	0,010	0,050	11,97
F	Fluoruro	307	0,0020	0,2300	0,450	0,740	50,00
Fe	Hierro	546	0,02- 0,05	0,0700	0,250	0,700	145,00
Hg	Mercurio	152	0,0002- 0,001	0,0010	0,001	0,200	0,70
I	Yodo	555	0,0003	0,0219	0,073	0,270	33,40
Li	Litio	790	0,02	0,3418	2,000	9,213	1.080,00
Mn	Manganeso	304	0,010	<0,010	0,035	0,384	1.530,00
Mo	Molibdeno	218	0,01- 0,20	0,003	0,013	0,050	1,38
Pb	Plomo	184	0,001- 0,005	0,0008	0,002	0,009	0,11
Se	Selenio	137	0,0001- 0,005	0,0010	0,005	0,058	2,65
Si	Silicio	45	---	15,1000	25,200	30,000	65,50
Zn	Zinc	216	0,0050	0,0100	0,025	0,070	55,00
PO ₄ ³⁻	Fosfato	238	0,0005	0,1005	0,223	0,500	1.543,00

Los elementos que poseen una menor concentración promedio (<0,03 mg/L) son el Pb, Se, Cu, Mo, Zn, Mn y Ba.

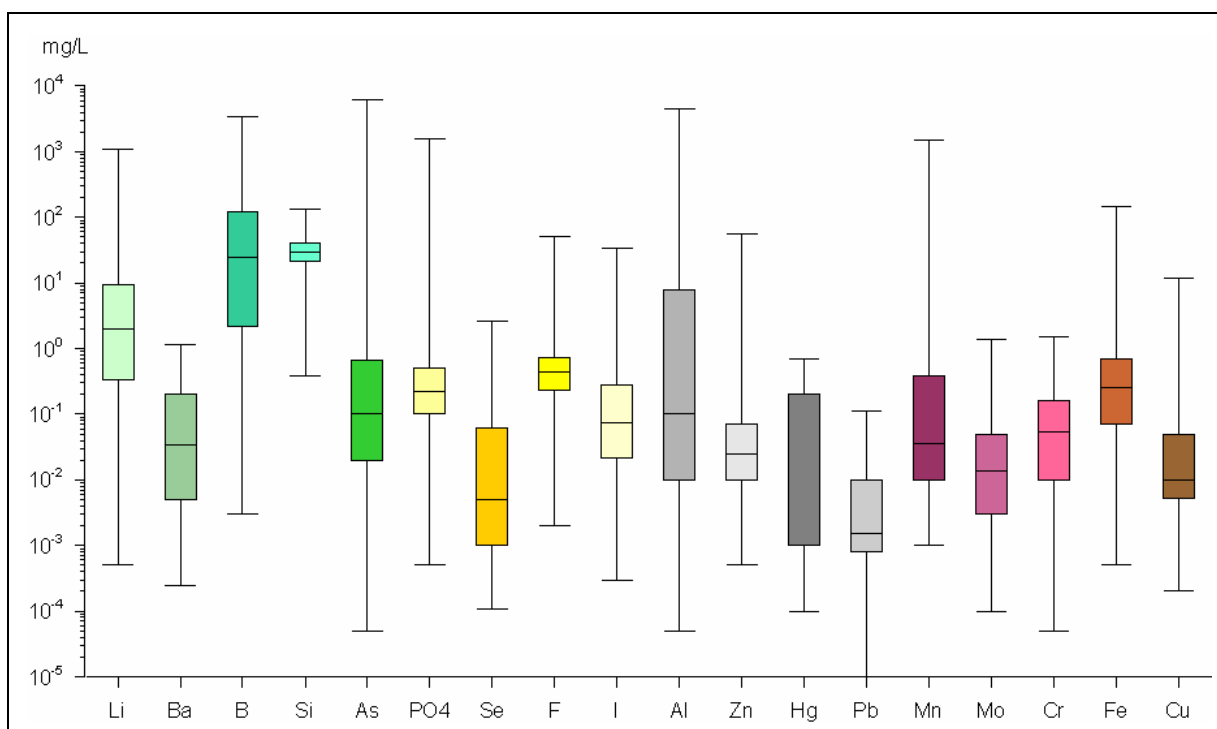


Figura 5.9: Distribución estadística de las concentraciones de los elementos minoritarios.

5.5 Variabilidad Espacial de Concentraciones y Composiciones

Se trata de un análisis basado en las diferencias observadas entre las cuatro Regiones y sus cuencas. Dadas las grandes diferencias de salinidad derivadas del tipo de punto en que cada muestra ha sido obtenida (pozos, manantiales, ríos, lagunas, precipitaciones...) es difícil realizar un análisis general de las variaciones químicas. En los apartados anteriores se ha observado que las mayores diferencias composicionales entre las Regiones I y XV y las Regiones II y III viene dada por las diferencias entre los regímenes de lluvias (en cantidad y tipo), que favorece el desarrollo de aguas relativamente más dulces en la Primera Región (Figura 5.4), con composiciones mayoritariamente bicarbonatadas-sulfatadas intermedias, y más salobres en las Regiones II y III, con composiciones mayoritariamente cloruradas sódicas (ver Figura 5.7).

Sin embargo, para analizar la variabilidad y distribución espacial de cada elemento conviene estudiar las variaciones de su concentración tomando como referencia la CE. De este modo, independientemente del grado de evaporación o disolución de sales en las aguas, se pueden apreciar diferencias relativas entre cuencas y regiones.

En este apartado se presentan sólo los resultados de este análisis para el Li y As, como ejemplo del ejercicio que podría realizarse de manera similar con otros elementos y compuestos. Los elementos escogidos se consideran interesantes porque presentan altas concentraciones absolutas en algunas muestras y por los riesgos para la salud humana que puede generar su ingestión.

La Figura 5.10 muestra la relación entre el Li y la CE para algunas de las cuencas de este estudio. Se puede observar como en la cuenca del Salar de la Isla (ISL) por ejemplo, las aguas presentan contenidos relativos de Li mucho mayores que los de la cuenca del Salar de Alconcha (ALC). Para un mismo valor de CE estas concentraciones pueden alcanzar hasta un orden de magnitud de diferencia.

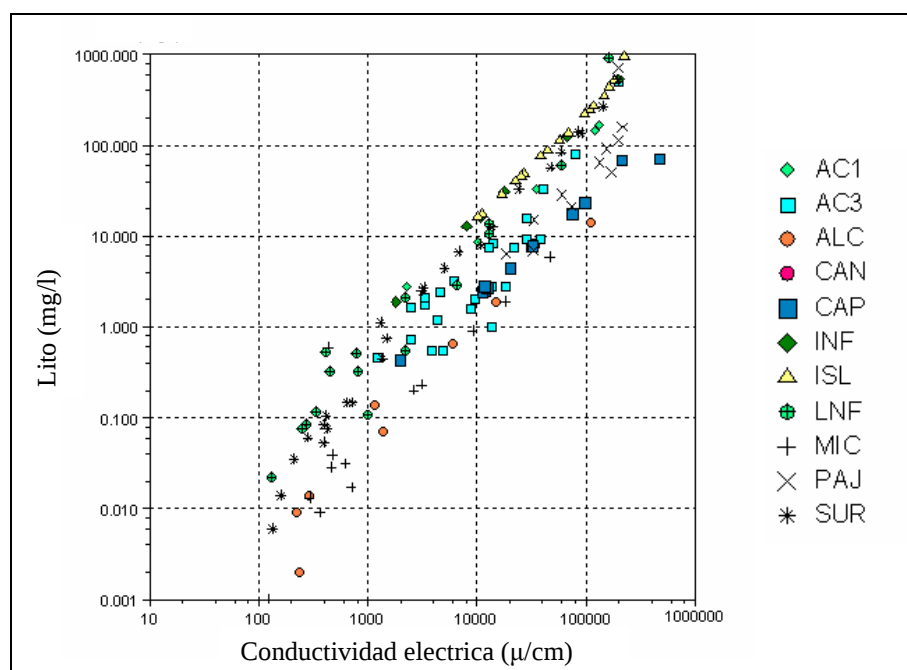


Figura 5.10: Concentración de Li en relación a la CE por cuenca (AC1: S. de Aguas Calientes 1, AC3: S. de Aguas Calientes 3, ALC: S. de Alconcha, CAN: Cancosa, CAP: S. de Capur, INF: S. de Infieles, ISL: S. de la Isla, LNF: Lgna. del Negro Francisco, MIC: S. de Michincha, PAJ: S. de Pajonales, SUR: S. de Surire).

Con estas relaciones se pueden definir rangos promedio habituales de concentraciones relativas para cada elemento en el Altiplano chileno y definir así concentraciones fuera de lo normal. Esto se señala en la Figura 5.11 para las concentraciones de Li y As, donde la franja central de puntos rojos corresponde a las concentraciones promedio de estas cuatro Regiones en conjunto, y se distinguen en los contornos de este grupo las muestras con concentraciones

mayores o menores, en relación con la CE. Este criterio permite clasificar las aguas en tres rangos de concentración, cuya ubicación espacial se aprecia en las Figura 5.12 y Figura 5.13, para el Li y el As respectivamente. Los altos contenidos relativos en Li se encuentran en el norte de la Segunda Región y en la Tercera, mientras que las concentraciones más bajas se encuentran en el sur de la Segunda Región, en la parte este del Salar de Pedernales y en Laguna Escondida.

Los contenidos de As presentan mayores variaciones en puntos que se encuentran a menores distancias, pero también se pueden observar diferencias marcadas entre el norte y sur de la Primera Región, y entre el norte y centro de la Tercera Región. Estos comportamientos deberían correlacionarse con la geología de la zona y/o la actividad volcánica activa o extinta de cada sector.

Esta correlación se ha establecido en el análisis de los sistemas pilotos (Partes VIII, IX y X) y se deja planteada como herramienta interesante para trabajos futuros que puedan realizarse en la zona o que busquen entender el origen y comportamiento de los distintos elementos disueltos en las aguas.

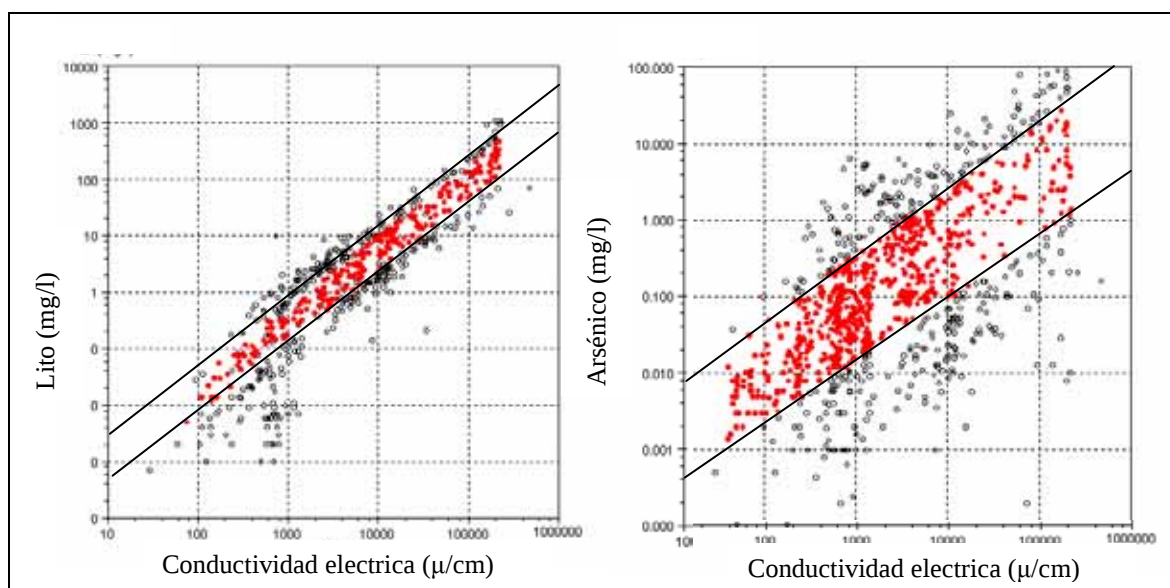


Figura 5.11: Determinación del rango relativo de concentración promedio de Li y As.

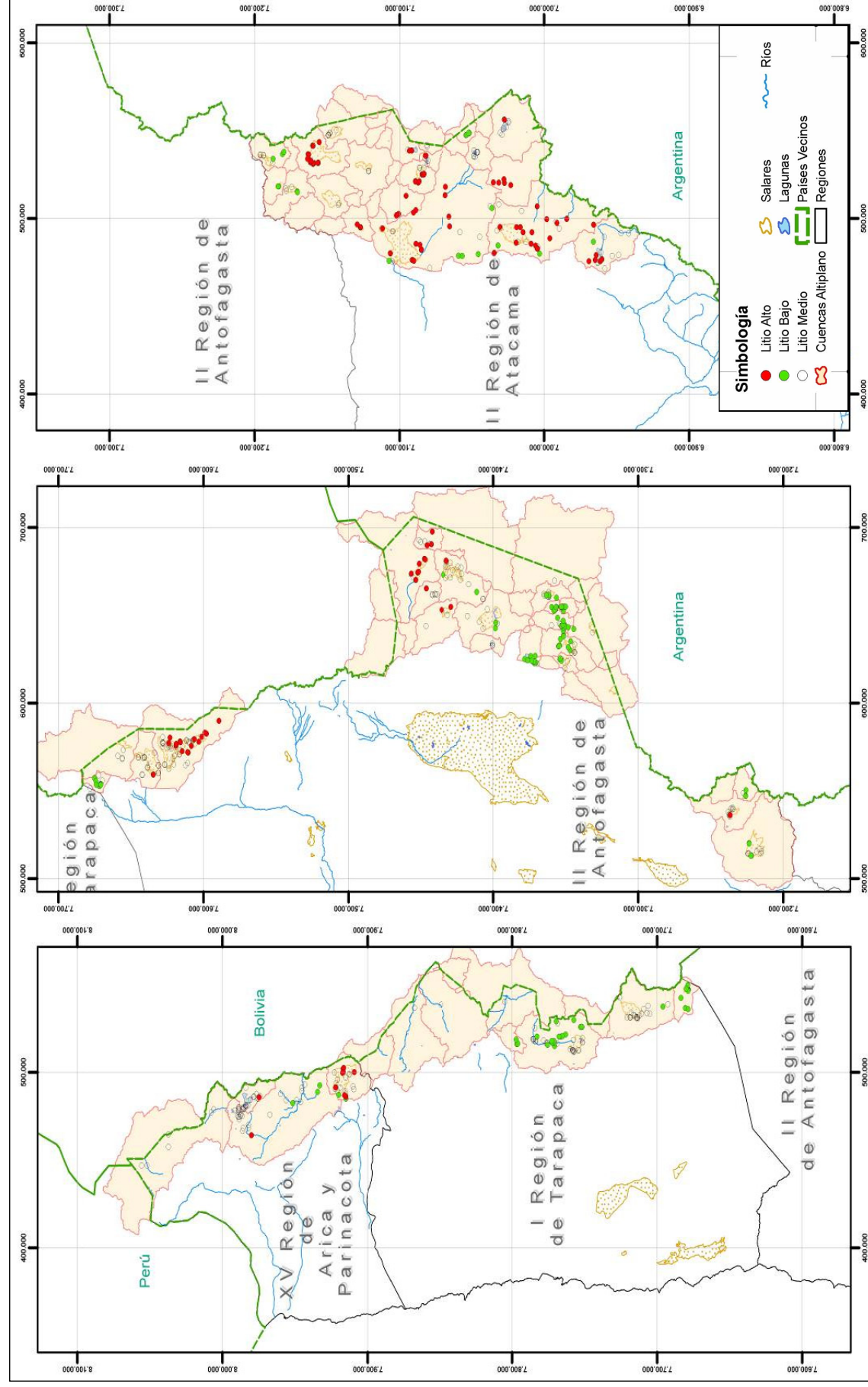


Figura 5.12: Mapas de distribución espacial de las concentraciones relativas de Li.

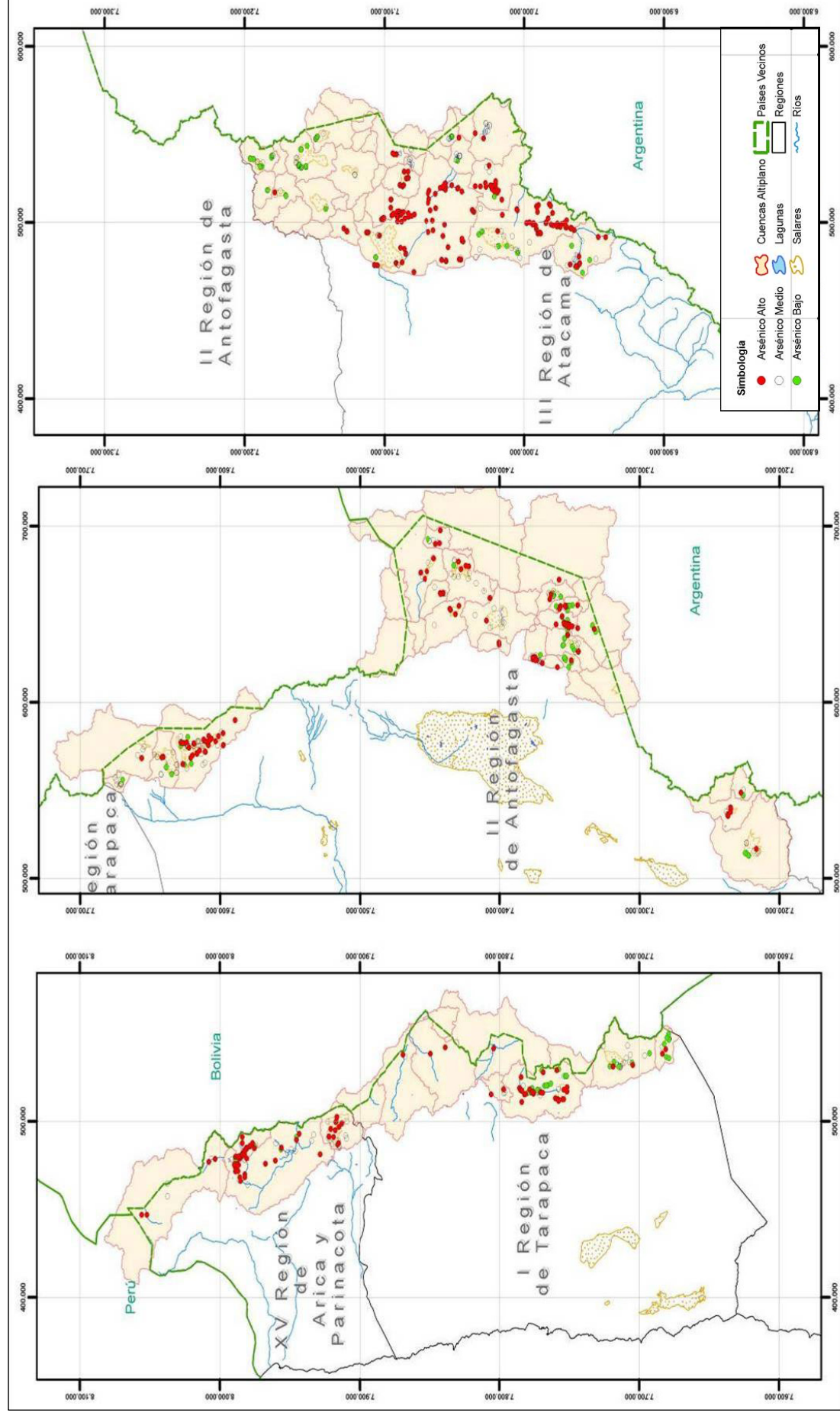


Figura 5.13: Mapas de distribución de las concentraciones relativas de As.

5.6 Calidad de las Aguas

En este apartado se evalúa la calidad de las aguas tomando como referencia los límites máximos establecidos en las normas chilenas de agua potable (NCh409/1.Of.2005) y para el uso de riego (NCh1333.Of78). Es importante señalar que no se busca comprobar la aptitud de las aguas para estos usos, sino solamente evaluar las calidades naturales de las aguas con estos criterios conocidos por el público en general.

Para cada parámetro se ha contabilizado el número de muestras por tipo de agua (ríos, pozos, manantiales, lagunas/salares y lluvia/nieve) en que ha sido analizado, y el número de muestras que sobrepasan el valor límite del parámetro fijados por ambas normativas. Los resultados se muestran en las Tabla 5.4 y Tabla 5.5, para las normas NCh409 y NCh1333 respectivamente.

Como es de suponer, las precipitaciones cumplen generalmente con estas dos normativas, sobrepasando en algún caso los valores límite de arsénico y pH de la norma potable, mientras que en una sola muestra el límite del nitrógeno de la norma de riego. Los compuestos que en ningún tipo de agua han sobrepasado los valores límite de la norma de agua potable son el NO_2^- y NH_3 , y para la norma de aguas para riego, el Ba y el Pb. Para la norma de agua potable los parámetros que más sobrepasan los valores límites son: para los ríos Se, As y Cr, para los pozos el CN^- , As, Cr y Mn, y para los manantiales y lagunas el As, STD y Cl. Respecto a la norma de riego: para los ríos el Se, B y Cr, para los pozos el CN^- , B, Cl y Cd, para los manantiales el B, STD y Cl, y para las lagunas, el B, STD, SO_4^{2-} y As.

La Tabla 5.3 resume la cantidad de muestras por cada tipo de agua que no cumplen las normas mencionadas. Esto quiere decir que sobrepasan los límites máximos establecidos por lo menos en uno de los parámetros analizados.

Según estos resultados casi un 80% de las muestras analizadas supera las dos normativas de calidad referentes a dos usos concretos (agua de boca y riego). Las razones se encuentran en las condiciones naturales geológicas y climáticas del Altiplano chileno (intensa actividad volcánica, alteración hidrotermal, baja precipitación, alta evaporación, largo tiempo de residencia de las aguas, etc.) que favorecen el desarrollo de aguas poco dulces a salobres, e incluso salinas, excediendo muchas veces los valores de referencia establecidos. Esto se acompaña por el tipo de puntos en que se han recolectado las muestras, pues muchos de los manantiales estudiados se ubican en los bordes de los salares de las cuencas estudiadas y en ocasiones incluso se describen como “difusos”. Esto quiere decir que sus aguas pueden haber circulado por la superficie, quedando así expuestas a la evaporación o produciendo la redisolución de sales transportadas por el viento hacia las laderas de los salares. Un ejemplo ilustrativo es que el tipo de aguas que más cumple con los límites fijados por ambas

normativas son las aguas de manantiales (además de las lluvias), pero su grado de incumplimiento sigue siendo alto (70 y 77% para agua potable y riego, respectivamente).

Tabla 5.3: Porcentaje de muestras que no cumplen las normas respectivas.

