



GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS

**SISTEMATIZACIÓN, ESPACIALIZACIÓN Y ANÁLISIS
DE DATOS ISOTÓPICOS EN MUESTRAS DE AGUA DEL
NORTE DE CHILE**

DIRECCION GENERAL DE AGUAS
Centro de Información Recursos Hídricos
Área de Documentación

REALIZADO POR:

DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS Y PLANIFICACIÓN

S.D.T. N°221

JUNIO DE 2005

PREFACIO

El presente trabajo corresponde al Proyecto de Práctica Profesional presentado al Instituto de Geografía de la Pontificia Universidad Católica de Chile como uno de los requisitos para optar al título profesional de Geógrafo de la Srta. Sylvia Hernández Aquez.

El trabajo se basó principalmente en información aportada por el Departamento de Estudios y Planificación de la DGA, y con el apoyo de profesionales del mismo Departamento.

DIRECCION GENERAL DE AGUAS
Centro de Información Recursos Hídricos
Área de Documentación

INDICE

1.	Introducción.....	5
1.2.	Objetivos.....	6
2.	Metodología.....	7
2.1.	Información recopilada.....	7
2.2.	Sistematización de la información.....	7
2.3.	Procesamiento de datos.....	10
2.4.	Caracterización isotópica.....	11
2.5.	Caracterización Química.....	11
3.	Principios básicos en la utilización de isótopos ambientales.....	12
3.1.	Principios Básicos en hidronímica.....	15
4.	Antecedentes generales del área de estudio.....	16
5.	Caracterización Isotópica.....	20
5.1.	Primera Región de Tarapacá.....	20
5.1.1.	Precipitaciones.....	20
5.1.2.	Aguas superficiales.....	25
5.1.3.	Aguas subterráneas.....	29
5.2.	Segunda Región de Antofagasta.....	32
5.2.1.	Precipitaciones y nieve.....	32
5.2.2.	Aguas superficiales.....	37
5.2.3.	Aguas subterráneas.....	42
5.3.	Tercera Región de Atacama.....	45
5.3.1.	Aguas superficiales.....	46
5.3.2.	Aguas subterráneas.....	54
5.4.	Cuarta Región de Coquimbo.....	56
5.4.1.	Aguas superficiales y subterráneas.....	57
6.	Caracterización química.....	63
6.1.	Primera Región de Tarapacá.....	63
6.1.1.	Aguas superficiales.....	63
6.1.2.	Aguas subterráneas.....	64
6.2.	Segunda Región de Antofagasta.....	71
6.2.1.	Aguas superficiales.....	71
6.2.2.	Aguas subterráneas.....	72
6.3.	Tercera Región de Atacama.....	79
6.3.1.	Aguas superficiales.....	79
6.3.2.	Aguas subterráneas.....	80
6.4.	Cuarta Región de Coquimbo.....	86
7.	Conclusiones.....	91
8.	Bibliografía.....	94

Tablas

Tabla N° 1.	Tipo Químico. Aguas superficiales. I Región.....	63
Tabla N° 2.	Tipo Químico Pozos. I Región.....	64
Tabla N° 3.	Tipo Químico. Aguas superficiales. II Región.....	71
Tabla N° 4.	Tipo Químico Pozos. II Región.....	79