NCh409	Total muestras	No cumplen	%
Ríos	328	287	87,5
Pozos	309	289	93,5
Manantiales	365	254	69,6
Lagunas	318	304	95,6
Precipitaciones	140	12	8,6
Suma	1460	1146	78,5

NCh1333	Total muestras	No cumplen	%
Ríos	328	299	91,2
Pozos	309	290	93,9
Manantiales	365	280	76,7
Lagunas	318	307	96,5
Precipitaciones	140	10	7,1
Suma	1460	1138	77,9

En las Figura 5.14 y Figura 5.15 se presenta la ubicación de aquellas muestras que cumplen las normas chilenas de agua potable y de riego en cada región. En estos mapas las muestras se han diferenciado según el tipo de agua. Las aguas de mejor calidad se ubican en las Regiones I y XV, y algunas pocas en la II Región. La razón de esta distribución se debe muy probablemente a la distribución de las precipitaciones, que ha sido descrita anteriormente.

Tabla 5.4: Calidad de las aguas en puntos de muestreo según norma chilena de agua potable (NCh409).

NCh409 Parámetro	Límite	Ríos		Pozos		Manantiales		Lagunas		Lluvia/Nieve	
		Total	Sobrepasan	Total	Sobrepasan	Total	Sobrepasan	Total	Sobrepasan	Total	Sobrepasan
STD	1.500	125	42	257	111	246	139	206	188	12	0
Cl	400	319	54	300	127	321	153	297	216	13	0
SO ₄	500	322	23	300	79	325	63	292	189	12	0
NO ₃	50	139	0	262	6	214	0	228	13	10	0
NO ₂	3	10	0	78	0	13	0	17	0	0	0
NH ₃	1,5	1	0	4	0	14	0	0	0	0	0
Mg	125	321	16	300	61	324	40	290	175	13	0
As	0,01	306	270	288	205	298	225	261	253	10	4
Cd	0,01	12	0	110	51	16	0	3	1	3	0
CN	0,05	0	0	53	53	0	0	0	0	0	0
Cu	2	150	1	156	1	48	2	36	0	3	0
Cr	0,05	9	7	123	67	6	0	2	0	5	0
F	1,5	45	7	178	7	47	9	33	15	4	0
Mn	0,1	56	7	215	102	30	5	19	6	3	0
Hg	0,001	9	1	141	53	0	0	0	0	2	0
Pb	0,05	12	0	150	5	16	0	3	0	3	0
Se	0,01	9	9	126	41	0	0	0	0	2	0
Zn	3	12	0	174	6	21	1	6	2	3	0
pH	]6,5-8,5[	321	101	293	53	337	57	309	161	11	10

Tabla 5.5: Calidad de las aguas en puntos de muestreo según norma chilena para aguas de riego (NCh1333).

Parámetro	NCh1333 Límite	Ríos		Pozos		Manantiales		Lagunas		Lluvia/Nieve	
		Total	Sobrepasan	Total	Sobrepasan	Total	Sobrepasan	Total	Sobrepasan	Total	Sobrepasan
STD	1500	125	42	257	111	246	139	206	188	12	0
T(Wa)	30	210	3	189	8	283	9	279	0	0	0
Cl	200	319	66	300	148	321	168	297	219	13	0
SO ₄	250	322	67	300	131	325	135	292	254	12	0
Al	5	12	0	110	43	21	4	6	3	3	0
As	0,1	306	120	288	119	298	145	261	186	10	0
Ba	4	12	0	105	0	16	0	3	0	3	0
B	0,75	313	269	270	191	298	251	285	271	3	0
Cd	0,01	12	0	110	51	16	0	3	1	3	0
CN	0,2	0	0	53	51	0	0	0	0	0	0
Co	0,05	13	0	62	2	31	1	3	0	3	0
Cu	0,2	150	7	156	38	48	3	36	4	3	0
Cr	0,1	9	7	123	43	6	0	2	0	5	0
F	1	45	11	178	14	47	15	33	16	4	0
Fe	5	196	2	223	22	80	3	55	1	3	0
Li	2,5	103	27	259	80	210	77	217	173	3	0
Mn	0,2	56	6	215	84	30	5	19	6	3	0
Hg	0,001	9	1	141	53	0	0	0	0	2	0
Mo	0,01	31	17	175	92	36	18	16	7	3	0
Ni	0,2	12	1	100	3	17	0	6	0	5	1
Pb	5	12	0	150	0	16	0	3	0	3	0
Se	0,02	9	9	126	37	0	0	0	0	2	0
Zn	2	12	0	174	10	21	1	6	2	3	0
pH	16,5-8,3[	321	76	293	64	337	76	309	161	11	10

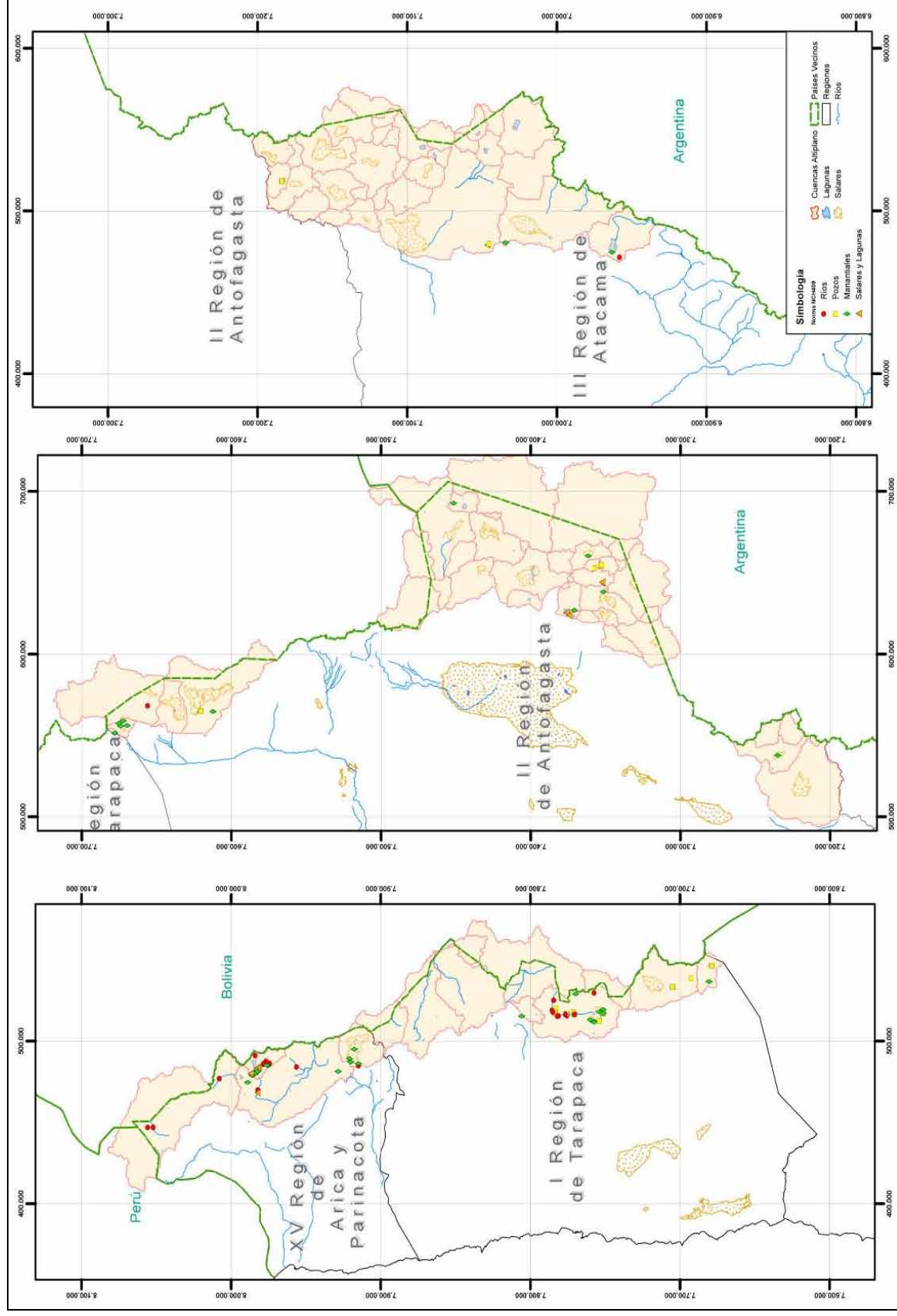


Figura 5.14: Ubicación de las muestras que cumplen la NCh409.

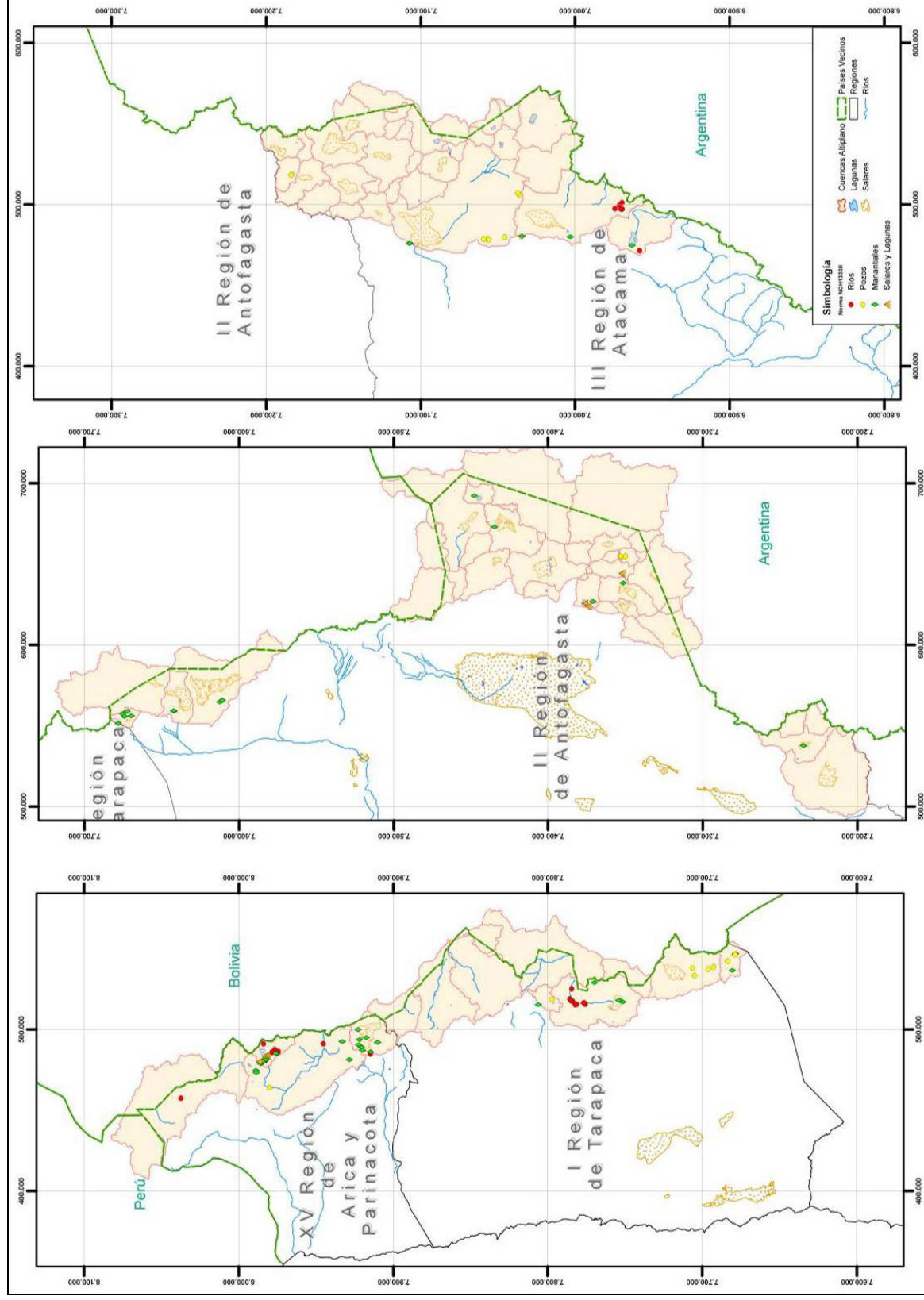


Figura 5.15: Ubicación de las muestras que cumplen NCh1333.

6 HIDROGEOQUÍMICA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS

6.1 Parámetros Físico-químicos

La distribución de los parámetros pH, temperatura y conductividad eléctrica de las aguas subterráneas se grafica en la Figura 6.1 y se discute a continuación.

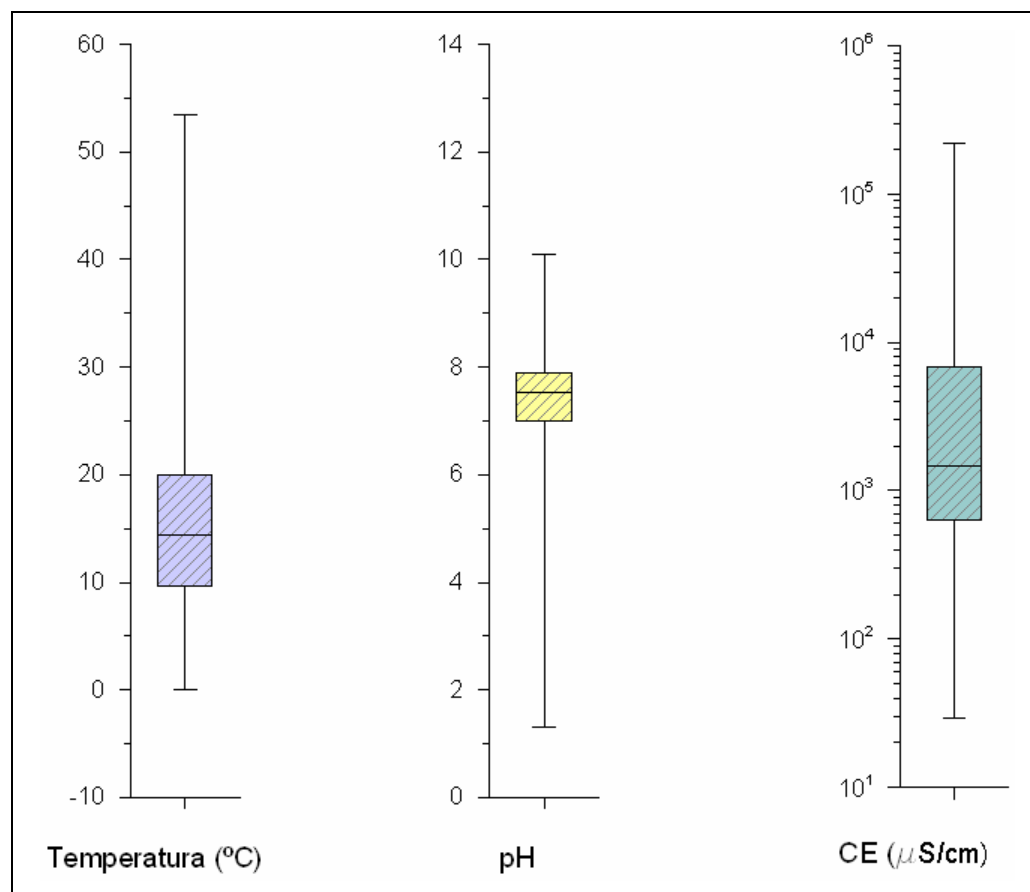


Figura 6.1: Distribución de los parámetros físico-químicos en aguas subterráneas.

Temperatura

El rango de temperaturas de aguas subterráneas va de 0 a 53 °C. Los valores más altos vienen de los muestras de aguas de manantiales y vertientes, mientras que las aguas de pozos y napas tienen un rango menor que va desde 3,8 a 43,4 °C.

Sin embargo la mayoría de estas aguas presentan temperaturas entre los 10 y 20 °C, que se explica por la influencia de la temperatura ambiental en los puntos de medición. El promedio

anual de la temperatura en el área muestreada depende de la latitud y la altura topográfica, y se pueden encontrar valores para cada región en la sección dedicada exclusivamente a la hidrología (Parte III).

Cuando las muestras han sido tomadas a grandes profundidades, la temperatura del agua está influida por el gradiente geotermal. El promedio mundial de este gradiente evoca un aumento de temperatura de aproximadamente 3,3 °C cada 100 m de profundidad (Matthess, 1994). Sin embargo existen manantiales que pueden considerarse como termales, ya que sus temperaturas más altas indican la influencia de centros hidrotermales marcados por un gradiente geotermal más alto (Magaritz et al., 1990; Tassi et al., 2008). La II Región es la que presenta los valores de temperatura promedio más elevados.

Los valores de temperatura muy bajos corresponden a aguas muestreadas cerca de la superficie en equilibrio térmico con el ambiente. Las muestras de pozos y napas con valores de temperaturas <10 °C (22 muestras), lamentablemente no tienen informaciones de la profundidad del muestreo, pero debieran corresponder a aguas relativamente someras.

Rango de pH

El rango de pH de las aguas subterráneas puede variar entre 1 y 10, sin embargo la mayoría de las aguas analizadas presentan valores neutros a ligeramente alcalinos que, según Risacher (2003) indican la capacidad de buffer de las rocas volcánicas y carbonatadas. Este mismo autor también presenta una explicación para los valores muy ácidos que se pueden encontrar en el Salar Gorbea (pH <5). Según plantea, en esta zona existe una alteración hidrotermal de las rocas volcánicas muy fuerte, que reduce la capacidad de neutralización de las mismas, generando valores de pH ácido.

Conductividad eléctrica

La Figura 6.1 muestra la distribución positivamente asimétrica de la CE de las aguas subterráneas. Este rango varía ampliamente de 30 a más de 200.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ubicándose principalmente en el campo de las aguas salobres a saladas.

6.2 Elementos Mayoritarios y Composiciones Químicas

En la Tabla 6.1 y Figura 6.2 se muestra la distribución de concentraciones de los elementos mayoritarios en aguas subterráneas. Los valores máximos y de cuartiles son generalmente menores que los de las aguas superficiales, lo que indica, como ya se ha mencionado, una

menor salinización. Solamente los valores de NO_3^- constituyen una excepción. El valor más alto es el del ión Cl^- de la muestra AGI.T003, que tiene la descripción “napa superficial”, por lo que muy probablemente es una muestra con una gran influencia de evaporación, a pesar de estar clasificada dentro de las aguas subterráneas.

Tabla 6.1: Distribución de los elementos mayoritarios en aguas subterráneas.

Elemento	Cantidad	Máximo	Mínimo	Percentil 25	Mediana	Percentil 75
Cl^-	456	209.000	0,249	24,80	332,50	1.685,00
SO_4^{2-}	456	20.400	<3,000	68,53	215,00	453,50
HCO_3^-	452	1.980	1,590	47,44	103,85	206,75
NO_3^-	366	1.721	<0,012	0,40	1,14	4,98
Na^+	456	115.000	<0,001	35,78	220,50	916,50
K^+	456	14.100	0,005	6,48	31,00	84,90
Mg^{2+}	456	6.270	<0,020	7,39	28,95	89,75
Ca^{2+}	456	49.700	0,168	33,50	88,75	253,25

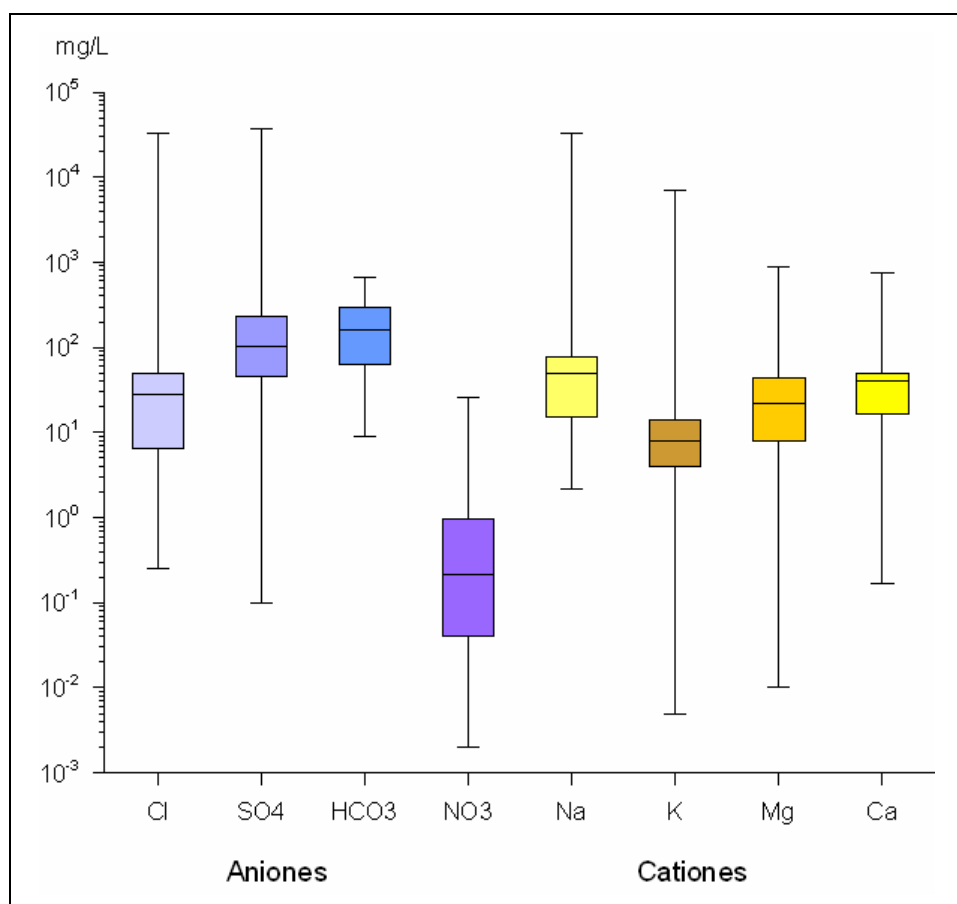


Figura 6.2: Distribución de los elementos mayoritarios de aguas subterráneas.

Las composiciones químicas de las aguas subterráneas, diferenciándolas según la región a la que pertenecen, han sido representadas en la Figura 6.3. Efectivamente las aguas de la Primera Región que en promedio son más dulces, corresponden mayoritariamente a aguas bicarbonatadas cálcicas o cálcico-sódicas, mientras que las aguas de las Regiones II y III, más salinas, presentan composiciones mayoritariamente cloruradas sódicas, con algunas también del tipo sulfatadas. A continuación se analizan estas composiciones agrupando las muestras según si corresponden a pozos o manantiales y separando aquellas que presentan concentraciones de STD menores o mayores a 200 mg/L.

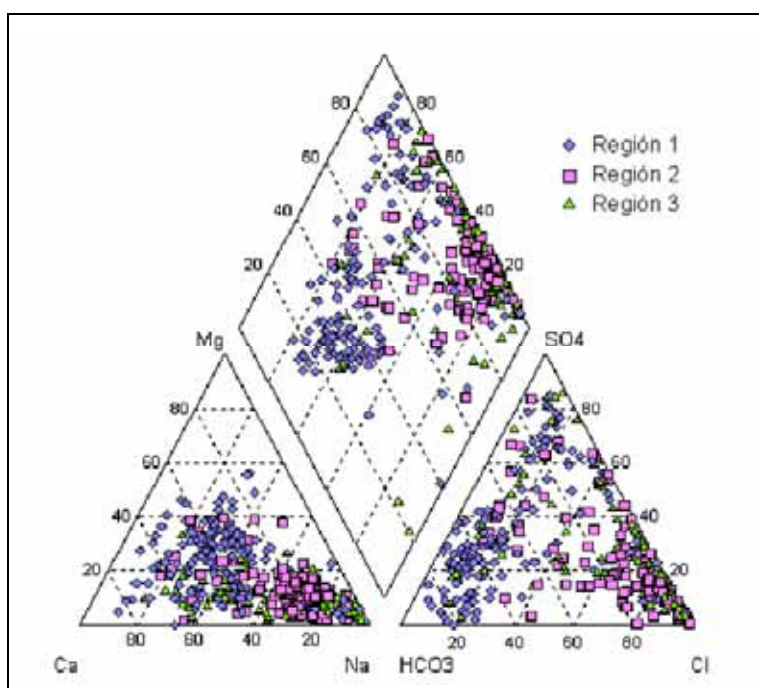


Figura 6.3: Composición química de las aguas subterráneas.

Pozos y napas

La Figura 6.4 muestra la gran variabilidad de composiciones químicas que podemos encontrar en las aguas de pozos y napas. Hay agrupaciones de aguas tipo sulfatadas cálcicas y bicarbonatadas intermedias. En comparación con las muestras con mineralizaciones más altas, las muestras diluidas tienen pocas composiciones cloruradas sódicas. Además contrastándolas con las otras clases de aguas, hay muestras que tienen composiciones relativamente ricas en calcio y magnesio.

Casi todas las muestras de mayor salinidad tienen una composición clorurada sódica, especialmente al aumentar su CE.

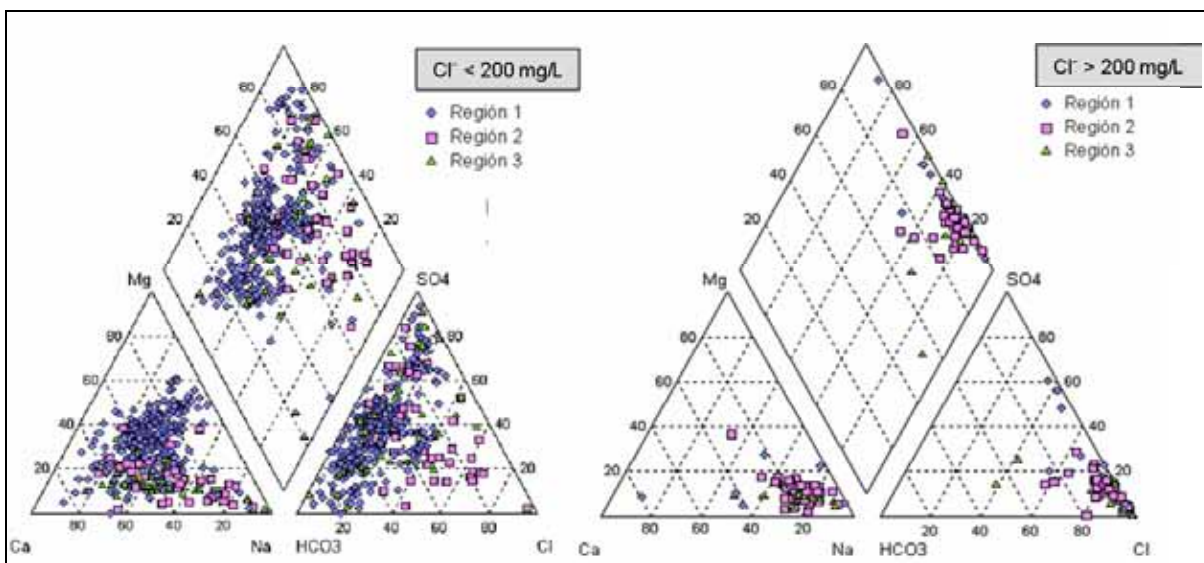


Figura 6.4: Composición química de aguas de pozos y napas.

Manantiales y vertientes

La distribución de las muestras más dulces en el diagrama de Piper es más parecida a la distribución de las aguas superficiales que a la distribución de aguas de pozos y napas, especialmente con respecto a los cationes (Figura 6.5).

Se pueden diferenciar dos agrupaciones de aguas más salinas con composiciones diferentes. Una corresponde a aguas cloruradas- sulfatadas sódicas- cálcicas, y otra, que comprende aguas de composiciones bicarbonatadas sódicas a cloruradas sódicas y de sulfatadas cálcicas a sulfatadas sódicas. Esta distribución de composiciones es muy similar a las de las muestras de pozos, pero en este caso hay más muestras de tipo clorurado sódico.

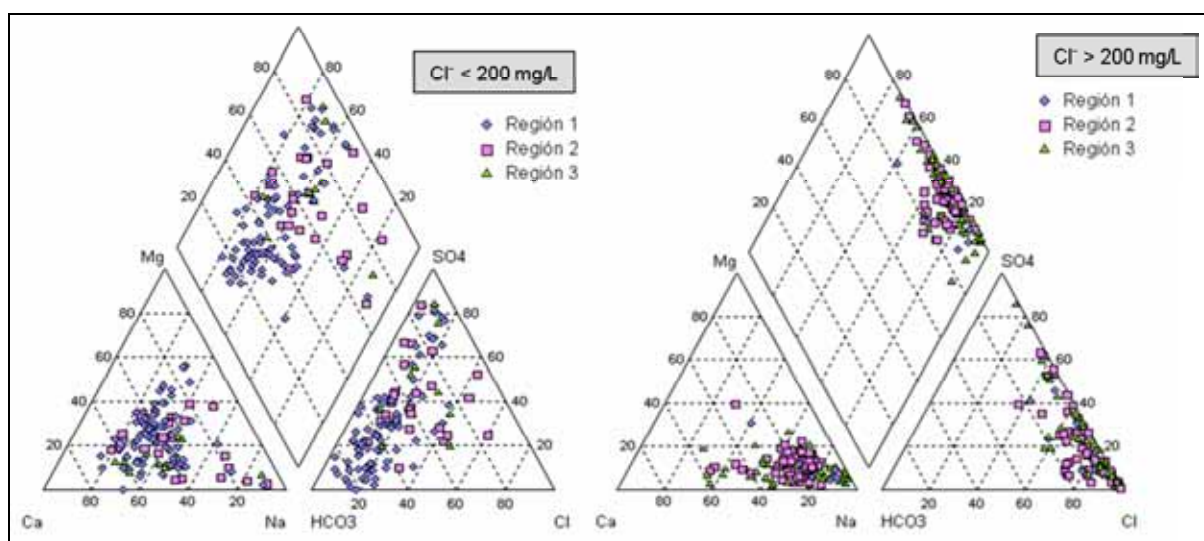


Figura 6.5: Composición química de aguas de manantiales y vertientes.

6.3 Elementos Minoritarios

La Figura 6.6 muestra la distribución de concentraciones de los principales elementos minoritarios en las aguas subterráneas.

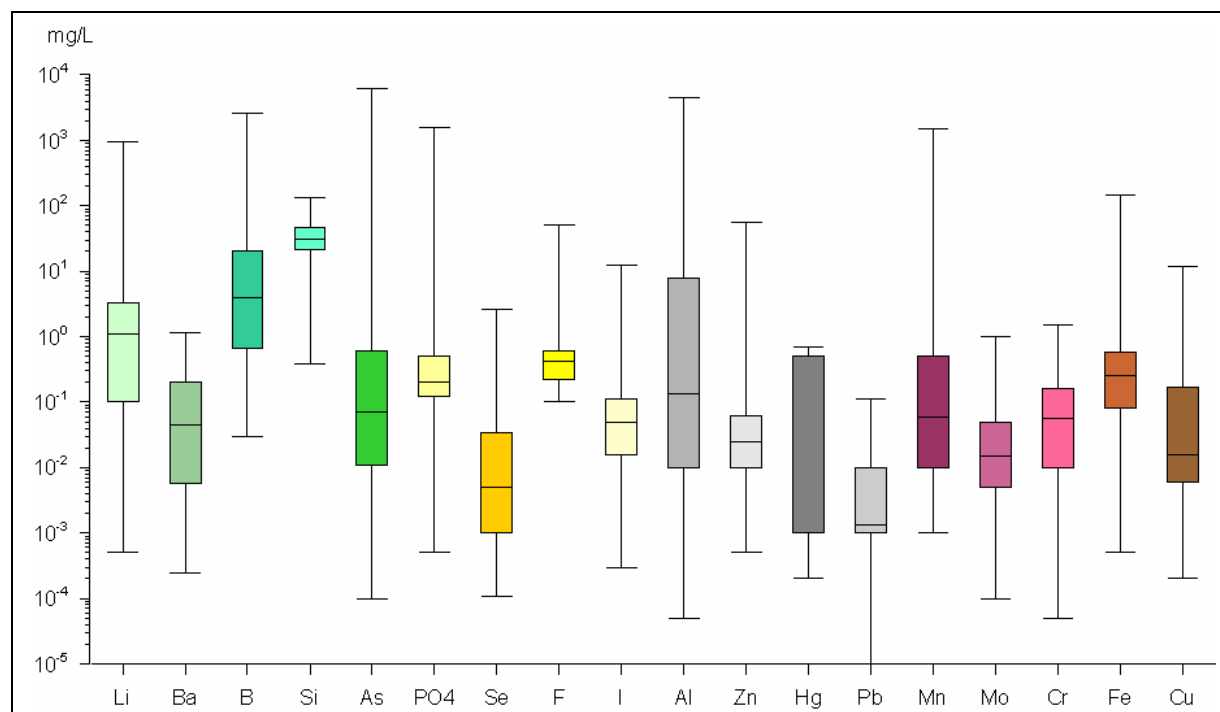


Figura 6.6: Distribución de los elementos minoritarios en aguas subterráneas.

Los compuestos que alcanzan las mayores concentraciones son el As, Al, B, Li, PO₄³⁻ y Mn, pero las mayores concentraciones promedio corresponden al Si, B y Li, al igual que en el análisis general de las aguas.

Si se comparan estas concentraciones con las distintas normativas chilenas de calidad de las aguas, se puede ver que determinados elementos presentan concentraciones extremadamente altas. Por ejemplo, la mediana del As excede ocho veces el límite máximo establecido por la norma chilena de agua potable (NCh409/1. Of2005), y la mediana del B en 10 veces la concentración máxima permitida por la norma chilena de calidad de aguas para riego (NCh1333. Of78).

Si se consideran el catastro de aguas termales realizado por Hauser en 1997 para SERNAGEOMIN, las concentraciones químicas encontradas llegan a valores máximos de 200 mg/L de As y 128 mg/L de B. Por lo tanto aguas con valores elevados de As y B podrían asociarse a campos geotermales.

6.4 Variabilidad Temporal y en Profundidad

Variabilidad temporal

Para verificar la variación temporal de las composiciones químicas de las aguas subterráneas se estudiaron aquellas muestras con análisis realizados en distintas fechas, y que corresponden a los puntos de la cuenca del Salar de Huasco HUA.T003.1-10, HUA.T011.1-9 y HUA.F016.1.-7, y otro punto de la cuenca del Lago Chungará CHU.F002.1-23. Los dos primeros puntos de muestreo corresponden a los dos únicos pozos que disponen de información temporal de su quimismo. Las otras dos muestras, pertenecen a aguas de vertientes y manantiales.

La Figura 6.7 presenta para cada muestra sus variaciones de composición química en el tiempo. Se puede apreciar que existen cambios mínimos en la composición química de las aguas, con la excepción del cloruro que muestra una cierta variación en varios puntos de muestreo de las cuencas de la Primera Región.

Para las muestras de las vertientes (Figura 6.8) se puede apreciar que existe una cierta variación en las composiciones químicas que en algunos casos puede llegar a ser bastante importante. La vertiente del Salar de Huasco muestra los cambios temporales más importantes afectando al ión cloruro, similar a las variaciones encontradas en las muestras de pozos. Al contrario, en la vertiente de la cuenca del Lago Chungará, la concentración de Cl^- permanece relativamente estable, mientras que las concentraciones de SO_4^{2-} presentan fuertes variaciones.

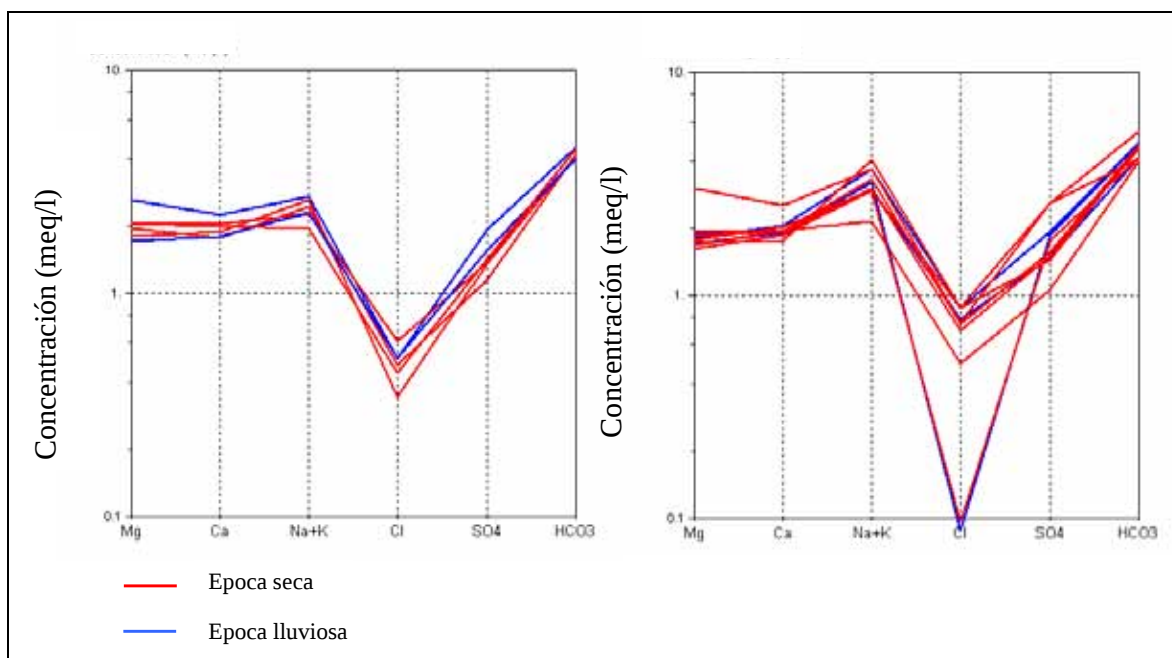


Figura 6.7: Variación temporal de la composición química de los elementos mayoritarios de los puntos de muestreo HUA.T003 (izquierda) y HUA.T011 (derecha).

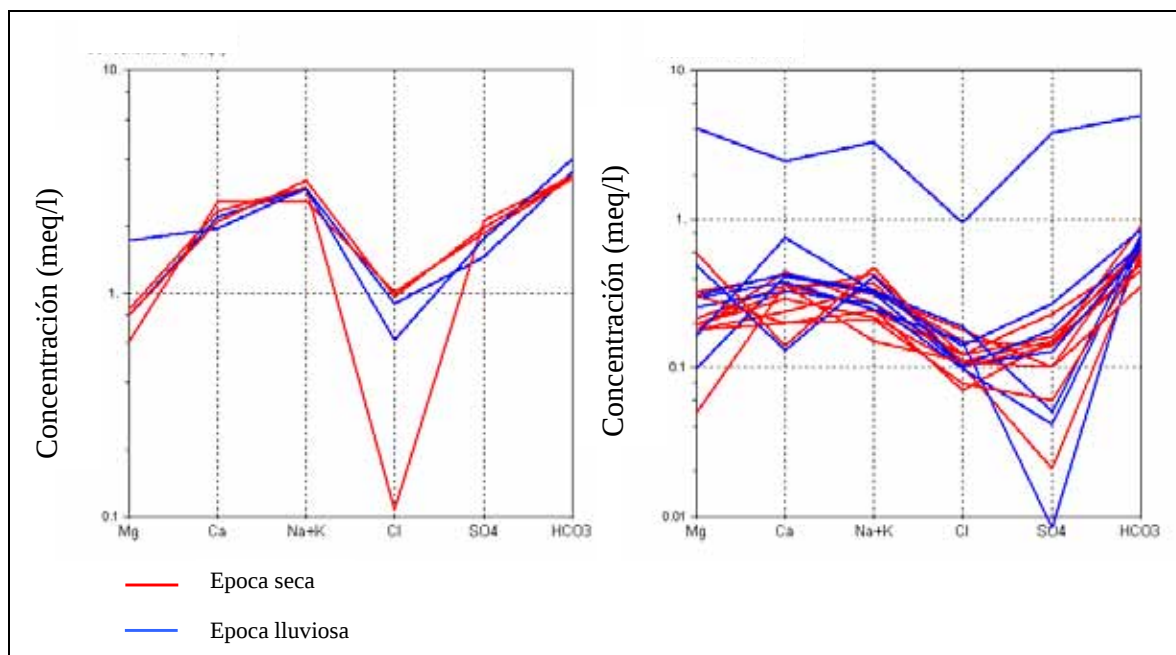


Figura 6.8: Variación temporal de la composición química de los elementos mayoritarios de los puntos de muestreo HUA.F016 (izquierda) y CHU.F002 (derecha).

Variabilidad en profundidad

En el caso de las aguas subterráneas pueden estudiarse también las variaciones que presentan en su composición a distinta profundidad. Para este tipo de análisis se dispone de seis puntos de muestreo ubicados en las cuencas de la Región de Antofagasta: Salar de Incahuasi (INC.T001), Salar del Laco (LAC.T004), Pampa Las Tepas (TEC.T003), Salar de Aguas Calientes 3 (AC3.T001), Pampa Colorada (COL.T001) y Laguna Tuyajto (TUY.T001).

En estos puntos las concentraciones aumentan gradualmente en profundidad (Figura 6.9 y Figura 6.10), sobretodo el Na^+ y Cl^- , mientras que la composición química relativa se conserva. En los gráficos, para cada pozo se han representado en líneas rojas las muestras más profundas, en naranja las muestras de profundidades intermedias y en verde las más someras. Los contenidos totales aumentan con la profundidad en todos los puntos, salvo en el pozo que corresponde a la muestra LAC.T004, que presenta disminuciones de HCO_3^- , SO_4^{2-} y Ca^{2+} en profundidad y el pozo TEC.T003, en que solamente disminuye la concentración de HCO_3^- .

Aunque no existe información de otras cuencas y regiones, se puede considerar que éste sería el comportamiento natural de las aguas en profundidad, dado que las aguas más profundas suelen representar aguas más antiguas, con mayor tiempo de residencia, que pueden incorporar una mayor cantidad de sales por su interacción con el acuífero.

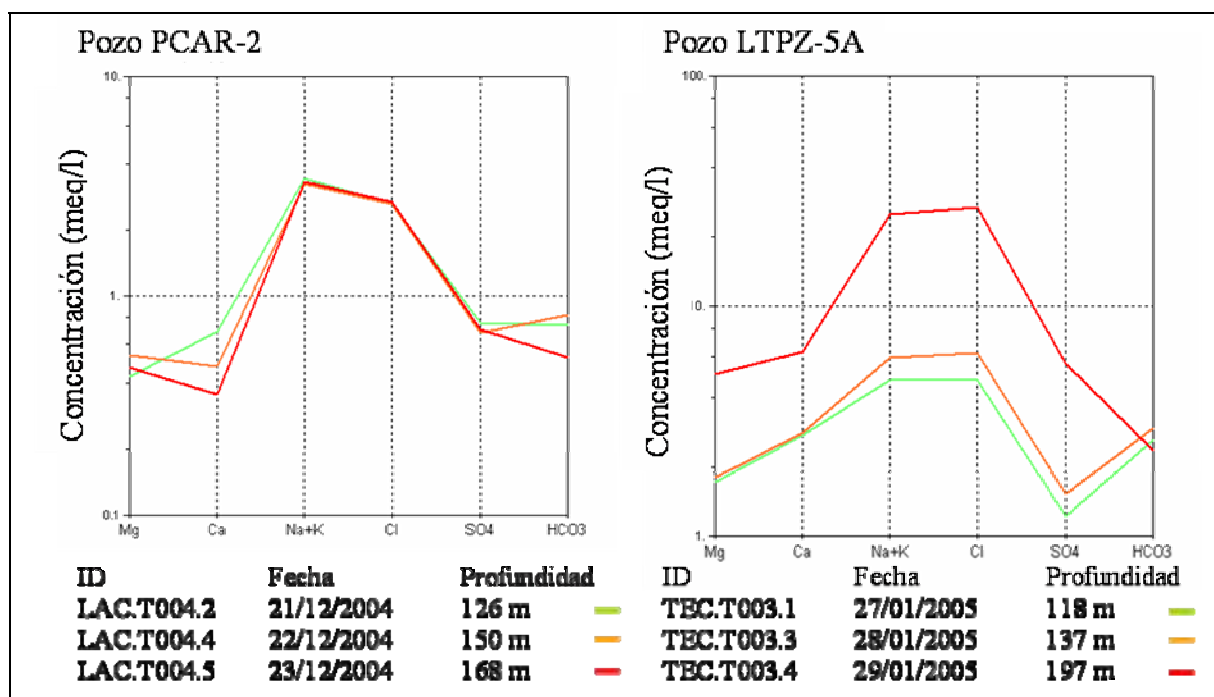


Figura 6.9: Variación de la composición química con la profundidad en los puntos de muestreo LAC.T004 (izquierda) y TEC.T003 (derecha).

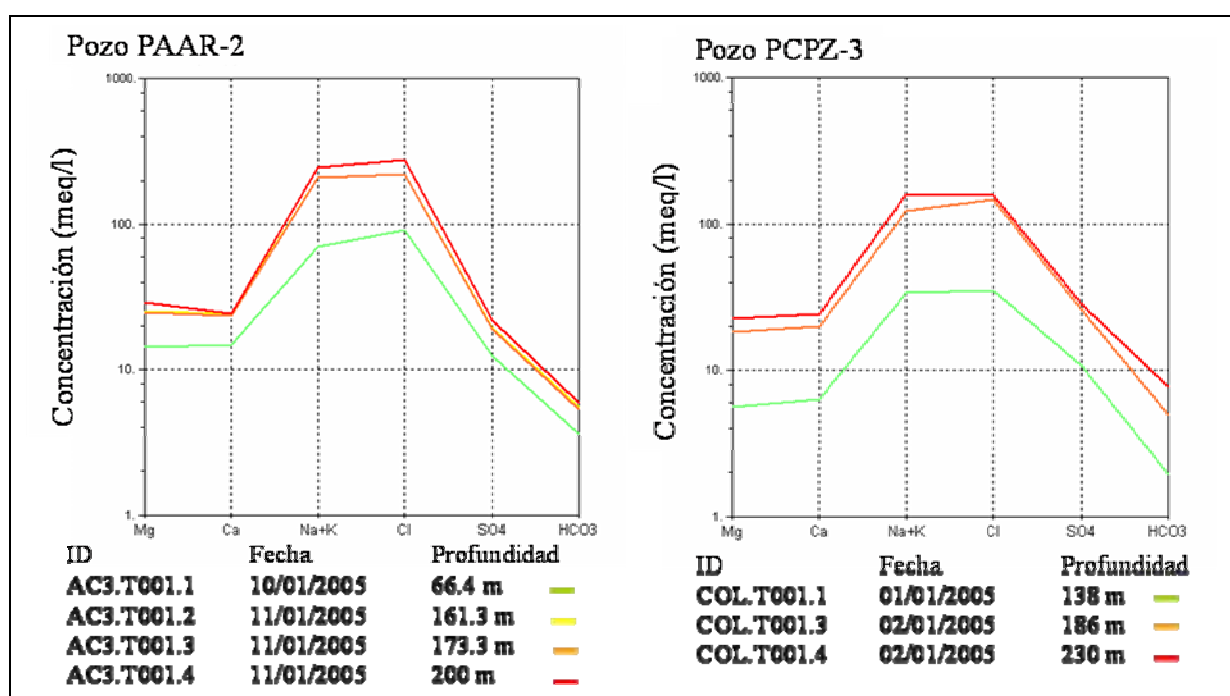


Figura 6.10: Variación de la composición química con la profundidad en las puntos de muestreo AC3.T001 (izquierda) y COL.T001 (derecha).