Tabla N° 5. Tipo Químico. Aguas superficiales. III Región.....	79
Tabla N° 6. Tipo Químico Pozos. III Región	80
Tabla N° 7. Tipo Químico Pozos. IV Región	88
Tabla N° 8. Resumen tipo Químico. Regiones.....	92
Figuras	
Figura N° 1. Base de datos.....	7
Figura N° 2. Base de datos.....	8
Figura N° 3. Parámetros químicos e isotópicos.....	9
Figura N° 4. Parámetros químicos e isotópicos.....	9
Figura N° 5. Límites determinación tipos químicos.....	12
Figura N° 6. Tipos químicos aguas superficiales I Región.....	64
Figura N° 7. Tipos químicos aguas subterráneas I Región.....	65
Figura N° 8. Tipos químicos aguas superficiales II Región.....	72
Figura N° 9. Tipos químicos aguas subterráneas II Región.....	73
Figura N° 10. Tipos químicos aguas superficiales III Región.....	80
Figura N° 11. Tipos químicos aguas subterráneas III Región.....	81
Figura N° 12. Tipos químicos aguas subterráneas IV Región.....	88
Gráficos	
Gráfico N° 1. Recta Meteórica. I Región	21
Gráfico N° 2. Variación oxígeno-18. Muestras de lluvia. I Región.....	21
Gráfico N° 3. Contenido isotópico. Aguas superficiales. I Región	25
Gráfico N° 4. Variación contenido oxígeno-18. Aguas superficiales. I Región.....	26
Gráfico N° 5. Contenido isotópico. Aguas subterráneas. I Región.....	29
Gráfico N° 6. Variación contenido oxígeno-18. Aguas subterráneas. I Región	30
.....	33
Gráfico N° 7. Recta Meteórica. II Región.....	33
Gráfico N° 8. Contenido oxígeno-18. Muestras de lluvia. II	38
Región.....	39
Gráfico N° 9. Contenido isotópico. Aguas superficiales. II Región.....	43
Gráfico N° 10. Variación contenido oxígeno-18. Aguas superficiales. II Región.....	43
Gráfico N° 11. Contenido isotópico. Aguas subterráneas. II Región.....	46
Gráfico N° 12. Variación contenido oxígeno-18. Aguas subterráneas. II Región.....	50
Gráfico N° 13. Contenido isotópico. Aguas superficiales. III Región.....	54
Gráfico N° 14. Variación contenido oxígeno-18. Aguas superficiales. III	55
Región.....	57
Gráfico N° 15. Contenido isotópico. Aguas subterráneas. III Región.....	61
Gráfico N° 16. Variación contenido oxígeno-18. Aguas subterráneas. III Región.....	66
Gráfico N° 17. Contenido isotópico. Aguas superficiales y subterráneas. IV Región.....	74
Gráfico N° 18. Variación contenido oxígeno. Aguas superficiales y subterráneas. IV Región	81
Gráfico N° 19. Salinidades aguas superficiales y subterráneas. I Región.....	
Gráfico N° 20. Salinidades aguas superficiales y subterráneas. II Región.....	
Gráfico N° 21. Salinidades aguas superficiales y subterráneas. III Región.....	

Mapas	22
Mapa N° 1. Distribución muestras con datos isotópicos. I Región.....	24
Mapa N° 2. Distribución contenido oxígeno-18 en precipitaciones. I Región.....	27
Mapa N° 3. Distribución contenido oxígeno-18 en vertientes y manantiales. I Región.....	28
Mapa N° 4. Distribución contenido oxígeno-18 en ríos. I Región.....	31
Mapa N° 5. Distribución contenido oxígeno-18 en pozos. I Región.....	35
Mapa N° 6. Distribución muestras con datos isotópicos. II Región.....	36
Mapa N° 7. Distribución contenido oxígeno-18 en precipitaciones. II Región.....	40
Mapa N° 8. Distribución contenido oxígeno-18 en ríos. II Región.....	41
Mapa N° 9. Distribución contenido oxígeno-18 en vertientes y manantiales. II Región.....	45
Mapa N° 10. Distribución contenido oxígeno-18 en pozos. II Región.....	49
Mapa N° 11. Distribución muestras con datos isotópicos. III Región.....	52
Mapa N° 12. Distribución contenido oxígeno-18 en manantiales. III Región.....	53
Mapa N° 13. Distribución contenido oxígeno-18 en ríos. III Región.....	56
Mapa N° 14. Distribución contenido oxígeno-18 en pozos. III Región.....	59
Mapa N° 15. Distribución muestras con datos isotópicos. IV Región.....	62
Mapa N° 16. Distribución contenido oxígeno-18 en pozos y vertientes. IV Región.....	67
Mapa N° 17. Distribución tipo químico y STD. Vertientes. I Región.....	69
Mapa N° 18. Distribución tipo químico y STD. Ríos. I Región.....	70
Mapa N° 19. Distribución tipo químico y STD. Pozos. I Región.....	75
Mapa N° 20. Distribución tipo químico y STD. Vertientes. II Región.....	77
Mapa N° 21. Distribución tipo químico y STD. Pozos. II Región.....	78
Mapa N° 22. Distribución tipo químico y STD. Ríos. II Región.....	84
Mapa N° 23. Distribución tipo químico y STD. Pozos. III Región.....	85
Mapa N° 24. Distribución tipo químico y STD. Ríos. III Región.....	87
Mapa N° 25. Distribución tipo químico y STD. Vertientes. III Región.....	87
Mapa N° 26. Distribución tipo químico y STD. Pozos. IV Región.....	90

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un elemento de primordial importancia para el hombre y la civilización. Aunque originalmente abundante en comparación a la demanda, el crecimiento cada vez más acelerado de la población y de sus necesidades de alimentación y bebida lo han convertido en recurso escaso en muchas regiones del mundo.