7 HIDROGEOQUÍMICA DE LAS AGUAS SUPERFICIALES

7.1 Parámetros Físico-químicos

El análisis de los parámetros físico-químicos de las aguas superficiales describe el comportamiento de la temperatura, el pH y la CE (Figura 7.1).

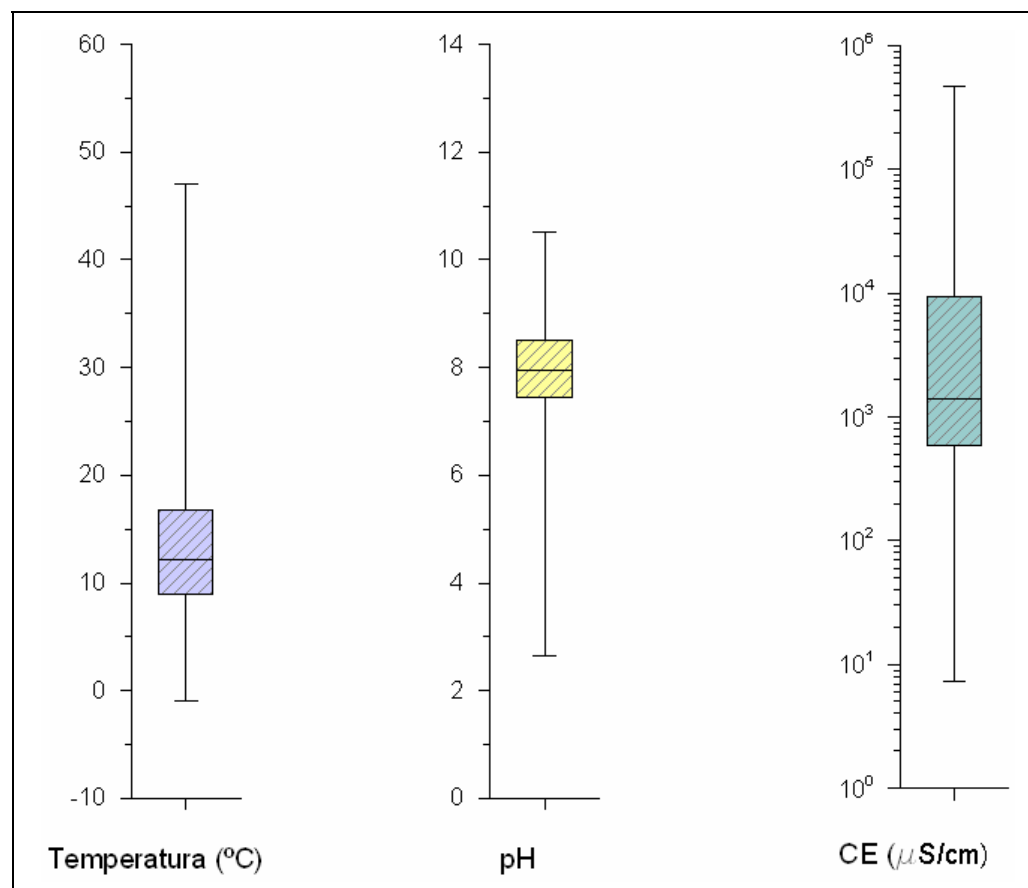


Figura 7.1: Distribución de los parámetros físico-químicos de aguas superficiales.

Temperatura

La temperatura de las aguas superficiales está influida sobre todo por la temperatura del ambiente. En las regiones altiplánicas la precipitación se produce preferentemente como nieve, en las zonas altas de las cuencas. Por eso las aguas tienen por naturaleza temperaturas bajas, ya que provienen de la fusión de la nieve. El rango promedio bordea los 13 °C. Debido a la radiación del sol y el traspaso de calor desde el aire, la temperatura de las aguas aumenta. Los dos procesos dependen de la estación del año y la hora del día. Los valores levemente

superiores provienen sobre todo de lagunas durante el período estival, en que pueden alcanzar temperaturas similares a la del aire (Risacher et al., 1999). Como casos particulares, en la proximidad de afloramientos termales suelen encontrarse cuerpos o flujos de agua superficial con temperaturas elevadas, marcadas en este caso por las anomalías en el gradiente geotermal.

Rango de pH

La distribución de los valores de pH de las aguas superficiales, como los de aguas subterráneas, va principalmente de neutro a alcalino (Figura 7.1). Las aguas superficiales son generalmente más alcalinas que las aguas subterráneas. La misma teoría de la capacidad buffer de las rocas volcánicas y carbonatadas contra la acidificación del capítulo 5.1 sirve para explicar estos valores.

Conductividad eléctrica

La distribución de los valores de CE de las aguas superficiales es positivamente asimétrica. Como se puede ver en la Figura 7.1 la mediana de las aguas superficiales es parecida a la de las aguas subterráneas, pero el percentil 75 es superior, ya que las aguas superficiales sufren más evaporación.

7.2 Elementos Mayoritarios y Composiciones Químicas

La Tabla 7.1 y la Figura 7.2 muestran los contenidos extremos y la distribución de elementos mayoritarios de las 461 muestras de aguas superficiales consideradas en este apartado.

Los elementos más abundantes son el Na^+ y el Cl^- , que se distribuyen de manera similar a como lo hacen en las aguas subterráneas. Los menos abundantes son nitrato y bicarbonato. La composición química de las aguas superficiales se muestra en la Figura 7.3 mediante un diagrama de Piper, donde se observan las mismas diferencias composicionales por regiones que existían para las aguas subterráneas, pero con una mayor concentración de puntos en la zona de las aguas cloruradas sódicas.

También se encuentran aguas de composición bicarbonatada intermedia y aguas sulfatadas, y entre ellas se puede observar que las tres regiones estudiadas presentan composiciones promedio distintas. Las razones de esta diferencia son las mismas que se presentaron para las aguas subterráneas: la mayor dilución de las aguas de la Primera Región produce aguas superficiales (y subterráneas) en mayoritariamente bicarbonatadas cálcicas, mientras que en

las Regiones II y III, donde las precipitaciones son menos abundantes, se encuentran mayoritariamente aguas de composiciones sulfatadas a cloruradas sódicas.

Tabla 7.1: Distribución de los elementos mayoritarios de aguas superficiales.

Elemento	Cantidad	Mínimo	Máximo	Percentil 25	Mediana	Percentil 75
Cl ⁻	461	0,820	204.000	33,90	433,0	8.240,0
SO ₄ ²⁻	461	2,400	37.800	130,00	320,0	1.750,0
HCO ₃ ⁻	455	0,020	1.665	85,10	164,0	293,0
NO ₃ ⁻	289	<0,002	1.990	0,08	0,5	3,6
Na ⁺	461	3,700	117.000	59,30	298,0	4.460,0
K ⁺	461	<0,010	64.030	10,60	43,4	500,0
Mg ²⁺	461	1,200	16.000	24,50	64,8	340,0
Ca ²⁺	461	3,600	43.300	39,90	84,2	584,0

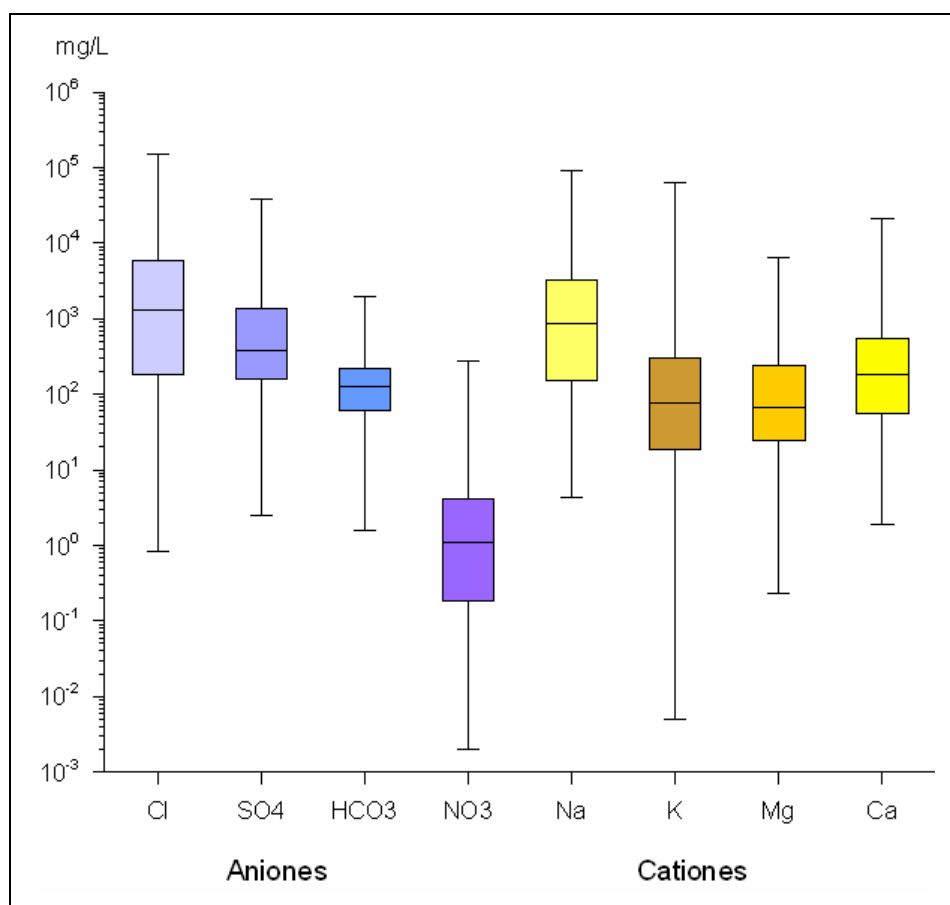


Figura 7.2: Distribución de los elementos mayoritarios de aguas superficiales.

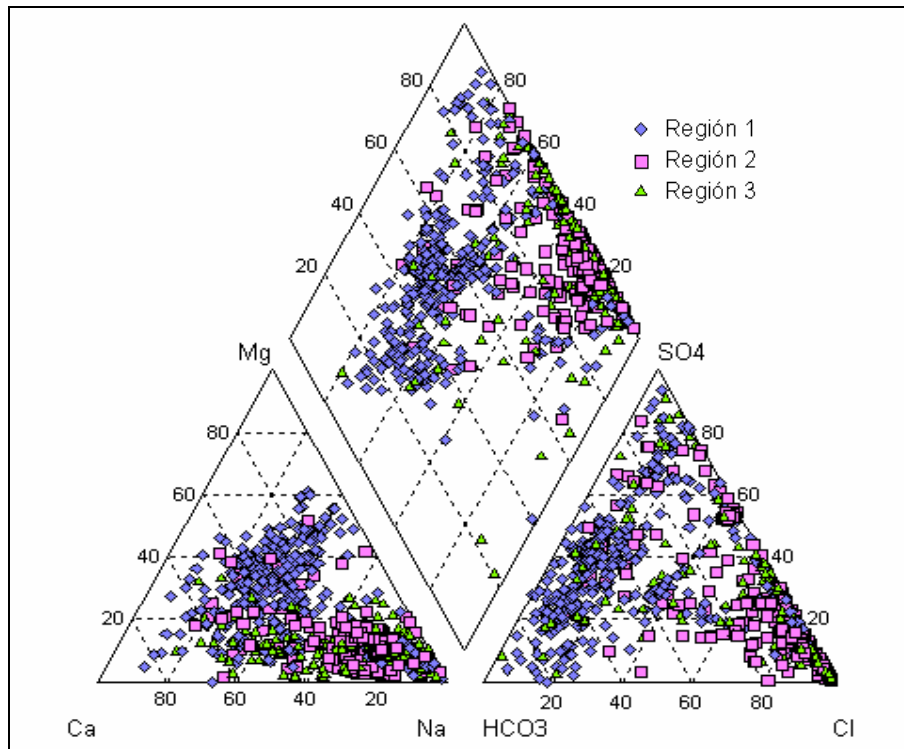


Figura 7.3: Composición química de las aguas superficiales.

A continuación se presentan estas mismas composiciones, pero separando las muestras por tipos de aguas. Por un lado las lagunas, expuestas a la evaporación, y por otro los flujos de agua superficial como ríos y vertientes, que tienen un menor tiempo de exposición a la atmósfera, junto con las precipitaciones.

Lagunas

De la Figura 7.4 se observa que deduce que hay muy pocas muestras de composición bicarbonatada, y siguen existiendo algunas diferencias entre las Regiones I y XV, respecto a las Regiones II y III. Las lagunas varían su salinidad en las distintas regiones, principalmente por la influencia de la evaporación y el aporte de precipitaciones, que marcan la composición de las aguas por encima de los procesos geoquímicos que ocurran en el medio rocoso o granular por el que fluyen. En las Regiones I y XV es interesante ver como una menor salinidad aumenta la concentración relativa de un elemento poco abundante como el Mg^{2+} .

Las aguas menos salinas se correlacionan con los análisis que corresponden a ríos (ver más adelante). Son de tipo bicarbonatada- sulfatada magnésico- sódica; y sulfatada cálcica. Las aguas más salinas son generalmente de tipo clorurado sódico, y unas pocas sulfatado cálcico.

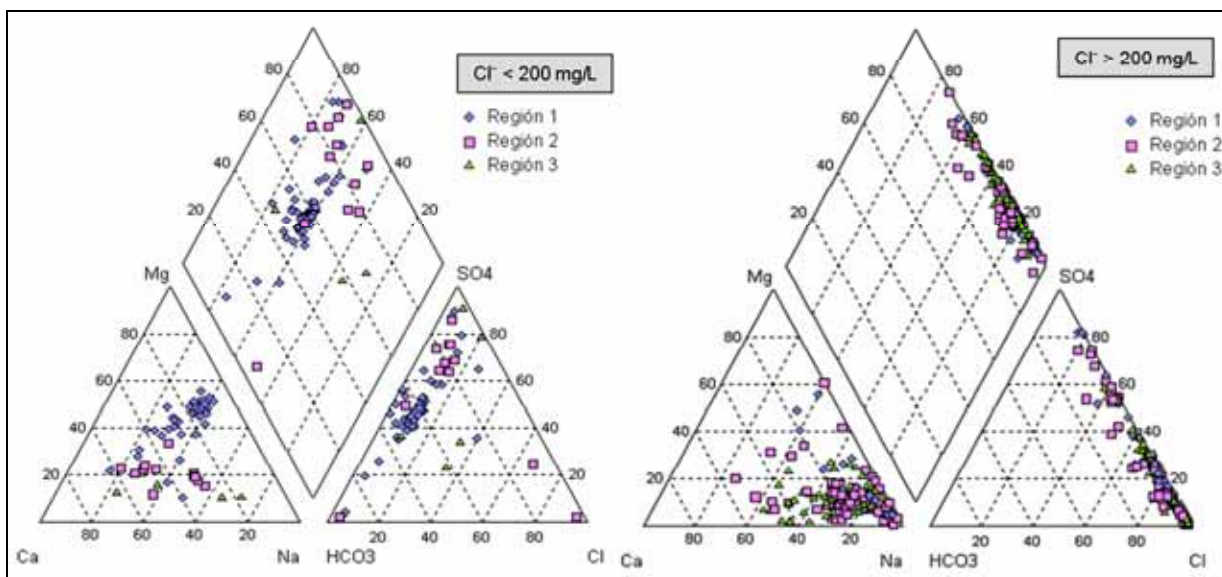


Figura 7.4: Composición química de lagunas.

Cursos de agua superficial

La Figura 7.5 muestra la composición química de ríos y esteros, donde destaca la gran cantidad de datos procedentes de las I y XV Regiones. Corresponden a aguas mayoritariamente bicarbonatadas magnésico- cálcicas o magnésico- sódicas. Las aguas más dulces suelen tener una composición bicarbonatada- sulfatada predominantemente, y en algunos casos sulfatada cálcica, mientras que las más salinas son de tipo clorurado sódico.

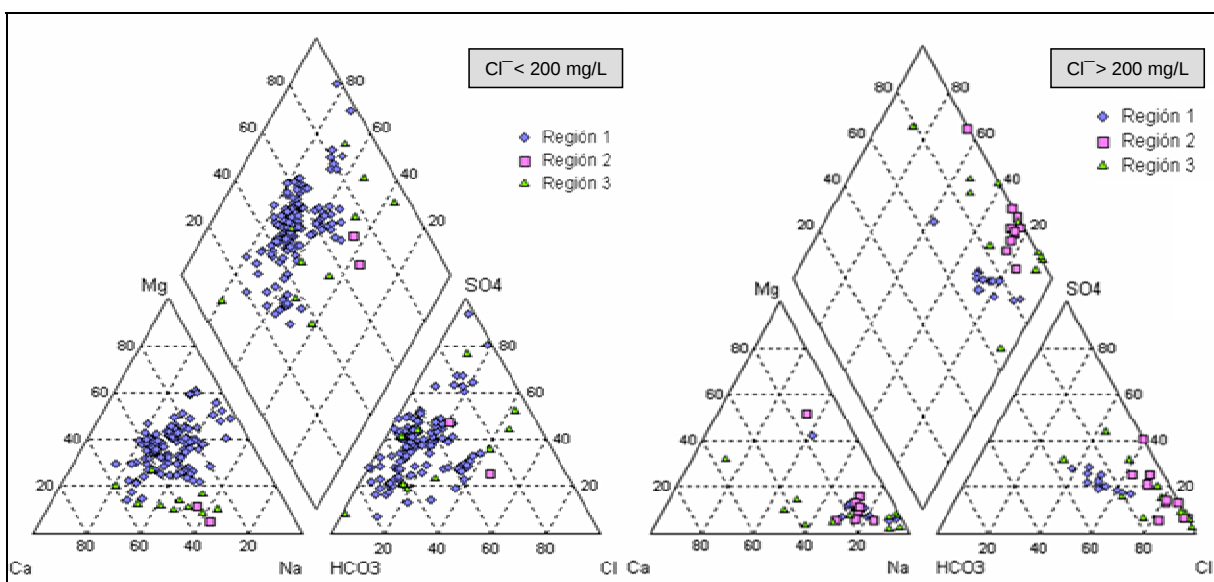


Figura 7.5: Composición química de ríos y vertientes.

Precipitaciones

De las muestras de nieves y lluvias solamente siete tienen mediciones de elementos mayoritarios y sólo una de ellas cumple con el error de balance (HUA.F007.2). Su composición es sulfatada sódico- cálcica.

7.3 Elementos Minoritarios

Es importante destacar que el número de muestras disponibles para este análisis es mucho menor que el de las aguas subterráneas. Al igual que en éstas destacan por su abundancia el B, Li y Si (Figura 7.6).

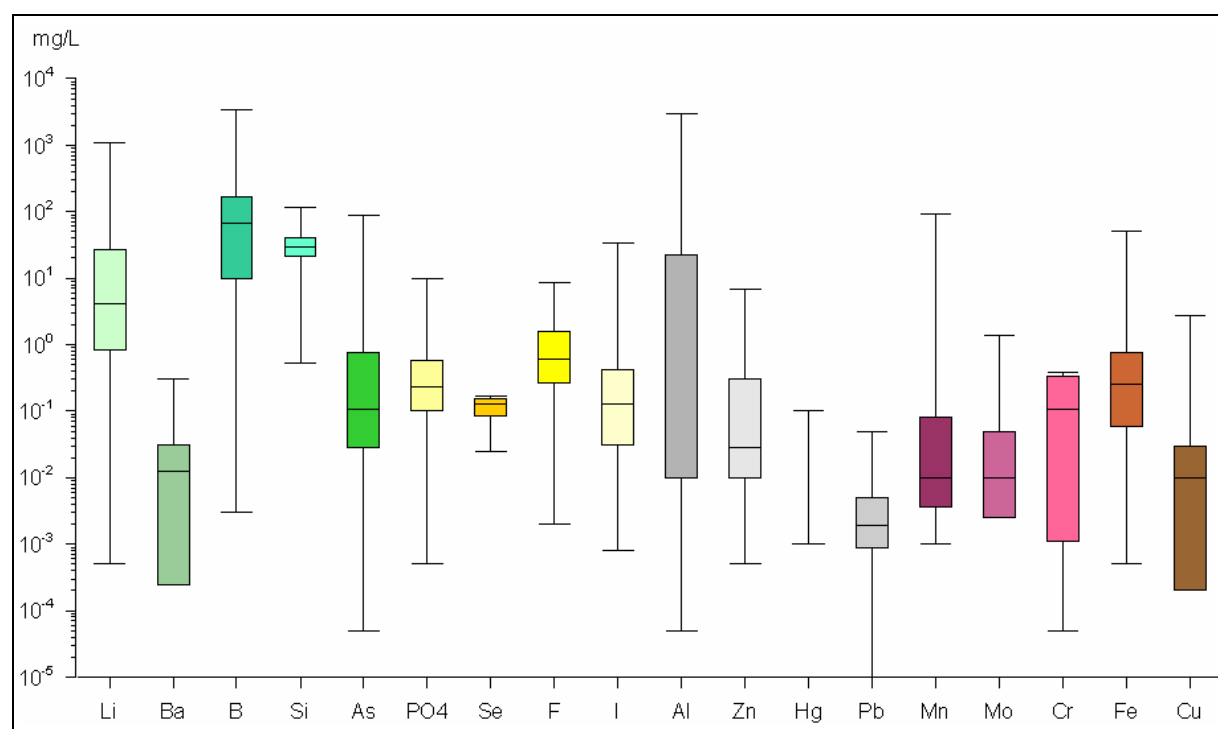


Figura 7.6: Distribución de los elementos minoritarios en aguas superficiales.

Una buena comparación entre las concentraciones encontradas en las aguas superficiales y las subterráneas sólo se puede hacer con el As, B, Cu, PO_4^{3-} , Fe, I, Li y Si, porque presentan un número similar de análisis en ambos tipos de aguas. Los valores de estos elementos en aguas superficiales son generalmente más altos en los rangos de mayor concentración. Una excepción es el cobre, que presenta concentraciones significativamente mayores en las aguas subterráneas. El Fe presenta contenidos muy similares en ambos tipos de aguas. Las aguas superficiales exceden más frecuentemente las normativas chilenas de calidad de aguas que las subterráneas.

7.4 Variabilidad Temporal

Se dispone de 17 puntos de muestreo en siete cuencas distintas, que presentan más de dos análisis realizados en distintas fechas de estudio y que permiten estudiar la variabilidad temporal del quimismo de las aguas.