En el caso de Chile, los recursos hídricos juegan un papel fundamental en el desarrollo de las ciudades y en las actividades industriales, mineras y agrícolas especialmente en la zona árida del norte de Chile. Las aguas subterráneas son el componente principal de los recursos hídricos en esta región. Por ello el uso racional de las aguas subterráneas requiere de gran evaluación de manera que la extracción no comprometa el recurso a largo plazo.

Y es debido a esta escasez que han surgido estudios de diversos tipos tales como su ocurrencia, abundancia, oportunidad, fuentes y calidad con el fin de racionalizar su uso.

Entre las técnicas que se han desarrollado para lograr un mejor conocimiento del recurso hídrico se encuentra la interpretación del contenido de isótopos ambientales radioactivos y estables presentes en el agua. El contenido de isótopos en el agua permite tener información acerca de la renovación de las aguas en los acuíferos (recarga), identificación de aguas antiguas (origen y edad del agua), interconexiones hidráulicas entre varios acuíferos, mezcla de aguas de origen diferente, interacciones rocas-CO₂, hidrodinámica de los acuíferos (flujos y edad), disolución de evaporitas, intrusión de aguas marinas en acuíferos costeros, vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación (origen y circulación de los contaminantes), identificación de las aguas termo-minerales entre otros análisis. El presente trabajo pretende realizar una caracterización general de la hidrología del norte de Chile utilizando técnicas isotópicas e hidroquímicas y material de apoyo como geología, hidrología, topografía y otros.

Aplicadas con éxito en muchos estudios hidrológicos e hidrogeológicos, las técnicas isotópicas han relevado su utilidad como elemento de juicio independiente y complementario a los enfoques tradicionales.

El presente trabajo tiene como área de estudio la zona del norte de Chile, la cual comprende las regiones I, II, III y IV. El principal objetivo es caracterizar y analizar el contenido de oxígeno-18 y deuterio presente en esta zona.

1.2. OBJETIVOS

- Sistematizar la información isotópica y fisicoquímica de las regiones I, II, III y IV para la generación de una base de datos.
- Cartografiar la información recopilada.
- Caracterizar y Analizar los resultados relacionando la cartografía obtenida y el tipo de cuenca en el que estén insertos los puntos tomados.

2. METODOLOGIA

Para la realización del presente trabajo se realizó en primer lugar una exhaustiva búsqueda bibliográfica en la que existiera información isotópica y fisicoquímica del agua de la zona Norte de Chile. En segundo lugar se sistematizó y procesó la información recopilada. En tercer lugar se cartografió la información recopilada para luego realizar una caracterización y análisis del área de estudio.

2.1. Recopilación de información

En esta etapa del trabajo se revisó información de variados estudios realizados tanto por la Dirección General de Aguas como por otros organismos como: SERNAGEOMIN, Compañías Mineras, Universidades, consultoras y otras. La información recolectada apuntó a parámetros fisicoquímicos del agua los cuales incluyen:

Parámetros químicos:

Aniones principales: Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-}

Cationes principales: K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+

Otros: Sr^{++} , Zn^{++} , Zr^{++} , I^- , Fe^{+++} , Mn^{++} , Li^+

Parámetros físicos: Conductividad eléctrica, PH, temperatura

También se recolectó información para identificar las muestras (Coordenadas geográficas, hora, fecha, tipo de muestra) y la fuente bibliográfica.

2.2. Sistematización de la información

En primer lugar se almacenó la información en fichas enumeradas para posteriormente ser ingresados en la base de datos. Se generaron 58 fichas en total. Una vez organizados los datos se procedió a realizar la base de datos y a ingresar los datos. La base de datos consta de tres partes: Identificación de la muestra, Ubicación de la muestra, y finalmente los datos Químicos e isotópicos. Ver Figuras N° 1, 2, 3 y 4

Figura N°1. Base de datos

The image shows a screenshot of a database application interface. It consists of two overlapping windows. The background window is titled "BASE DE DATOS DGA" and contains a form for "IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA". The foreground window is titled "FICHAS" and contains a form for entering sample details.

IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA	
Id	159 Fuente información DGA, Depto. de Estudios, F
Código	LOA-III
Punto Muestreo	Salar de Talabre
Localidad o ciudad	II Región Antofagasta
Tipo de muestra:	Río
Fecha	01-nov-00
Hora	

FICHAS	
Id	
Ubicación	DGA, Depto. de Estudios, F-N°1
Nombre	Evaluación hidrogeologica acuífero sector norte salar de Atacama Informe final
Realizado	GP Consultores
Año	1999

Como se aprecia en la figura N° 1 en la IDENTIFICACIÓN DE LA MUESTRA se indica el código de la muestra, Punto de muestreo, la ciudad y Región, tipo de muestra (Vertiente, Pozo, Río, Quebrada, Nieve, Lluvia, Canal, Lago, Estero, Salar y Manantial), fecha, hora, cuenca y fuente de información en la que se identifica el número de ficha. La ficha se encuentra almacenada en un formulario anexo, ésta indica la ubicación en la que se encontraba el estudio, el nombre, autor y año.

Figura N° 2. Base de datos

COORDENADAS			
UTM_N_m	<input type="text" value="7465100"/>	Latitud	<input type="text"/>
UTM_E_m	<input type="text" value="585650"/>	Longitud	<input type="text"/>
		Coordenada original:	<input type="checkbox" value="Sí"/>
		Coordenada trabajada:	<input type="checkbox"/>
PARAMETROS FISICOS EN TERRENO			
Temperatura	<input type="text"/>		
pH	<input type="text"/>		
Conductividad	<input type="text"/>		
PARAMETROS FISICOS			
pH	<input type="text" value="8.1"/>		
Cond	<input type="text"/>		
Temp:	<input type="text"/>		

En la figura N° 2 se aprecia la ubicación de las muestras, las cuales están expresadas en coordenadas UTM o en coordenadas geográficas. El campo coordenada original especifica cuando el dato proviene directamente de la fuente o si la localización se obtuvo indirectamente, a través de mapas o cartografía digital (Coordenada trabajada). También aparecen parámetros físicos correspondientes a muestras de terreno y parámetros físicos correspondientes a laboratorio.

Figura N° 3 Parámetros químicos e isotópicos

PARAMETROS QUÍMICOS E ISOTÓPICOS

OD:	<input type="text"/>	Al_mmol/kg:	<input type="text"/>	Mg_meq:	3.703703704
pH:	9.1	As_mmol/kg:	<input type="text"/>	Na_meq:	22.60869565
Cond:	<input type="text"/>	B_mmol/kg:	<input type="text"/>	Cl_meq:	26.47887324
Temp:	<input type="text"/>	Ba_mmol/kg:	<input type="text"/>	SO4_meq:	5.416666667
Mg_mgt:	45	Ca_mmol/kg:	<input type="text"/>	HCO3_meq:	4.327868852
Na_mgt:	520	Cl_mmol/kg:	<input type="text"/>	CO3_meq:	<input type="text"/>
Cl_mgt:	940	CO3_mmol/kg:	<input type="text"/>	CO2_meq:	<input type="text"/>
SO4_mgt:	260	Ca_mmol/kg:	<input type="text"/>	OH_meq:	<input type="text"/>
HCO3_mgt:	264	Cd_mmol/kg:	<input type="text"/>	Ca_meq:	7.431421446
CO3_mgt:	<input type="text"/>	Ci_mmol/kg:	<input type="text"/>	K_meq:	1.432225064
CO2_mgt:	<input type="text"/>	Cu_mmol/kg:	<input type="text"/>	As_meq:	<input type="text"/>
OH_mgt:	<input type="text"/>	Fe_mmol/kg:	<input type="text"/>	B_meq:	<input type="text"/>
Ca_mgt:	149	F_mmol/kg:	<input type="text"/>	Si_meq:	<input type="text"/>
K_mgt:	56	Hg_mmol/kg:	<input type="text"/>	I_meq:	<input type="text"/>
As_mgt:	0.37	NCO3_mmol/kg:	<input type="text"/>	NO3_meq:	0.025806452
B_mgt:	<input type="text"/> 21	L_mmol/kg:	<input type="text"/>	Li_meq:	<input type="text"/>
Si_mgt:	<input type="text"/>	K_mmol/kg:	<input type="text"/>	Al_meq:	<input type="text"/>
		Li_mmol/kg:	<input type="text"/>	Os_meq:	<input type="text"/>
		Mg_mmol/kg:	<input type="text"/>		
		Mo_mmol/kg:	<input type="text"/>		