En general se observan pocos cambios de composición química en estas muestras. Los casos más interesantes se ubican en las cuencas de Uchusuma- Caquena (UCH.F006), Salar de Huasco (HUA.F017), Cancosa (CAN.F001) y Río Lauca (LAU.F024) de las regiones I y XV. En las Figura 7.7 y Figura 7.8 se aprecia la variación en la concentración de Cl^- y Ca^{2+} .

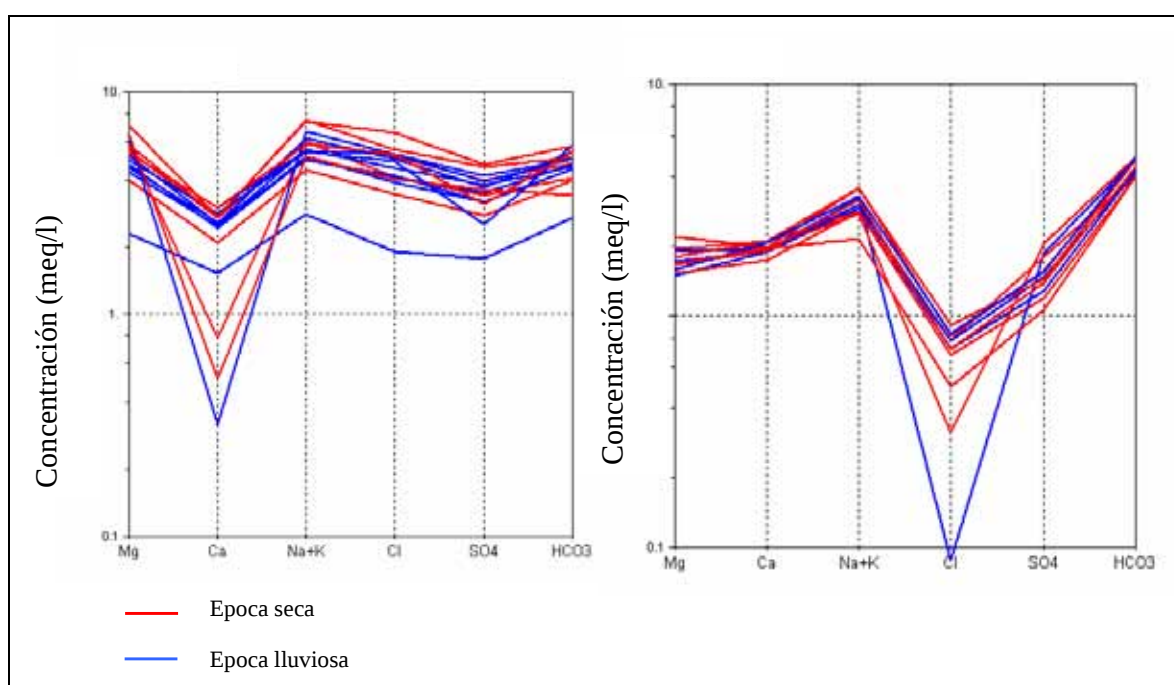


Figura 7.7: Variación temporal de la composición química en UCH.F006 (izquierda) y HUA.F017 (derecha).

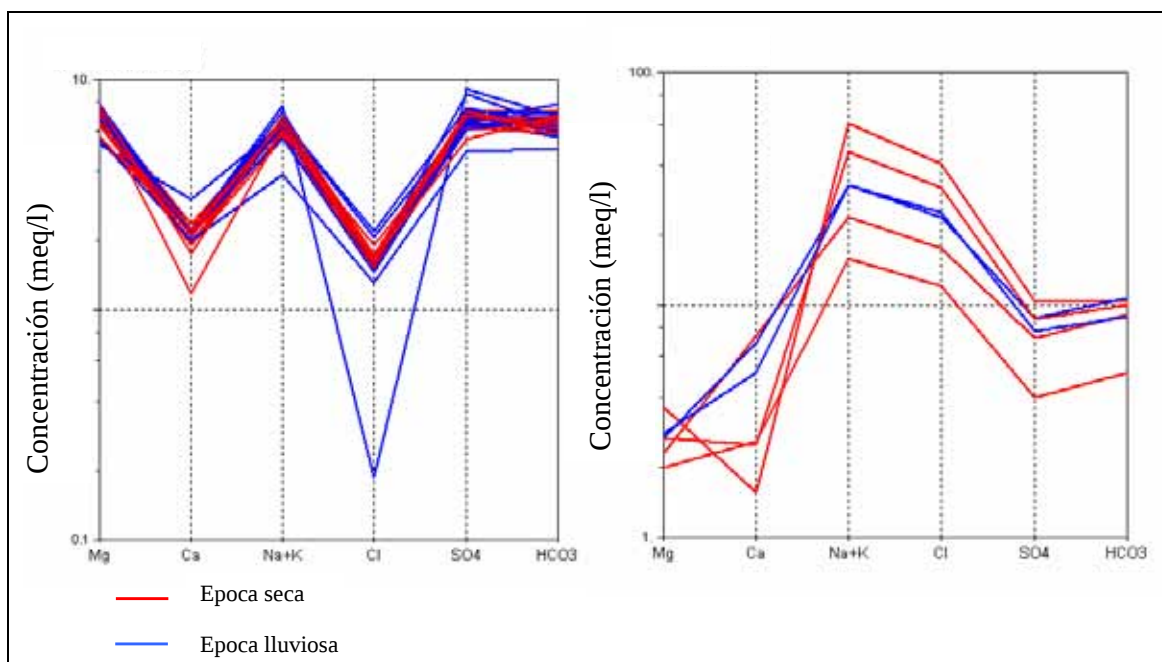


Figura 7.8: Variación temporal de la composición química en CAN.F001 (izquierda) y LAU.F024.1-38 (derecha).

8 CARACTERIZACIÓN ISOTÓPICA

En este apartado se presenta el comportamiento de los valores isotópicos de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ en tres partes. En la primera se muestran las composiciones isotópicas de las precipitaciones, como composiciones iniciales del ciclo del agua correspondientes a las aguas que entran en una cuenca. Luego se analizan por separado las composiciones de las aguas superficiales y subterráneas.

El objetivo es dar una interpretación a las diferencias en las composiciones isotópicas que se pueden observar en los distintos tipos de agua a partir de los principales conceptos de la hidrogeología isotópica descritos en el apartado 3 (Marco Teórico).

8.1 Valores de Deuterio y Oxígeno-18 en Precipitaciones

Se presentan y analizan los contenidos isotópicos disponibles de las precipitaciones que se producen en el área de estudio. Esta información se considera la base de las investigaciones posteriores sobre las señales isotópicas de las aguas subterráneas y superficiales, ya que son el origen de las mismas. Por ejemplo, uno de los ejercicios más frecuentes en hidrogeología isotópica es comparar las composiciones promedio ponderadas de las lluvias de un sector, con los contenidos isotópicos de las aguas subterráneas o superficiales para determinar la altura de recarga o el grado de evaporación de las aguas.

Prácticamente toda la información isotópica recopilada procedente de precipitaciones, corresponde a datos de las I y XV Regiones (18 puntos de muestreo), mientras que sólo dos corresponden a la II Región. De la III Región no existe información de este tipo. Los valores de $\delta^{18}\text{O}$ varían entre -31‰ y -0,66‰ y el $\delta^2\text{H}$ entre -201‰ y -1,3‰.

En la Figura 8.1 se han representado todos los análisis disponibles, diferenciando las muestras por región y si corresponden a precipitaciones caídas durante la estación lluviosa (diciembre-marzo) o seca (abril- noviembre).

Las composiciones se alinean efectivamente a lo largo de la MWL, pero obviamente se ajustan mejor a la LMWL que ha sido definida por varios autores con ligeras diferencias, que tienen que ver sobretudo con el área de estudio considerada en cada investigación (Tabla 8.1).

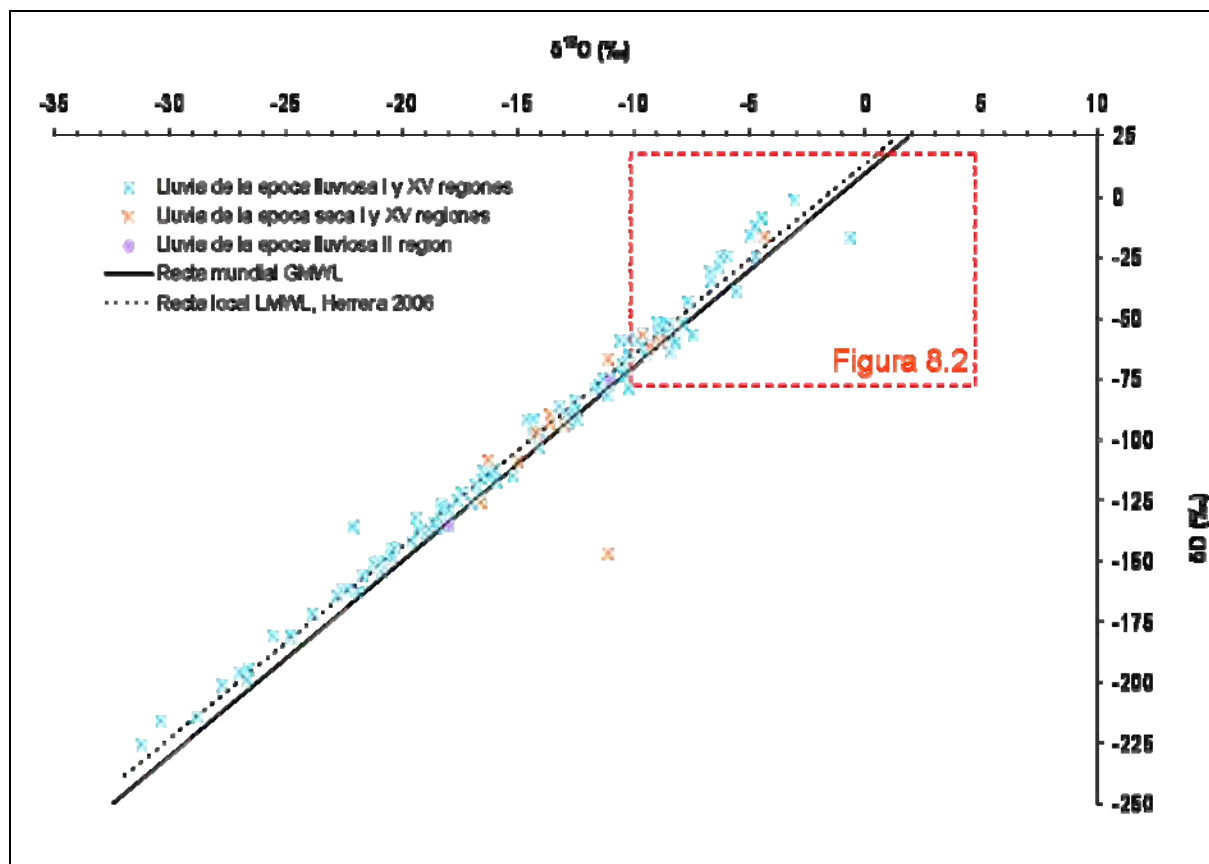


Figura 8.1. Composiciones isotópicas de precipitaciones en el Altiplano chileno.

Tabla 8.1: Valores de LMWL descritas anteriormente en la zona.

Ecuación	Fuente	Área a la que hace referencia
$\delta D = 8 \cdot \delta^{18}O + 10$	Craig, 1961 (MWL)	Mundial
$\delta D = 7,9 \cdot \delta^{18}O + 14$	Herrera et al., 2006	Norte Region I
$\delta D = 7,8 \cdot \delta^{18}O + 9,7$	Aravena et al., 1999	Norte de Chile (I y XV Regiones)
$\delta D = 8,15 \cdot \delta^{18}O + 15,3$	Chaffaut et al., 1998	Altiplano norte de Chile y sur de Bolivia
$\delta D = 7,8 \cdot \delta^{18}O + 10,3$	Fritz et al., 1981	Pampa de Tamarugal
$\delta D = 8 \cdot \delta^{18}O + 15,2$	Gonfiantini et al., 2001	Parte oriental del Altiplano

Las composiciones isotópicas de las lluvias del área de estudio y el origen de las mismas (frente procedente de los océanos Pacífico o Atlántico) determinan la pendiente y el valor del exceso de deuterio de la LMWL. Aravena et al. (1999) señalan que la mayor parte de las

lluvias de altitudes elevadas proceden del Océano Atlántico y cruzan la cuenca del Amazonas. Herrera et al. (2006) están de acuerdo con esta afirmación, aunque postulan que las muestras tomadas por Fritz et al. (1981) y Aravena et al. (1999) fueron obtenidas a altitudes demasiado bajas como para calcular una LMWL representativa del Altiplano. En este sentido la LMWL que propone este autor para la parte norte de la I Región corresponde a la ecuación obtenida a partir de muestras tomadas solamente a altitudes mayores a los 4.000 msnm. Esta LMWL es similar a la que proponen Gonfiantini et al. (2001) para el este del Altiplano en Bolivia, y Chaffaut et al. (1998) para el Altiplano del norte de Chile y sur de Bolivia.

El régimen de lluvias no es constante en el Altiplano- Puna durante todo el año, ni entre las distintas regiones. Mientras la estación lluviosa en las Regiones I, XV y II se produce entre diciembre y marzo, en la Tercera Región las lluvias más importantes se producen entre mayo y julio. Este fenómeno queda reflejado en las composiciones isotópicas de las aguas. Las muestras tomadas por Herrera et al. (2006) en el Lago Chungará muestran que las lluvias de la época seca presentan en general un contenido isotópico más enriquecido en $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$, respecto a las precipitaciones de la época lluviosa. Aravena et al. (1999) encuentran la misma relación con las muestras que proceden de la Pampa del Tamarugal y el norte del Altiplano chileno, lo cual puede observarse también en la Figura 8.1. Es decir las muestras de precipitaciones tomadas en la época seca presentan en promedio composiciones más enriquecidas que en las de épocas lluviosas.

Las muestras de lluvia que presentan composiciones más enriquecidas en $\delta^2\text{H}$ que -50‰ no se ajustan bien sobre la LMWL. Presentan una correlación lineal, pero con una mayor pendiente que la sugerida (Figura 8.2). Estas muestras proceden de las cuencas del Lago Chungará y Río Lauca, y de muestras de nieve de la Segunda Región. Algunos de estos valores de Herrera et al. (2006) se atribuyen a las precipitaciones de masas de vapor que recibieron agua evaporada de grandes cuerpos de agua del Altiplano, como el Lago Titicaca.

Aravena et al. (1999) investigaron la relación entre la altitud y el contenido isotópico de la lluvia durante los años 1974- 1975 y 1984- 1986 en la Pampa del Tamarugal y el Altiplano de Chile. A partir de sus resultados, observaron que las lluvias de verano presentan una buena relación entre la altitud de precipitación y el contenido isotópico promedio del lugar, mientras que para las lluvias de invierno esta relación no es tan buena. Sin embargo, con los datos presentados pueden calcularse las composiciones promedio ponderadas de todas las estaciones disponibles, obteniendo las relaciones de un empobrecimiento promedio de -4‰ para la δD y de -0,5‰ para la $\delta^{18}\text{O}$ por cada 100 m de incremento de la altitud de precipitación (Figura 8.3).

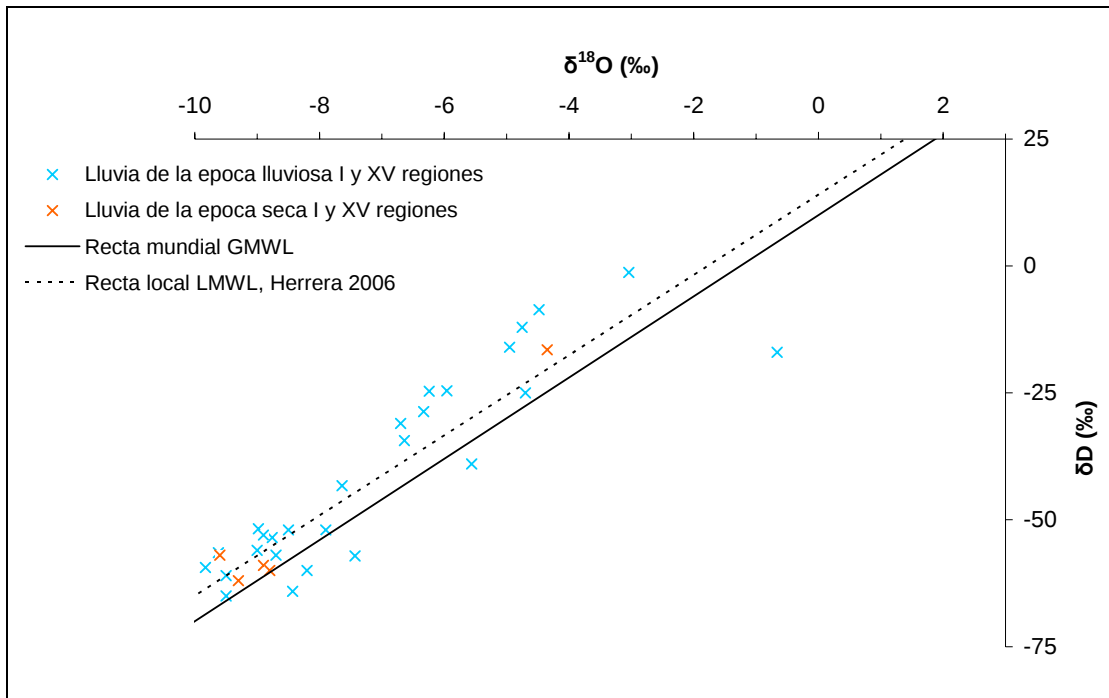


Figura 8.2: Desajuste de las aguas más enriquecidas en $\delta^2\text{H}$ (detalle Figura 8.1).

Estos valores pertenecen solamente a las Regiones I y XV, pero se espera encontrar relaciones similares en las demás regiones del Altiplano chileno.

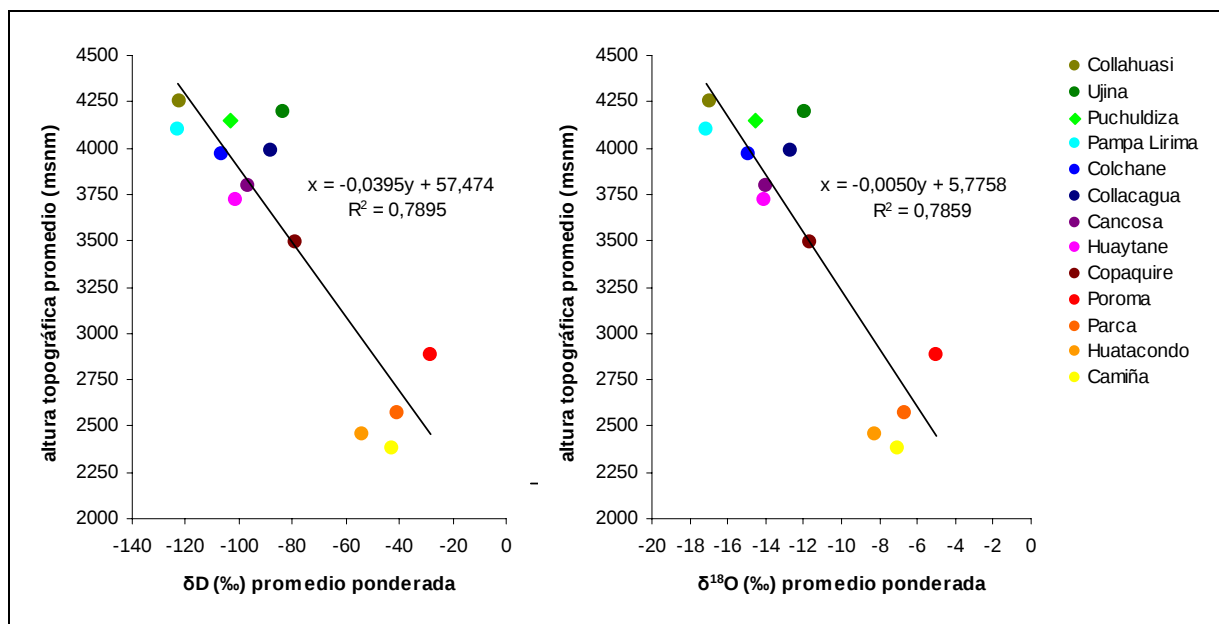


Figura 8.3: Relación entre la altura topográfica en que cae una precipitación y su composición isotópica promedio ponderada (δD y $\delta^{18}\text{O}$). Elaborado con datos de Aravena et al. (1999) con datos de distintas cuencas de las I y XV Regiones procedentes de lluvias entre 1984 y 1986.

Aunque la correlación de estos datos no es muy buena, se espera que su cálculo con una serie de datos mayor confirme esta relación entre la altitud y la composición promedio de las lluvias, y proporcione ecuaciones más exactas de este comportamiento. Hay que considerar sin embargo, que este gráfico obedece al empobrecimiento de las lluvias en isótopos pesados (se vuelven más ligeras) con su avance, y que por lo tanto el estudio conjunto de las composiciones, funcionamiento y movimiento de los frentes procedentes del Océano Pacífico (invierno) y del Océano Atlántico (invierno altiplánico) en las distintas épocas del año será fundamental para entender las composiciones encontradas que dan origen a las composiciones de las aguas en las cuencas.

8.2 Valores de Deuterio y Oxígeno en Aguas Subterráneas

La base de datos contiene un total de 195 análisis de isótopos estables (δD y $\delta^{18}O$) en aguas subterráneas. De éstos, 77 proceden de las Regiones I y XV, 76 de la Segunda y 42 de la Tercera. En este apartado se han considerado como aguas subterráneas las muestras de manantiales puntuales y pozos, ya que ambos tipos de aguas son una manifestación de la composición de las aguas en el acuífero.

Las composiciones isotópicas de todas estas muestras se han representado en la Figura 8.4, donde se puede observar que la mayoría de las muestras se alinean paralelamente a la LMWL, entre esta recta y la LMWL sin exceso de deuterio, indicando que el agua de recarga fue afectada por la evaporación desde el terreno cuando ésta formaba parte de la humedad del suelo. Las muestras de pozos, que pertenecen en su gran mayoría a distintas cuencas de la II Región, se sitúan entorno a una composición promedio de -10‰ para $\delta^{18}O$ y -80‰ para δD .

Dado que la composición de las aguas subterráneas representa la mezcla de distintos eventos de lluvia, en general la composición de las aguas subterráneas puede considerarse como la composición promedio ponderada de una cierta región (Aravena et al., 1995). Por lo tanto, esta composición promedio de los pozos, si es que sus aguas no han sido afectadas por otros procesos que produzcan fraccionamiento isotópico, puede considerarse como el promedio de la composición de las aguas de recarga del sector.

Existen algunas muestras tanto de pozos como de manantiales que se alejan de las LMWL y LMWL sin exceso de deuterio. Para entender estos valores se han representado en la Figura 8.5 las composiciones isotópicas, considerando la región a la que representan. En ella se observa un enriquecimiento gradual de las aguas de norte a sur, lo que se explicaría en parte por la distribución latitudinal de las masas de vapor que generan las precipitaciones. Cabe destacar que las muestras de la Tercera Región se alinean con una pendiente distinta a la LMWL.

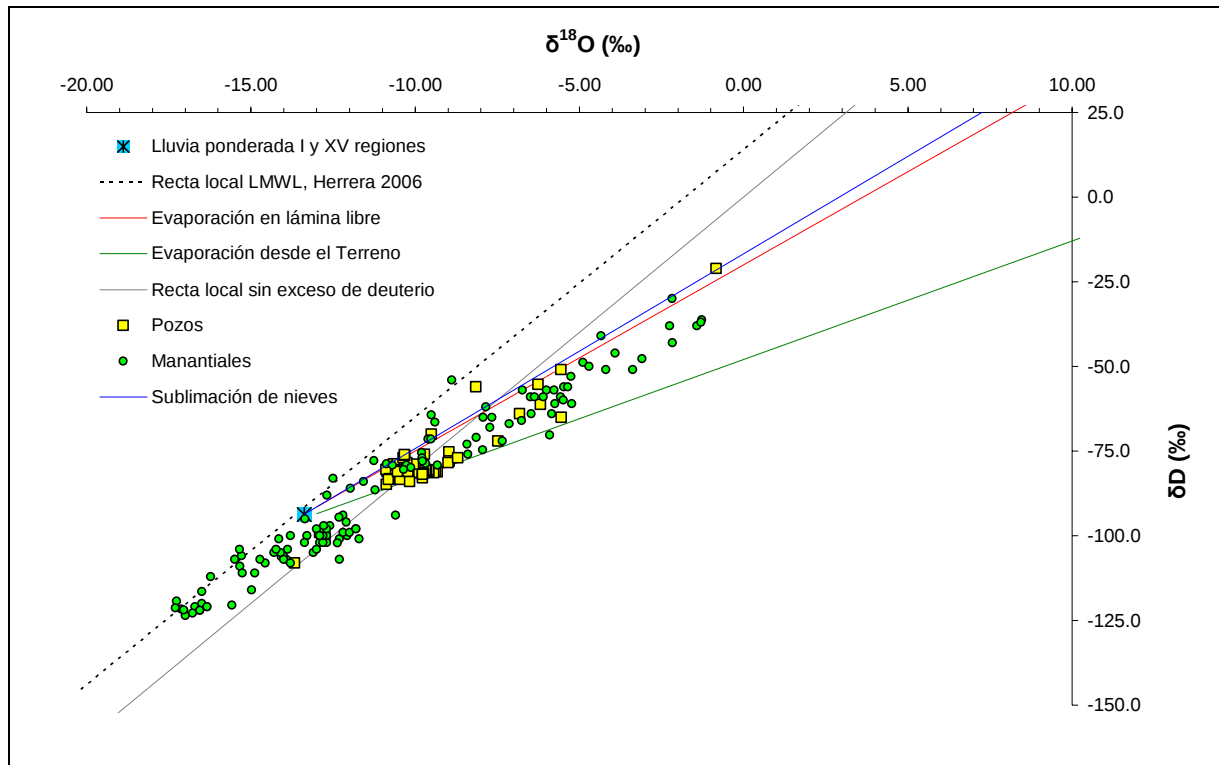


Figura 8.4: Composiciones isotópicas de las aguas subterráneas (manantiales y pozos).

Hay dos procesos que pueden dar una explicación a este cambio de composición en las aguas superficiales o subterráneas:

- La sublimación de la nieve antes de su derretimiento (Clark y Fritz, 1997).
- La evaporación del agua en la zona no saturada o desde aguas subterráneas cercanas a la superficie (Aravena, 1995).

Las diferencias de las formas de precipitación que ocurren en las tres regiones, como que en la Primera Región alrededor del 10-20% se produce como nieve, mientras que en la Segunda y Tercera lo es el 50-80%, y además la nieve de las Regiones II y III es en promedio más persistente en el tiempo, son consideradas por Risacher et al. (2003) como causas de las diferencias composicionales. Efectivamente la sublimación de la nieve contribuye al enriquecimiento isotópico, de modo que las aguas superficiales y subterráneas que reciben aportes de fusión de nieve tendrán un contenido isotópico más elevado.

Investigaciones sobre el enriquecimiento isotópico por sublimación (Moser y Stichler, 1975 en Clark y Fritz, 1997) muestran una pendiente de 5,75, mayor a la que generalmente se produce por el proceso de evaporación en lámina libre (Figura 8.5).

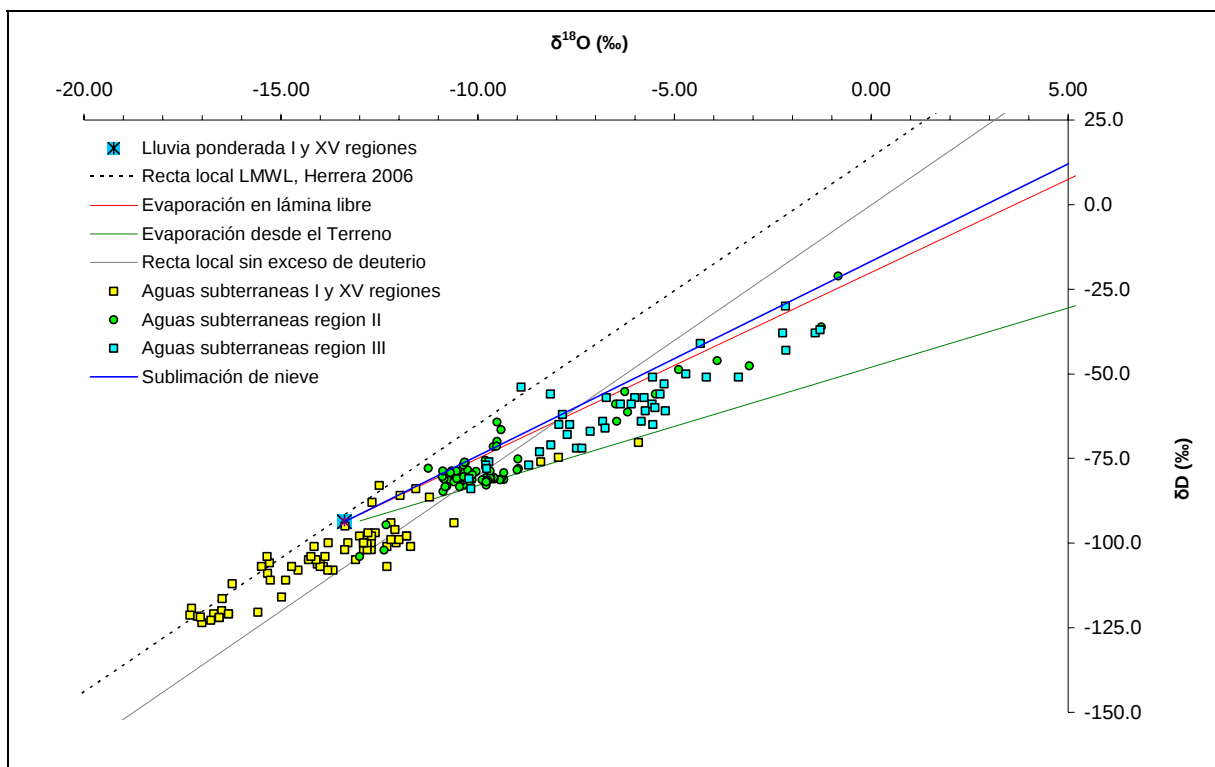


Figura 8.5: Composiciones isotópicas de las aguas subterráneas por región

Las composiciones de las muestras de la Tercera Región, junto con algunas pocas de la Primera y de la Segunda Región se sitúan entre ambas rectas. Esto indicaría que efectivamente los dos procesos están presentes y que, evaluando estos datos muestra por muestra según su ubicación en una cuenca, podría determinarse probablemente el proceso que más influye en la composición de cada una de ellas.

8.3 Valores de Deuterio y Oxígeno en Aguas Superficiales

El número de muestras considerado para este apartado son 81, de las cuales 44 proceden de las I y XV Regiones, 18 de la Segunda y 19 de la Tercera. Las muestras superficiales incluyen aguas de cauces superficiales, lagunas y pozas. Las composiciones encontradas oscilan entre -16,2 y +9,4‰ para la $\delta^{18}\text{O}$ y entre -120 y +10,1‰ para la $\delta^2\text{H}$.

Las composiciones de estas muestras se han representado en la Figura 8.6. Las muestras de ríos y pequeños cauces son similares a las aguas de las cuales se alimentan (Figura 8.1 y Figura 8.4). Aunque están expuestas al fenómeno de la evaporación, dado que tienen un corto tiempo de tránsito en los cauces, el enriquecimiento isotópico de las muestras producido por este fenómeno es leve. Al contrario, las muestras de lagunas saladas presentan composiciones isotópicas fuertemente enriquecidas en comparación con los cauces superficiales y aguas subterráneas del sector. Esto es producto de la alta evaporación a la que están expuestas.

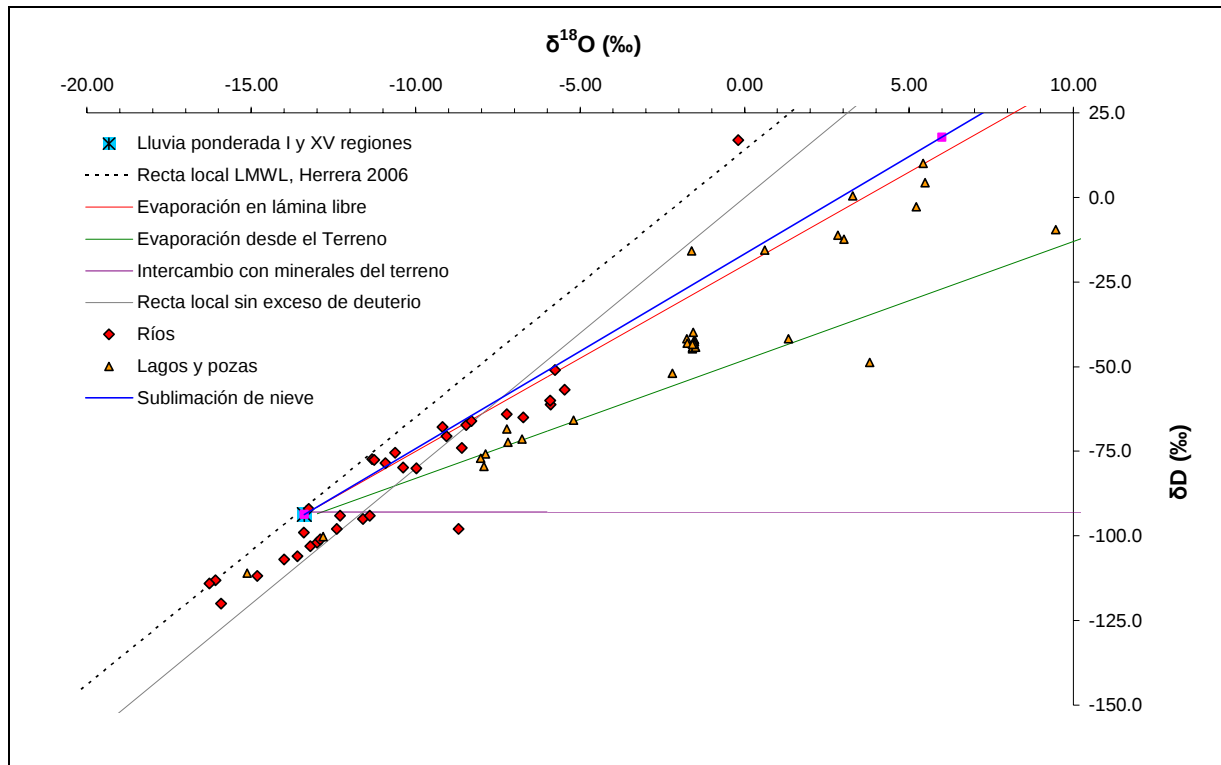


Figura 8.6: Composición isotópica de las aguas superficiales.

Si se diferencian estas composiciones isotópicas según la región administrativa chilena a la cual pertenecen, también se observan diferencias importantes (Figura 8.7). En este caso, al contrario que con las aguas subterráneas, las muestras de la Tercera Región son las que menos se alejan de la LMWL y la LMWL sin exceso de deuterio. Están ubicadas a la derecha de esta segunda recta pero sólo ligeramente. No hay ninguna de estas muestras que pertenezca a lagunas o pozas en esta región, por lo que estas composiciones son muy similares a las de las aguas subterráneas de la zona (Figura 8.5).

En cambio, en las Regiones I, XV y II sí existen muestras de lagunas y pozas afectadas por la evaporación. Pero analizando las muestras que no están afectadas por este proceso se observa que las composiciones de la Primera Región son más ligeras que las de la Segunda, lo cual se explica por las diferencias latitudinales y en el tipo de precipitaciones.

Debido a la falta de información del contenido isotópico de las lluvias en la Segunda y Tercera Región es difícil establecer la responsabilidad de la composición del agua de recarga, sobre las composiciones encontradas en las aguas superficiales y subterráneas que muestran enriquecimientos isotópicos. Esto dificulta las interpretaciones sobre el origen y altura de la recarga.

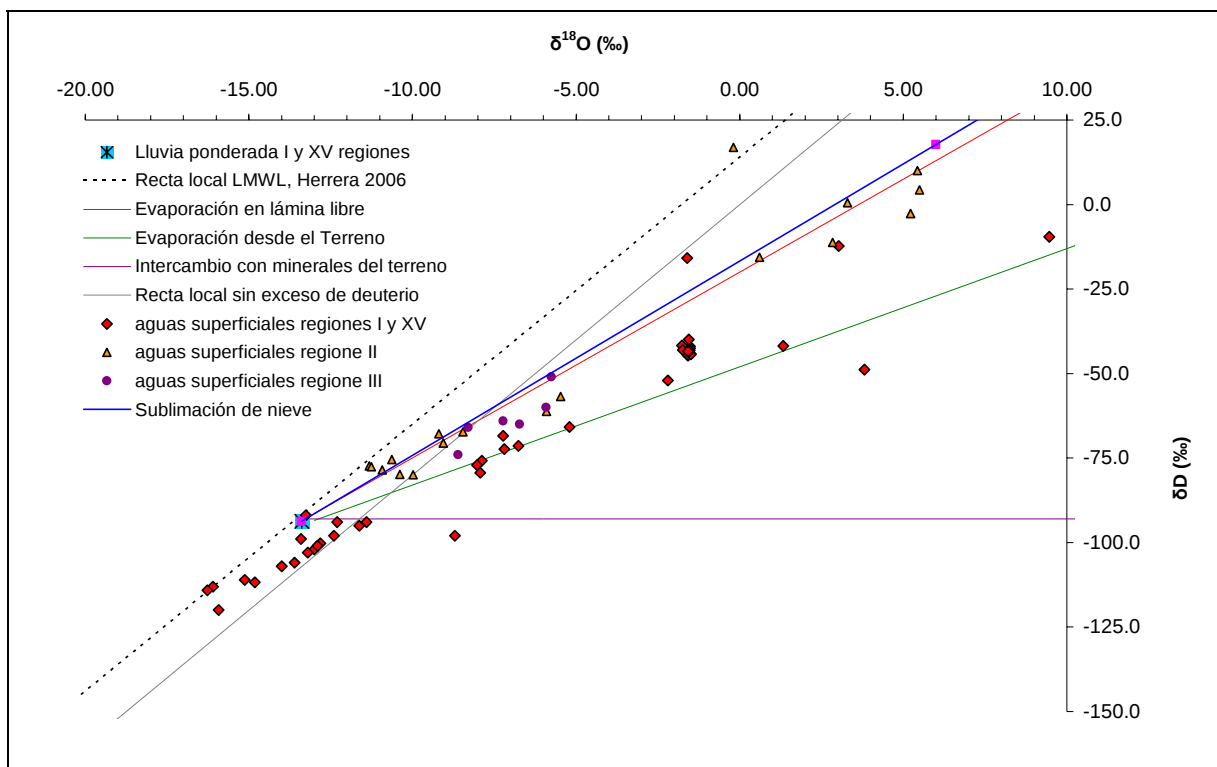


Figura 8.7: Composición isotópica de las aguas subterráneas por región.

9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La base de datos incorporada en el marco de este proyecto, y específicamente en este análisis regional de la información, cuenta con 918 puntos de muestreo, en los que se posee información de 1.460 análisis químicos y/o isotópicos, que representan en proporciones similares a las regiones en que se emplaza el Altiplano chileno. Esta información ha sido procesada para conocer el comportamiento de las aguas según los procesos físicos y químicos que las afectan.

Las aguas subterráneas y superficiales se distribuyen en amplios rangos de CE y en general se caracterizan por ser relativamente dulces a salobres, no obstante es frecuente reconocer aguas salinas en los dominios de los salares. El rango de pH, por el contrario, gracias a la capacidad buffer del agua, apenas varía entre 7 y 8. La temperatura característica de las aguas de esta zona es de 10 a 20 °C, de acuerdo con las temperaturas promedio atmosféricas, excepto aquellas que han sido influenciadas por campos geotérmicos, comunes en esta región de rasgos volcánicos.

Respecto a la composición de las aguas, evaluada en forma global y no para cada cuenca en particular, no se aprecian grandes diferencias entre los análisis de muestras obtenidas de pozos, manantiales, lagunas o ríos. La concentración relativa de los elementos mayoritarios varía más bien en función de los rangos de salinidad, ya que este parámetro permite discriminar en primera instancia, si se trata de aguas que sólo han interactuado con los minerales propios del acuífero, o si han estado en contacto con ambientes evaporíticos, expuestas al efecto de la disolución de sales y evaporación generalmente en los depocentros de las cuencas. En este sentido, aún sin considerar la ubicación de las muestras es posible establecer ciertas asociaciones entre la composición y concentración química de las aguas, y la dinámica de las cuencas altiplánicas en general.

Dadas las características de las cuencas endorreicas, en que el agua de las precipitaciones se infiltra en los sectores más elevados, luego transita por los acuíferos hasta las zonas deprimidas y allí es expuesta a la evaporación, que actúa como principal mecanismo de descarga, es posible establecer asociaciones entre el flujo del agua y la salinidad.

Por lo tanto las aguas dulces, suelen ser del tipo bicarbonatada cálcica y se pueden asociar a las zonas de recarga. A medida que fluyen por los acuíferos o los cauces superficiales, van incorporando elementos del entorno geológico, su contenido de sales aumenta y su quimismo adquiere una composición hacia el tipo sulfatada cálcica a magnésica. Cuando se acercan a la zona del salar, la topografía es más bien llana y el flujo pierde velocidad, los aportes de agua superficial quedan más susceptibles a la evaporación, al igual que el flujo de agua subterránea, ésta se va acumulando y el nivel freático es cada vez más somero. Es común la formación de lagunas y canales de disolución de sales. Todos estos procesos contribuyen a aumentar la

salinidad de las aguas, y su concentración de cloruro y sodio aumenta progresivamente. Esto permite asociar las aguas de tipo clorurado sódico, generalmente salobres e incluso saladas, a las zonas terminales del flujo de la cuenca (Figura 9.1).

Las muestras obtenidas en manantiales termales constituyen una excepción, ya que generalmente se ubican cerca de las zonas de recarga, pero tienden a ser salobres y de composición también clorurada sódica.

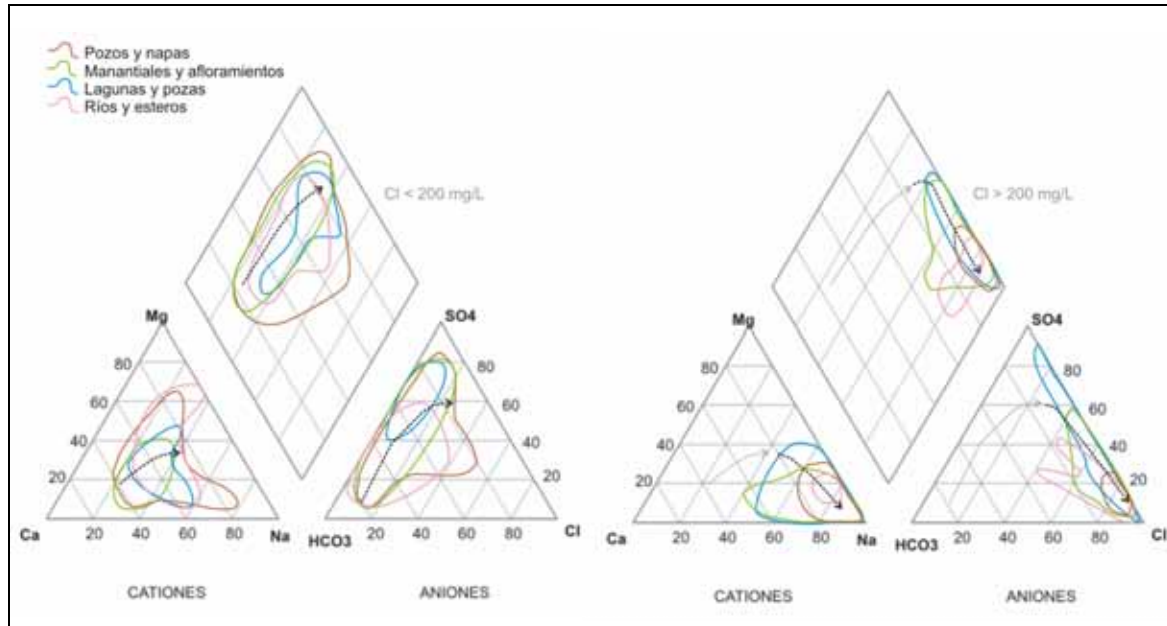


Figura 9.1: Asociación del tipo de agua a la salinidad y patrón de flujo.

Especialmente elevada se considera la concentración de algunos elementos minoritarios (>2 mg/L) como el B, Li y Si. Este fenómeno se atribuye al carácter volcánico del Altiplano, su geología y a las condiciones de aridez, que se reflejan en aguas muy salinas con concentraciones inusuales en otros dominios de elementos disueltos. El B y el Li provendrían principalmente de actividad volcánica efusiva y fluidos hidrotermales. Su acumulación se atribuye al comportamiento como iones conservativos en las aguas. El Si suele relacionarse con la meteorización de silicatos, presentes en rocas ígneas y volcánicas, y a pesar de su baja solubilidad en condiciones naturales, puede ser incorporado al agua si se alcanzan temperaturas suficientemente elevadas durante el recorrido de éstas.

Dadas las situaciones expuestas anteriormente, no es extraño que un 80% de las aguas analizadas presenten problemas de calidad respecto a las normas chilenas de agua potable y riego. Los parámetros sobrepasados con mayor frecuencia son el arsénico, cromo, boro, cianuro y STD.