Fuente: Sylvia Hernández A., 2004

En la figura N° 3 se pueden apreciar las columnas que contienen los datos químicos, se diseñaron tres columnas donde cada una se encuentra en unidades de medición distinta:

- mg/l: miligramos por litro
- mmol/kg: milimoles por kilogramo
- meq/l: miliequivalentes por litro

cuya finalidad es agilizar el ingreso de datos y la posterior estandarización para su comparación.

Figura N°4. Parámetros químicos e isotópicos

STD_mgt:	2210	Sr_mmol/kg:	<input type="text"/>
		Zn_mmol/kg:	<input type="text"/>
ISOTOPOS			
d2H_‰ (SMOW)	<input type="text"/>		
d18O_‰ (SMOW)	<input type="text"/>		
d13C_‰ (SMOW)	<input type="text"/>		
d14C_‰ (SMOW)	<input type="text"/>		
3H_‰ (SMOW)	<input type="text"/>		
DATOS CALCULADOS			
Alcalinidad (meq)	4.327868852		

En la figura N° 4 se pueden observar los datos isotópicos los cuales se describen a continuación:

- d2H: $\delta^2\text{H}$ (‰ SMOW)
- d18O: $\delta^{18}\text{O}$ (‰ SMOW)
- d13C: $\delta^{13}\text{C}$ (‰ SMOW)
- d14C: $\delta^{14}\text{C}$ (‰ SMOW)
- 3H: $\delta^3\text{H}$ (‰ SMOW)

En los datos calculados, aparecen valores de alcalinidad y el error de balance los cuales fueron calculados directamente por la base de datos para cada una de las muestras. Estos datos serán utilizados posteriormente para la sistematización de la base de datos.

2.3. Procesamiento de datos

Para realizar una adecuada interpretación de los datos fisicoquímicos del agua se hizo necesario procesar la información obtenida. Los datos procesados fueron los siguientes:

a) Expresión de las concentraciones

Con el objeto de homogenizar la información química se transformaron las unidades de las concentraciones de los macrocationes (K^+ , Ca^{++} , Mg^{++} , Na^+) y macroaniones (Cl^- , SO_4 , HCO_3^- , CO_3^{--}) de miligramos/litro a miliequivalentes/litro, sólo en casos que se necesite. Para ello se aplicó el siguiente cálculo:

$$\text{CQ (meq/l)} = \frac{\text{CQ (mg/l)} * \text{C}}{\text{PA}}$$

Donde:

CQ = Componente Químico
C = Valencia del componente químico
PA = Peso atómico del componente

b) Alcalinidad (Alc)

Para determinar la alcalinidad se aplicó la siguiente fórmula :

$$\text{Alc (meq/l)} = (\text{HCO}_3 \text{ (mmol/l)}) + 2 * (\text{CO}_3 \text{ mmol/l})$$

Donde:

Alc = Alcalinidad

c) Condición de electroneutralidad

Las composición química de las aguas deben cumplir condiciones de electroneutralidad, es decir, la suma de aniones debe ser igual a la suma de cationes (expresados en meq/l).

Lógicamente siempre hay un cierto error que se calculó con la siguiente formula:

$$EB = \frac{\sum \text{aniones} - \text{cationes}}{\sum \text{aniones} + \text{cationes}} \times 100$$

Para efectos de este trabajo se utilizaron las muestras de calidad de agua con errores <10% .

d) Sólidos totales disueltos (STD)

Otro elemento importante para los análisis finales fue el cálculo de los sólidos totales disueltos para lo cual se aplicó la siguiente fórmula:

$$STD = \sum \text{Componentes químicos en mg/l}$$

Esta formula se le aplicó a las muestras que estaban incompletas y no poseían STD.

c) Representación de datos químicos

Para la representación de los datos químicos se realizaron mapas escala 1:250.000 en Arcview 3.2. El análisis de los datos de realizó a las 4 regiones en estudio. La cartografía base fue proporcionada por la Dirección General de Aguas, Departamento de Estudios y Planificación y el SERNAGEOMIN. Se utilizó como cartografía base, curvas de nivel 1:1.000.000 y el mapa hidrológico de Chile escala 1:1.000.000.