Para complementar el análisis a escala regional sobre la dinámica de las aguas en el área, se cuenta con datos isotópicos de deuterio y oxígeno-18. Las aguas de recarga pueden caracterizarse mediante el estudio de las precipitaciones, donde el $\delta^{18}\text{O}$ varía entre -31‰ y -0,66‰ y el $\delta^2\text{H}$ entre -201‰ y -1,3‰. Gráficamente se corrobora su alineación con la Recta Meteorica Mundial (en inglés, MWL). A escala mundial, las lluvias producidas a mayor latitud suelen presentar razones isotópicas menores, pero en la región altiplánica ocurre el fenómeno inverso (Herrera et al., 2006; Aravena et al., 1999). La mayor parte de las precipitaciones que aquí se producen provienen de masas de aire que han cruzado el Amazonas desde el Océano Atlántico, por lo que sus razones isotópicas han disminuido (efecto de la continentalidad y aumento de la altura), otorgándole un sello característico a la recarga producida por el invierno altiplánico. Sin embargo el régimen de precipitaciones varía de una región a otra, lo que se traduce en una mezcla de proporciones variables entre las masas de aire húmedo originadas en los océanos Atlántico y Pacífico. En las I, XV y II los meses más lluviosos van de diciembre a marzo, durante el invierno altiplánico, por lo que la composición isotópica de las precipitaciones se empobrece. Pero a medida que la latitud aumenta, los meses de mayo a julio pasan a ser los de mayor aporte de precipitaciones y las señales isotópicas de las lluvias se enriquecen en isótopos pesados. Las masas de aire húmedo que se producen en este período provienen del Océano Pacífico, y si bien se exponen al fraccionamiento producto de la altura y la estacionalidad, la diferencia estaría marcada por el menor efecto de la continentalidad.

Una vez que las precipitaciones llegan al suelo, pueden escurrir a nivel superficial o infiltrarse, pasando entonces a ser parte del flujo subsuperficial o subterráneo. La composición de las aguas subterráneas integra así los rasgos isotópicos de las precipitaciones promedio caídas en cada cuenca. A nivel regional, según los datos disponibles, éstas composiciones bordean valores de -10‰ para $\delta^{18}\text{O}$ y -80‰ para δD . Suponiendo que las precipitaciones recargan directamente al acuífero, es de esperar que estos datos también se alineen paralelamente a la MWL y que las aguas se vayan enriqueciendo en isótopos pesados de norte a sur. Así ocurre efectivamente, pero en la Tercera Región destaca además un descenso en la pendiente con que se alinean las muestras. Este fenómeno ha sido explicado por una combinación de procesos. Primero, el efecto de la sublimación en la razón isotópica de la nieve, acentuado más al sur porque recibe una mayor proporción de este tipo de precipitaciones, y que se suma a la evaporación de agua en la zona vadosa, lo cual ocurre en las cuatro regiones estudiadas.

La composición isotópica de las aguas superficiales varía según el nivel de exposición que tengan a la evaporación. Su rango de $\delta^{18}\text{O}$ oscila entre -16,2 y +9,4‰, y de $\delta^2\text{H}$ entre -120 y +10,1‰. Las aguas de los cauces superficiales se ubican cerca de las aguas subterráneas, que constituyen su principal fuente de alimentación. No presentan un mayor fraccionamiento isotópico ya que la velocidad de su flujo impide que la evaporación sea intensa. No así las

muestras obtenidas en lagunas y pozas, muy enriquecidas en isótopos pesados, un rasgo que junto a la elevada salinidad, denuncian la influencia de la evaporación.

Recomendaciones

Entendiendo que para cualquier estudio hidrogeoquímico, la etapa de muestreo y los resultados analíticos son la base de éste, se presentan algunas consideraciones relevantes para un aprovechamiento eficiente de futuras campañas de muestreo.

- Al recolectar muestras de cauces superficiales, como ríos y esteros, caracterizar en lo posible la hidrogeoquímica del curso de agua principal antes y después de la desembocadura de un afluente. Calcular en terreno un caudal aproximado de los tributarios y cursos principales de agua, para estimar la influencia que podrían tener los primeros en la composición de las aguas más abajo.
- La toma de muestras de agua de manantiales debe ser cuidadosa y detallada. Cabe aclarar que manantiales se considera equivalente a vertientes y afloramientos, sin embargo en el texto se han mantenido los términos originales utilizados en la bibliografía desde la cual se han recopilado los datos analizados en este proyecto. Conviene separar las muestras según correspondan a manantiales puntuales o difusos. Los primeros corresponden exclusivamente a aquellas muestras de agua obtenidas en el punto exacto donde sale el flujo de la roca o depósito, sin que alcance a tener un contacto considerable con el ambiente. En situaciones complejas es posible excavar la parte externa del afloramiento para obtener con seguridad agua directamente del acuífero. Si no se puede acceder o reconocer con exactitud desde dónde emana el agua, p. ej. en algunos bofedales, se recomienda considerar el punto como manantial difuso. Este término considera que el agua realiza previo al muestreo un recorrido subsuperficial por el terreno, durante el cual puede disolver sales del suelo o estar afectada por el fenómeno de la evaporación.
- Las muestras de agua subterránea obtenidas en pozos deben ser tomadas con precaución. Algunos pozos han estado sin actividad durante largo tiempo por lo que el agua acumulada en su interior puede no ser representativa del acuífero. Según el estado en que se encuentre la habilitación, ésta podría ser por si misma un foco de contaminación en las aguas. Lo ideal es bombear el pozo hasta que el agua de su interior se haya renovado, aunque no siempre se cuenta con las condiciones para ello. En este caso, conviene usar al menos un método manual para vaciar la mayor parte y obtener agua relativamente fresca o por ejemplo, utilizar muestreadores manuales (bailers) que permiten tomar la muestra frente a la zona de rejilla (cribas) del pozo, donde la renovación del agua dentro de la perforación se espera mayor. También muchas veces se toman muestras durante la perforación de los pozos, que serán representativas del acuífero dependiendo de la técnica empleada y cómo

se recupere la muestra de agua. El método de perforación debe ser especificado, así como aditivos que se hubieran incorporado durante la operación.

- Para la caracterización de los parámetros físico-químicos y como información relevante para el laboratorio, se deben medir en terreno por lo menos, la temperatura, el pH y la CE con equipos previamente calibrados en cada campaña.
- En el Altiplano las oscilaciones térmicas suelen ser bruscas durante todo el año, por lo que además de la temperatura de la muestra, se debe medir la temperatura del ambiente, y en lo posible describir condiciones climáticas como dirección e intensidad del viento y precipitaciones. Estos datos, pueden ayudar en gran parte a interpretar resultados anómalos o no esperados en las muestras.
- Al momento de acordar los distintos tipos de análisis con el laboratorio, se debe solicitar entre ellos, la concentración de elementos mayoritarios como disueltos, ya que son éstos los responsables del equilibrio iónico del agua. En caso que este parámetro se vea afectado y no se logre un error de balance aceptable, se debe considerar la influencia en el balance de elementos minoritarios disueltos (que pudieran estar presentes como mayoritarios) e incluirlos en el cálculo.
- En el análisis de los elementos minoritarios, el límite mínimo de detección del laboratorio es también un dato, por lo que no debe ser pasado por alto al confeccionar la base de datos.
- Es conveniente tomar medidas de control sobre los resultados entregados por el laboratorio, para ello se recomienda introducir duplicados o blancos en cada serie de muestras.
- A nivel regional, se ha señalado que las regiones I-XV, II y III poseen una cantidad similar de datos de análisis químicos. Pero desde el punto de vista isotópico, falta incorporar especialmente datos de precipitaciones en las regiones II y III.

10 REFERENCIAS

- Aravena, R. 1995. Isotope hydrogeology and geochemistry of northern Chile groundwaters. *Bull. Inst. Fr. études andines* 24 (3), 495- 503.
- Aravena, R. y Suzuki, O. 1990. Isotopic evolution of river waters in the northern Chile region. *Water Resources Research*. 26 (12), 2.887- 2.895.
- Aravena, R., Suzuki, O., Peña, H., Pollastri, A., Fuenzalida, H. y Grilli, A. 1999. Isotopic composition and origin of precipitation in northern Chile. *Applied Geochemistry* 14, 411- 422.
- Boschetti, T., Cortecchi, G., Barbieri, M. y Mussi, M. 2007. New and past geochemical data on fresh to brine waters of the Salar de Atacama and Andean Altiplano, northern Chile. *Geofluids* 7, 33- 50.
- Chaffaut, I., Coudrain-Ribstein, A., Michelot, J.L. y Pouyaud, B. 1998. Précipitation d'altitude du nord-Chili, origine des sources de vapeur et données isotopiques. *Boletín del Instituto Francés de Estudios Andinos* 27 (3), 367- 384.
- Clark, I. y Fritz, P. 1997. *Environmental Isotopes in Hydrogeology*. Lewis Publishers. 328 pp.
- Cortecchi, G., Boschetti, T., Mussi, M., Herrera, C., Mucchino, C. y Barbieri, M. 2005. New chemical and original isotopic data on waters from El Tatio geothermal field, northern Chile. *Geochemical Journal* 39 (6), 547- 571.
- Custodio, E. y Llamas, M.R. 1976. *Hidrología Subterránea*. Ediciones Omega, Barcelona, España. 2.350 pp.
- Custodio, E., Llamas, M.R. 1983. *Hidrología Subterránea*. Ediciones Omega, Barcelona, España. 2.353 pp.
- Domenico P.A. y Schwartz, F.W. 1998. *Physical and Chemical Hydrogeology*. Wiley. 506 pp.
- Fernandez-Turiel, J.L, Garcia-Valles, M., Gimeno-Torrente, D., Saavedra-Alonso, J. y Martinez-Manent, S. 2005. The hot spring and geyser sinters of El Tatio, Northern Chile. *Sedimentary Geology* 180, 125- 147.
- Fritz, P., Suzuki, O., Silva, C. y Salati, E. 1981. Isotope hydrology of groundwaters in the Pampa del Tamarugal, Chile. *Journal of Hydrology* 53, 161- 184.
- Fournier, R.O. y Truesdell, A.H. 1970. Chemical indicators of subsurface temperature applied to hot spring waters of Yellowstone National Park, Wyoming, USA. *United*

Nations Symposium on the Development and Utilization of Geothermal Resources, Pisa, 1970: Geothermics, Special Issue 2 (2), 529-535.

- Godfrey, L.V. 2003. Stable isotope constraints on the transport of water to the Andes between 22° and 26°S during the last glacial cycle. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 194 (1-3), 299- 317.
- Gonfiantini, R., Roche M.A., Olivry, J.C., Fontes, J.C. y Zuppi, G.M. 2001. The altitude effect on the isotopic composition of tropical rains. *Chemical Geology* 181 (1- 4), 147-167.
- Hauser, A. 1997. Catastro y caracterización de las fuentes de aguas minerales y termales de Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería. 78 pp.
- Herrera, C., Pueyo, J., Sáez, A. y Valero-Garcés, B. 2006. Relación de aguas superficiales y subterráneas en el área del lago Chungará y lagunas de Cotacotani, norte de Chile: un estudio isotópico. *Revista Geológica de Chile* 33 (2), 299- 325.
- Houston, J. 2007. Recharge to groundwater in the Turi Basin, northern Chile: An evaluation based on tritium and chloride mass balance techniques. *Journal of Hydrology* 334, 534- 544.
- IAEA. 2001. GNIP Maps and Animations [on line], International Atomic Energy Agency, Vienna. <<http://isohis.iaea.org>>. Consultado el 10 de agosto 2009.
- Magaritz, M., Aravena, R., Peña, H., Suzuki, O. y Grillo, A. 1989. Water chemistry and isotope study of streams and springs in northern Chile. *Journal of Hydrology* 108, 323-341.
- Margaritz, M., Aravena, R., Peña, H., Suzuki, O. y Grillo, A. 1990. Source of groundwater in the deserts of northern Chile. *Ground Water* 28 (4), 513- 517.
- Marini, L. Geochemical techniques for the exploration and exploitation of geothermal energy [en línea]. <<http://cabierta.uchile.cl/revista/11/articulos/pdf/articulo6.pdf>> Consultado el 10 de agosto 2008.
- Matthess, G. 1994. Die Beschaffenheit des Grundwassers. Gebrüder Bornträger, Berlin, Stuttgart. 499 pp.
- Quade, J. 2007. Soils at the hyperarid margin: The isotopic composition of soil carbonate from the Atacama Desert, Northern Chile. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 71 (15), 3.772- 3.795.

- Rech, J., Quade, J. y Hardt, W. 2003. Isotopic evidence for the source of Ca and S in soil gypsum, anhydrite and calcite in the Atacama Desert, Chile. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 67 (4), 575- 586.
- Risacher, F., Alonso, H. y Salazar, C. 1999. Volumen I: Síntesis. Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II, III Regiones, Chile. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, S.I.T. n° 51, Santiago, Chile. 89 pp.
- Risacher, F., Alonso, H. y Salazar, C. 2002. Hydrochemistry of two adjacent acid saline lakes in the Andes of northern Chile. *Chemical Geology* 187, 39-57.
- Risacher, F., Alonso, H. y Salazar, C. 2003. The origin of brines and salts in Chilean salars: a hydrochemical review. *Earth-Science Reviews* 63, 249-293.
- Strauch, G., Oyarzún, J., Fiebig-Wittmaack, M., González, E. y Weise, S.M. 2006. Contributions of the different water sources to the Elqui river (northern Chile) runoff evaluated by H/O isotopes. *Isotopes in Environmental and Health Studies* 42 (3), 303- 322.
- Steinmüller, K. 2001. Modern hot springs in the southern volcanic Cordillera of Peru and their relation to Neogen epithermal precious-metal deposits. *Journal of South American Earth Science* 14, 377- 385.
- Tassi, F., Aguilera, F., Vaselli, O., Medina, E., Tedesco, D., Delgado Huertas, A., Poreda, R. y Kojima, S. 2008. The magmatic- and hydrothermal-dominated fumarolic system at the Active Crater of Lascar volcano, northern Chile. *Bulletin of Volcanology* 71 (2), 171-183.

ANEXOS

ANEXO I
“Fichas Resumen de Estudios Revisados”

ANEXO I FICHAS RESUMEN DE ESTUDIOS REVISADOS

Autor : Aguirre, I. and Clavero, J		ID : IIIR-01
Título : “Antecedentes fisicoquímicos preliminares de cuerpos de agua superficial del Altiplano de la III Región de Atacama, Chile”		
Año: 2000	Referencia : IX Congreso Geológico Chileno (Puerto Varas) <u>Sociedad Geológica de Chile</u>	Número: 2:354-358.
Enfoque ☒ Agua Superficial ☐ Agua Subterránea ☐ Precipitación ☐ Otro		
Region ☐ I Region ☐ II Region ☒ III Region ☒ Otras		
Información Química ☒ Elementos mayoritarios ☒ Elementos minoritarios ☒ Parámetros físico-químicos		Información Isotópica ☐ D y ^{18}O ☐ Otros isótopos ligeros ☐ Isótopos pesados o radiactivos
Descripción En este trabajo se presentan los resultados preliminares de 23 determinaciones analíticas realizadas a muestras provenientes a cuerpos de agua superficial del Altiplano de la III Región de Atacama. Corresponden a 6 lagunas: Escondida, Wheelwright, del Bayo, del Jilguero, Verde y Brava; 2 salares: Piedra Parada y Grande; al Río Juncalito y su afluente el Río Negro y la fuente termal Río Negro. El objetivo del estudio era obtener antecedentes analíticos destinados a caracterizar químicamente las aguas, establecer sus cualidades, individualizar aquellos cuerpos cuyas concentraciones en determinados iones sobrepasaban la norma chilena de agua potable y establecer el posible origen de las sales contenidas en las aguas.		

Autor : Aravena, R., Suzuki, O., Pena, H., Pollastri, A., Fuenzalida, H., and Grilli, A.		ID : IR-01
Título : "Isotopic composition and origin of the precipitation in Northern Chile"		
Año : 1999	Referencia : <u>Applied Geochemistry</u>	Número : 14: 89-100.
Region ☒ I Region ☐ II Region ☐ III Region ☐ Otras		
Enfoque ☐ Agua Superficial ☐ Agua Subterránea ☒ Precipitación ☐ Otro		
Información Química ☐ Elementos mayoritarios ☐ Elementos minoritarios ☐ Parámetros físico-químico		Información Isotópica ☒ D y ^{18}O ☐ Otros isótopos ligeros ☒ Isótopos pesados o radiactivos
Descripción En este estudio se presentan datos isotópicos sobre la precipitación leve durante 1984-1986 y se habla de los principales procesos que influyen en su composición isotópica. Este análisis es complementado con la información sobre las trayectorias de las masas de aire que entregan la precipitación a la región de estudio.		

Autor : Berger, I. A. and Cooke , R. U.		ID : IIR-01
Título : "The origin and distribution of salts on alluvial fans in the Atacama Desert, northern Chile."		
Año: 1997	Referencia: <u>Earth Surface Processes And Landforms</u>	Número: 22(6): 581-600
Región ☐ I Región ☒ II Región ☐ III Región ☐ Otras		
Enfoque ☒ Agua Superficial ☐ Agua Subterránea ☒ Precipitación ☐ Otro		
Información Química ☒ Elementos mayoritarios ☐ Elementos minoritarios ☐ Parámetros físico-químicos		Información Isotópica ☐ D y ¹⁸ O ☐ Otros isótopos ligeros ☐ Isótopos pesados o radiactivos
Descripción El objetivo de este estudio era determinar la naturaleza, la cantidad y la distribución de minerales de sal sobre la superficie de tres abanicos aluviales en cuencas salares que representan un corte transversal de ambientes diferentes en el Desierto de Atacama, por lo que el origen y los procesos de distribución de las sales podrían ser deducidos.		

Autor : Bohlke, J. K.and Ericksen G. E		ID : TR-01
Título : "Stable isotope evidence for an atmospheric origin of desert nitrate deposits in northern Chile and southern California, USA."		
Año: 1997	Referencia: <u>Chemical Geology</u>	Número: 136(1-2): 135-152.
Región ☒ I Región ☒ II Región ☐ III Región ☐ Otras		
Enfoque ☐ Agua Superficial ☐ Agua Subterránea ☐ Precipitación ☒ Otros		
Información Química ☐ Elementos mayoritarios ☐ Elementos minoritarios ☐ Parámetros físico-químicos		Información Isotópica ☒ D y ^{18}O ☒ Otros isótopos ligeros ☐ Isótopos pesados o radiactivos
Descripción En este estudio se presentan nuevos datos isotópicos de nitrógeno para una pequeña parte de concentraciones de depósitos naturales que ocurren en el Desierto de Atacama y la región del Valle de la Muerte del Desierto de Mojave en el sur de California. Para las muestras también se presenta el análisis del isótopo de Oxígeno y de Azufre. Así el objetivo del estudio comprende determinar el origen de los depósitos de nitrato en el desierto y el valor del isótopo de nitrato natural del desierto que podría distinguirlos e nitratos que provienen de desecho animal, fertilizantes sintéticos y otras fuentes antropogénicas		

Autor : Boschetti, T., Cortecci , G.		ID : 2R-02
Título : "New and past geochemical data on fresh to brine waters of the Salar de Atacama and Andean Altiplano, northern Chile."		
Año: 2007	Referencia: <u>Geofluids</u>	Número: 7(1): 33-50
Región ☐ I Región ☒ II Región ☐ III Región ☐ Otras		
Enfoque ☒ Agua Superficial ☐ Agua Subterránea ☐ Precipitación ☐ Otros		
Información Química ☒ Elementos mayoritarios ☐ Elementos minoritarios ☒ Parámetros físico-químicos		Información Isotópica ☒ D y ¹⁸ O ☒ Otros isótopos ligeros ☐ Isótopos pesados o radiactivos
Descripción Este documento se refiere al análisis de los principales isótopos estables (H, O, S, C, Sr) de las aguas y solutos de la cuenca del Salar de Atacama (Río San Pedro, Honar Creek y Laguna Chaxa) y el sector de Lagunas Miscanti y Miñique, información que fue complementada con datos mas abundantes de literatura, en particular datos químicos anteriores de los aportes y salmueras del Salar de Atacama, comparando de esta forma la información con modelos y diagramas de estabilidad mineral usando programas computacionales y bases de datos termodinámicas.		

Autor : Carmona, V., Pueyo, J. J., Taberner C., Chong G., and Thirlwall, M.		ID : IIR-03
Título : "Solute inputs in the Salar de Atacama (N. Chile)"		
Año: 2000	Referencia: <u>Journal of Geochemical Exploration</u>	Número: 69-70:449-452
Región ☐ I Región ☒ II Región ☐ III Región ☐ Otras		
Enfoque ☒ Agua Superficial ☐ Agua Subterránea ☐ Precipitación ☐ Otros		
Información Química ☒ Elementos mayoritarios ☒ Elementos minoritarios ☐ Parámetros físico-químicos		Información Isotópica ☒ D y ^{18}O ☒ Otros isótopos ligeros ☐ Isótopos pesados o radiactivos
Descripción Estudios sobre la hidroquímica de la cuenca del Salar de Atacama (Moraga et al., 1974; Bevacqua, 1992; Alonso y Risacher, 1996; Risacher y Alonso, 1996) intentan dar una hipótesis sobre la formación de Salar y el origen de los presentes de solutos dentro de las salmueras. El objetivo de este estudio es proporcionar nuevas relaciones sobre la hidroquímica de la cuenca y un modelo para la fuentes o aportes y la mezcla del agua dentro del núcleo el área de Salar de Atacama.		

Autor : Chong, G.and Mendoza , M.		ID : IR-02
Título : "Evolution and geochemical signatures in a Neogene forearc evaporitic basin: the Salar Grande (Central Andes of Chile)."		
Año: 1998	Referencia: <u>Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology</u>	Número: 151(1-3): 39.
Región ☒ I Región ☐ II Región ☐ III Región ☐ Otras		
Enfoque ☒ Agua Superficial ☐ Agua Subterránea ☐ Precipitación ☐ Otros		
Información Química ☒ Elementos mayoritarios ☒ Elementos minoritarios ☐ Parámetros físico-químicos		Información Isotópica ☐ D y ¹⁸ O ☐ Otros isótopos ligeros ☐ Isótopos pesados o radiactivos
Descripción El objetivo de este estudio es describir la cuenca del Salar Grande , en cuanto a como se ha ido ajustando su geología y los registros de su contenido de sal para alcanzar de esta forma conclusiones sobre condiciones ambientales en el área durante el Neógeno, antes de la apertura del sistema hidrológico al Océano Pacífico. En este contexto Grande Salar muestra varios rasgos excepcionales, es el salar más occidental, siendo como una cuenca intramontana de la Cordillera de la Costa, muy cerca de la roca costera y esta compuesto de un cuerpo homogéneo halita (más del 90 % NaCl). El marco estructural en el área es complejo, no obstante estas características particulares, y el hecho que el salar de manera intensiva ha sido explotado para NaCl, la cuenca del Salar Grande ha sido mal estudiada.		

Autor : Cortecchi, G., Boschetti, T., Mussi, M., Herrera, C., Mucchino, C. and Barbieri, M.		ID : IIR-04
Título : "New chemical and original isotopic data on waters from El Tatio geothermal field, northern Chile"		
Año: 2005	Referencia: <u>Geochemical Journal</u>	Número: 39(6):547-571
Región ☐ I Región ☒ II Región ☐ III Región ☐ Otras		
Enfoque ☒ Agua Superficial ☒ Agua Subterránea ☐ Precipitación ☐ Otros		
Información Química ☒ Elementos mayoritarios ☒ Elementos minoritarios ☒ Parámetros físico-químicos		Información Isotópica ☒ D y ^{18}O ☒ Otros isótopos ligeros ☒ Isótopos pesados o radiactivos
Descripción El presente estudio sobre El Tatio fue realizado para: 1) verificar la persistencia de los rasgos geoquímicos del sistema geotérmico, en términos de fluidos multicapa y entalpía, 2) adquirir datos originales sobre el acuífero y composición isotópica del carbono y estroncio, 3) delinear el papel de fuentes magmáticas en el agua y procesos de interacción roca-agua y finalmente 4) elaborar un modelo geoquímico que combine información química antigua y nueva y los resultados isotópicos.		

Autor : Godfrey, L. V., Jordan T. E.		ID : IIR-05
Título : "Stable isotope constraints on the transport of water to the Andes between 22 degrees and 26 degrees S during the last glacial cycle."		
Año: 2003	Referencia: <u>Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology</u>	Número: 194(1-3): 299-317
Región ☐ I Región ☒ II Región ☐ III Región ☐ Otras		
Enfoque ☐ Agua Superficial ☐ Agua Subterránea ☒ Precipitación ☐ Otros		
Información Química ☐ Elementos mayoritarios ☐ Elementos minoritarios ☐ Parámetros físico-químicos		Información Isotópica ☒ D y ^{18}O ☐ Otros isótopos ligeros ☐ Isótopos pesados o radiactivos
Descripción En este estudio, un registro de paleoclima ha sido obtenido del oxígeno y las composiciones de isótopo de hidrógeno de aguas de lago atrapadas en inclusiones de halita sobre el último ciclo glacial para dos áreas en Sudamérica, Salar de Atacama en el norte de Chile y Salar de Hombre Muerto al noroeste de Argentina. La comparación de la composición isotópica de precipitación entre estos estados de climas humedo y seco, puede proporcionar ideas sobre las causas de los cambios de humedad en la sección árida de Andes.		

Autor : Herrera, C., Pueyo, J., Sáez, A. and Valero-Garcés, B.		ID : IR-0.3
Título : "Relación de aguas superficiales y subterráneas en el área del lago Chungará y lagunas de Cotacotani, norte de Chile: un estudio isotópico".		
Año : 2006	Referencia: <u>Revista Geológica de Chile</u>	Número: 33(2):299-325
Región ☒ I Región ☐ II Región ☐ III Región ☐ Otras		
Enfoque ☒ Agua Superficial ☐ Agua Subterránea ☒ Precipitación ☐ Otros		
Información Química ☒ Elementos mayoritarios ☐ Elementos minoritarios ☒ Parámetros físico-químicos		Información Isotópica ☒ D y ^{18}O ☐ Otros isótopos ligeros ☐ Isótopos pesados o radiactivos
Descripción Este estudio se enfoca a establecer hipótesis fundadas del sistema de circulación de las aguas subterráneas en el área Chungará- Cotacotani y su relación con las aguas superficiales, mediante la utilización de técnicas isotópicas. Para realizar la caracterización química e isotópica de las aguas de manantiales, Lagunas de Cotacotani y Lago Chungará, se realizaron distintas campañas de muestreo donde se determinó principalmente que las aguas del Lago Chungará presentan una composición química e isotópica homogénea lo que indica una buena mezcla de las aguas en el lago, por otra parte se determinó que una parte importante de la recarga hídrica que alimenta las lagunas de Cotacotani procede de aguas del lago Chungará a través de un flujo subterráneo.		

Autor : Houston, J.		ID : IIR-06
Título : "Recharge to groundwater in the Turi Basin, northern Chile: An evaluation based on tritium and chloride mass balance techniques."		
Año : 2007	Referencia: <u>Journal Of Hydrology</u>	Número: 334(3-4): 534-544.
Región ☐ I Región ☒ II Región ☐ III Región ☐ Otras		
Enfoque ☒ Agua Superficial ☒ Agua Subterránea ☒ Precipitación ☐ Otros		
Información Química ☒ Elementos mayoritarios ☐ Elementos minoritarios ☐ Parámetros físico-químicos		Información Isotópica ☐ D y ¹⁸ O ☐ Otros isótopos ligeros ☒ Isótopos pesados o radiactivos
Descripción Este estudio describe la hidrogeología de la capa acuífera mas cercana a la superficie, y pruebas hidráulicas, hidroquímicas e isotópicas para la recarga de la cuenca de Turi. Los datos de la cuenca son usados para demostrar que el tritio puede ser usado para calcular la edad de las aguas subterráneas y recorridos de los flujos en la capa acuífera freática, y que la técnica de balance de masa de Cl provee de un medio de estimación de recarga en la cordillera Andina volcánica, en situaciones donde las fuentes no meteóricas de Cl no existen o pueden considerarse.		

Autor : Leybourne, M. I. and Cameron E. M.		ID : IIR-07
Título : "Composition of groundwater associated with porphyry-Cu deposits, Atacama Desert, Chile: Elemental and isotopic constraints on water sources and water-rock reactions."		
Año : 2006	Referencia: <u>Geochimica et Cosmochimica</u>	Número: 70(7): 1616-1635
Región ☐ I Región ☒ II Región ☐ III Región ☐ Otras		
Enfoque ☐ Agua Superficial ☒ Agua Subterránea ☐ Precipitación ☐ Otros		
Información Química ☒ Elementos mayoritarios ☒ Elementos minoritarios ☒ Parámetros físico-químicos		Información Isotópica ☒ D y ^{18}O ☒ Otros isótopos ligeros ☐ Isótopos pesados o radiactivos
Descripción En este estudio se presentan los resultados de la investigación en la composición de las aguas subterráneas alrededor del depósito de cobre Spence en el Desierto de Atacama. Las muestras realizadas en la zona permitieron determinar los orígenes de las aguas y elementos disueltos, los factores que controlan la composición de las aguas subterráneas alrededor del depósito Spence y establecer si existe una relación geoquímica entre aguas subterráneas encontradas alrededor del depósito y anomalías observadas en los suelos que cubren el depósito.		

Autor : Lopez, P. L., Auque L. F.		ID : IR-04
Título : "Geochemical characteristics and evolution paths of the superficial brines in the Llamara Salar (Chile)."		
Año : 1999	Referencia: <u>Revista Geologica de Chile</u>	Número: 26(1): 89-108.
Región ☒ I Región ☐ II Región ☐ III Región ☐ Otras		
Enfoque ☒ Agua Superficial ☐ Agua Subterránea ☐ Precipitación ☒ Otros		
Información Química ☐ Elementos mayoritarios ☐ Elementos minoritarios ☒ Parámetros físico-químicos		Información Isotópica ☐ D y ^{18}O ☐ Otros isótopos ligeros ☐ Isótopos pesados o radiactivos
Descripción En este documento se estudia la evolución hidroquímica de las salmueras superficiales del Salar de Llamara comprobando un estado de continua saturación de las salmueras respecto a calcita y yeso, además se identifico un proceso de precipitación de la glauberita a partir del análisis mineralógico de muestras sólidas salinas y del tratamiento físico química de las soluciones.		

Autor : Michalski, G., Bohlke, J. K.		ID : IR-05
Título : "Long term atmospheric deposition as the source of nitrate and other salts in the Atacama Desert, Chile: New evidence from mass-independent oxygen isotopic compositions."		
Año : 2004	Referencia: <u>Geochimica et Cosmochimica</u> ,	Número: 68(20): 4023-4038
Región ☒ I Región ☒ II Región ☐ III Región ☐ Otras		
Enfoque ☐ Agua Superficial ☐ Agua Subterránea ☐ Precipitación ☒ Otros		
Información Química ☒ Elementos mayoritarios ☐ Elementos minoritarios ☐ Parámetros físico-químicos		Información Isotópica ☒ D y ^{18}O ☒ Otros isótopos ligeros ☐ Isótopos pesados o radiactivos
Descripción El documento relata el empleo de medidas de isotópicas de oxígeno, expresamente valores de ^{17}O, como un instrumento para investigar la influencia de deposición atmosférica (húmeda y seca) como una fuente de las sales en la región de Desierto de Atacama. Además, proporciona análisis cuantitativos de la química atmosférica y la dinámica de deposición en la acumulación de sulfato y el nitrato. Además se emplean en este estudio los isótopos estables ^{16}O, ^{17}O y ^{18}O que tienen implicaciones muy importantes para el paleoclima y estudios del ciclo del nitrógeno.		

Autor : Montgomery, E. L. and Rosko,M. J.		ID : IR-06
Título : "Groundwater exploration and wellfield development in the Pampa Lagunillas and Pampa Lirima areas, Provincia de Iquique, Chile."		
Año : 1996	Referencia: <u>Revista Geológica de Chile</u>	Número: 23(2): 135-149
Región ☒ I Región ☐ II Región ☐ III Región ☐ Otras		
Enfoque ☐ Agua Superficial ☒ Agua Subterránea ☐ Precipitación ☐ Otros		
Información Química ☒ Elementos mayoritarios ☒ Elementos minoritarios ☒ Parámetros físico-químicos		Información Isotópica ☐ D y ^{18}O ☐ Otros isótopos ligeros ☐ Isótopos pesados o radiactivos
Descripción En esta investigación se llevo a cabo un programa de sondajes de exploración de aguas subterráneas en las cuencas de Pampa Lagunillas y Pampa Lirima, en el prealtiplano del norte de Chile. El objetivo del programa fue desarrollar un campo de pozos de extracción capaz de producir 120 litros por segundo de agua subterránea de buena calidad para uso industrial en el complejo minero Cerro Colorado por una duración estimada de 30 años . En Pampa Lagunillas en desarrollo consistió en la construcción y prueba de 4 pozos de alta productividad. Los resultados del programa de exploración y desarrollo revelaron la presencia de grandes cantidades de agua subterránea recuperable, almacenada en los acuíferos de cada cuenca. Las condiciones mas favorables para el desarrollo de un sistema de abastecimiento confiable ocurren en esta cuenca, donde la acumulación de agua subterránea en sedimentos aluviales saturados es del orden de 450 millones de metros cúbicos.		

Autor : Montgomery, E. L., Rosko, M. J.		ID : IR-07
Título : "Interbasin underflow between closed Altiplano Basins in Chile."		
Año : 2003	Referencia: <u>Ground Water</u>	Número: 41(4): 523-531
Región ☒ I Región ☐ II Región ☐ III Región ☐ Otras		
Enfoque ☐ Agua Superficial ☐ Agua Subterránea ☐ Precipitación ☒ Otros		
Información Química ☐ Elementos mayoritarios ☐ Elementos minoritarios ☐ Parámetros físico-químicos		Información Isotópica ☐ D y ¹⁸ O ☐ Otros isótopos ligeros ☐ Isótopos pesados o radiactivos
Descripción .Modelo conceptual, T, recarga y P de Bombeo		

Autor : Quade, J., Rech, J. A.		ID : IIR-08
Título : "Soils at the hyperarid margin: The isotopic composition of soil carbonate from the Atacama Desert, Northern Chile."		
Año : 2007	Referencia: <u>Geochimica et Cosmochimica</u>	Número: 71(15): 3772
Región ☐ I Región ☒ II Región ☐ III Región ☐ Otras		
Enfoque ☐ Agua Superficial ☐ Agua Subterránea ☒ Precipitación ☐ Otros		
Información Química ☐ Elementos mayoritarios ☐ Elementos minoritarios ☐ Parámetros físico-químicos		Información Isotópica ☒ D y ¹⁸ O ☒ Otros isótopos ligeros ☐ Isótopos pesados o radiactivos
Descripción (Muestreo de evaporitas) En este estudio se presentan resultados isotópicos del carbonato de suelo y la materia orgánica en el Desierto de Atacama enfocado a entender la contribución relativa que factores como las de respiración de suelo con CO ₂ atmosférico hacen a la composición isotópica de carbonato de suelo en el Atacama,. Para explorar estos y otras relaciones en el Desierto de Atacama, se inspeccionaron plantas y se recolectaron muestras de suelos a lo largo de tres cortes transversales. Estos incluyen el corte transversal Paposo, el Paso de Jama/Calama, y Socompa.		

Autor : Rech, J., Quade, J. and Hart, W.		ID : IIR-09
Título : Isotopic evidence for the source of Ca and S in soil gypsum, anhydrite and calcite in the Atacama Desert, Chile"		
Año : 2003	Referencia: <u>Geochimica et Cosmochimica</u>	Número: 67(4):575-586
Región ☐ I Región ☒ II Región ☐ III Región ☐ Otras		
Enfoque ☒ Agua Superficial ☐ Agua Subterránea ☐ Precipitación ☐ Otros		
Información Química ☐ Elementos mayoritarios ☐ Elementos minoritarios ☐ Parámetros físico-químicos		Información Isotópica ☐ D y ^{18}O ☒ Otros isótopos ligeros ☐ Isótopos pesados o radiactivos
Descripción En este estudio usamos los isótopos estables de S y Sr para identificar el origen de S y Ca en el suelos cálcicos/anhydrita y la Ca en suelos carbonatados a lo largo de tres cortes transversales en el Atacama. Nuestros objetivos son determinar la contribución relativa de aerosoles marítimos en suelos. Los objetivos de estudio son identificar los valores de S y Sr para determinar la importancia del desgaste de suelos Andinos; evaluar la importancia de evaporitas como fuente para sales de suelo; y finalmente obtener un entendimiento de la distribución espacial de los depósitos de nitrato de mayor calidad.		

Autor : Risacher, F. and Alonso, H		ID : IIR-10
Título : "Geoquímica del Salar de Atacama, parte1:origen de los componente y balance salino."		
Año : 1996	Referencia: Universidad Católica del Norte (UCN) y Institut de Recherche pour le Développement (ex ORSTOM)	Número: 113-122
Región ☐ I Región ☒ II Región ☐ III Región ☐ Otras		
Enfoque ☒ Agua Superficial ☐ Agua Subterránea ☐ Precipitación ☐ Otros		
Información Química ☒ Elementos mayoritarios ☒ Elementos minoritarios ☒ Parámetros físico-químicos		Información Isotópica ☐ D y ^{18}O ☐ Otros isótopos ligeros ☐ Isótopos pesados o radiactivos
Descripción En este estudio se describe en una primera etapa la cuenca de sedimentación del Salar de Atacama en el norte de Chile, donde se presenta su geología, clima e hidrología. Luego se explica el origen de los componentes disueltos en las aguas de aporte para lo cual se presenta el análisis de diversas muestras, las que afirman que las aguas de aporte tienen un doble origen. La alteración de rocas volcánicas provee sobre todo K, Li, Mg, B y en menor proporción Na y Ca; y la redisolución de evaporitas antiguas que se encuentran por debajo de las formaciones, aportan un suplemento importante de Na, Cl, Ca y SO₄ en las aguas más salinas. Además se realizó un balance salino de la parte superior del núcleo del salar que indicó que éste no provenía de aguas de composición semejante a la de los aportes actuales, sino de antiguos aportes provenientes de lixiviación de la Cordillera de la Sal. Por otra parte, se estimó la velocidad de sedimentación de la halita en el núcleo, lo que arrojó que ésta se abría depositada a partir de aportes similares a los actuales, discrepando con el balance salino. Finalmente se concluyó que el salar tuvo un periodo intermitente con largos periodos secos y cortos periodos húmedos, durante los cuales se depositaron grandes cantidades de sales. Además se determinó que el núcleo no proviene de un antiguo lago salado sino de aportes salinos subterráneos.		

Autor : Risacher, F. and Alonso , H.		ID : IIR-11
Título : "Geoquímica del salar de Atacama, parte 2:evolución de las aguas"		
Año : 1996	Referencia: Universidad Católica del Norte (UCN) y Institut de Recherche pour le Développement (ex ORSTOM)	Número: 123-134
Región ☐ I Región ☒ II Región ☐ III Región ☐ Otras		
Enfoque ☐ Agua Superficial ☐ Agua Subterránea ☐ Precipitación ☒ Otros		
Información Química ☐ Elementos mayoritarios ☐ Elementos minoritarios ☐ Parámetros físico-químicos		Información Isotópica ☐ D y ¹⁸ O ☐ Otros isótopos ligeros ☐ Isótopos pesados o radiactivos
Descripción En este estudio se expone un modelo conceptual de evolución de sales de las aguas en el Salar de Atacama, aplicando el modelo de evolución de la composición química de aguas por evaporación, se describe el efecto de la precipitación de la calcita, de los silicatos de magnesio, de la oxidación de azufre, de la redisolución de yeso y de la precipitación de la halita en el Salar de Atacama con lo cual se determina entre otras cosas que las salmueras no son salmueras residuales de un antiguo lago salado que habría ocupado la cuenca sino que se formaron por evaporación a través de la costra de sal..		

Autor : Risacher, F., Alonso ,H.		ID : IIIR-02
Título : "Hydrochemistry of two adjacent acid saline lakes in the Andes of northern Chile."		
Año : 2002	Referencia: <u>Chemical Geology</u>	Número: 187(1-2): 39-57.
Región ☐ I Región ☐ II Región ☒ III Región ☐ Otras		
Enfoque ☒ Agua Superficial ☐ Agua Subterránea ☐ Precipitación ☐ Otros		
Información Química ☒ Elementos mayoritarios ☒ Elementos minoritarios ☒ Parámetros físico-químicos		Información Isotópica ☐ D y ¹⁸ O ☐ Otros isótopos ligeros ☐ Isótopos pesados o radiactivos
Descripción Numerosos cuencas en los Andes centrales contienen lagos de salinos y costras de sal. Casi todos ellos son lagos neutros o alcalinos. Sólo dos lagos de 84 estudiados en Bolivia y Chile son lagos ácidos. Ellos están localizados en dos cuencas adyacentes intravolcánicas en el norte de Chile, el salar de Gorbea y salar Ignorado El origen de acidez es debido a la yuxtaposición de dos factores: alteración misma fuerte hidrotermal de rocas volcánicas en las cuencas de drenaje y el alto contenido de azufre en toda el área Este estudio se enfoca a explicar detalladamente este origen de modelar el proceso de acidificación.		

Autor : Risacher, F., Alonso, H		ID : TR-02
Título : The origin of brines and salts in Chilean salars: a hydrochemical review."		
Año : 2003	Referencia: <u>Earth-Science Reviews</u>	Número: 63(3-4): 249-293
Región ☒ I Región ☒ II Región ☒ III Región ☐ Otras		
Enfoque ☒ Agua Superficial ☐ Agua Subterránea ☐ Precipitación ☐ Otros		
Información Química ☐ Elementos mayoritarios ☐ Elementos minoritarios ☒ Parámetros físico-químicos		Información Isotópica ☐ D y ¹⁸ O ☐ Otros isótopos ligeros ☐ Isótopos pesados o radiactivos
Descripción En este estudio se presenta una revisión hidroquímica de casi todos los salares del norte de Chile (un total de 52 lagos salados y costras de sal distribuidos en la Cordillera de los Andes). No se presenta un estudio detallado de la geología y sedimentología para cada salar, pero si se realiza una revisión en su conjunto de las características hidroquímicas que pone énfasis en el origen y evolución de los salares y salmueras a partir de muestras en lagos y salares donde se determinó que por una parte los aportes de sales provenían desde el mar y el polvo del desierto y por otra parte de la infiltración de antiguos salares.		

Autor : Risacher, F., Alonso H., Salazar , C.		ID : TR-03
Título : "Geoquímica de aguas en cuencas cerradas I, II, III regiones, Chile."		
Año : 1999	Referencia : Convenio cooperación Dirección General de Aguas (DGA), Universidad Católica del Norte (UCN) y Institut de Recherche pour le Développement (ex ORSTOM), 1, 2,3	Número :
Región ☒ I Región ☒ II Región ☒ III Región ☐ Otras		
Enfoque ☒ Agua Superficial ☒ Agua Subterránea ☐ Precipitación ☐ Otros		
Información Química ☒ Elementos mayoritarios ☒ Elementos minoritarios ☒ Parámetros físico-químicos		Información Isotópica ☒ D y ^{18}O ☐ Otros isótopos ligeros ☐ Isótopos pesados o radiactivos
Descripción Este trabajo consiste en el estudio de la geoquímica de las aguas en las cuencas endorreicas de la I, II y III región, abarcando 53 lagos saldos y salares de la Cordillera de los Andes, en los cuales se estudia: la calidad de las aguas de aporte, el balance hídrico de las lagunas, la hidroquímica de las algunas saladas, el origen de las sales y los factores que controlan la hidroquímica del salar. Para lo anterior el estudio considera 23 campañas de terreno a las diferentes regiones donde se tomaron muestras para analizar "in situ" y en laboratorio, generando una base de información muy completa de la zona.		

Autor : Spiro, B., Chong, G.		ID : IIR-12
Título : " Origin of sulfate in the Salar de Atacama and the Cordillera de la Sal, initial results of an isotopic study".		
Año : 1996	Referencia : <u>3rd International Symposium on Andean Geodynamics (ISAG), Saint Malo</u>	Número : 703-707
Región ☐ I Región ☒ II Región ☐ III Región ☐ Otras		
Enfoque ☒ Agua Superficial ☐ Agua Subterránea ☐ Precipitación ☐ Otros		
Información Química ☐ Elementos mayoritarios ☐ Elementos minoritarios ☐ Parámetros físico-químicos		Información Isotópica ☒ D y ^{18}O ☒ Otros isótopos ligeros ☐ Isótopos pesados o radiactivos
Descripción El presente estudio de reconocimiento emplea la composición isotópica del azufre y del estroncio como trazadores para determinar el origen del sulfato en las aguas que alimentan al Salar de Atacama, las formaciones de depósitos evaporíticos actuales y aquellos ubicados en la Cordillera de la Sal. Las muestras de agua fueron recogidas a partir de manantiales y pozos al norte del Salar de Atacama y dentro del salar mismo, en la zona asociada a evaporitas. La variación en la química del agua prueba la complejidad del sistema hidrológico. Varias muestras de evaporitas también fueron recogidas a lo largo de un corte transversal de la Formación Pedro San Pedro en la Cordillera de la Sal.		

Autor : Venegas, M. and Iriarte, S.		ID : IIIR-03
Título : "Aplicación de una metodología hidroquímica para el análisis de los aportes y descarga de los acuíferos en la cuenca de Ciénaga Redonda, Altiplano de Copiapó, III Región"		
Año : 2000	Referencia : <u>Congreso Geológico Chileno, 9º, Puerto Varas</u>	Número : 1:133-137
Región ☐ I Región. ☐ II Región ☒ III Región ☐ Otras		
Enfoque ☒ Agua Superficial ☒ Agua Subterránea ☐ Precipitación ☐ Otros		
Información Química ☒ Elementos mayoritarios ☐ Elementos minoritarios ☒ Parámetros físico-químicos		Información Isotópica ☐ D y ¹⁸ O ☐ Otros isótopos ligeros ☐ Isótopos pesados o radiactivos
Descripción En este trabajo se propone el uso de parámetros hidroquímicos de fácil y barata obtención, para realizar una determinación cualitativa de los aportes y descargas de aguas en la cuenca de Ciénaga Redonda, ubicada en el Altiplano de Copiapó cuyo acuífero es explotado para alimentar actividades mineras. La caracterización de los acuíferos y aguas superficiales se efectúa tradicionalmente utilizando parámetros como pH, T, CE, STD, contenido total de elementos mayores y menores, etc. Con el método propuesto en este trabajo solo se utilizan la CE y los contenidos de Na⁺ y Cl⁻ de las aguas.		

ANEXO II

“Base de datos con análisis químicos e isotópicos de
agua”

ANEXO II BASE DE DATOS CON ANÁLISIS QUÍMICOS E ISOTÓPICOS DE AGUA