2.4. Caracterización isotópica

Para a la caracterización isotópica se compararon los pares de datos (Oxígeno-18 y Deuterio) con la recta meteórica mundial, cuya ecuación es (Orphanopoulos et al., 1982):

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

También se realizó una comparación de los datos con la recta meteórica local propuesta por Peña et al. (1985), siendo su ecuación (Orphanopoulos et al., 1982):

$$\delta D = 7.7 * \delta^{18}O + 9.7$$

2.5. Caracterización química del agua

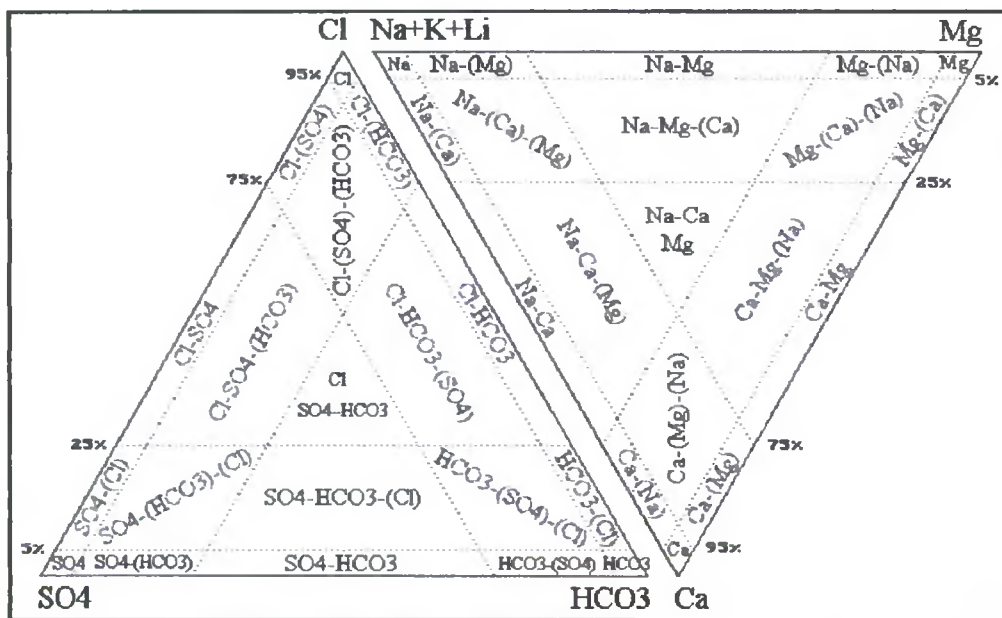
Para realizar la caracterización química se realizó en primer lugar una clasificación química del agua mediante el programa CLASSER (Risacher, 1999) el cual determina para cada muestra los iones predominantes estableciendo así el tipo químico del agua. Los iones considerados son los siguientes:

Cationes	Aniones
K^+ (mg/l)	Cl^- (mg/l)
Ca^{++} (mg/l)	SO_4^- (mg/l)
Mg^{++} (mg/l)	Alc (meq/l)
Na^+ (mg/l)	

Para representar los resultados se utilizaron los **Diagramas Triangulares**, los cuales se basan en la clasificación de Eugster y Hardie (1978) y los componentes considerados son los descritos en la tabla N°1. Al ubicar las muestras al interior del diagrama triangular es posible determinar el tipo químico de ésta a partir de límites preestablecidos (Figura N° 5):

- Cuando un catión o anión posee una concentración inferior al 5% de la suma de los cationes o aniones, no aparece en la formulación de la composición química.
- Cuando su concentración es superior a 5% e inferior a 25%, aparece entre paréntesis en la formulación.
- Cuando su concentración es mayor a 25%, aparece en la formulación sin paréntesis.

Figura N° 5. Límites para determinar tipos químicos



Fuente: CCHEN, 2000

3. PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA UTILIZACIÓN DE ISÓTOPOS AMBIENTALES

Los isótopos ambientales se han constituido durante las últimas décadas en una interesante y útil herramienta para abordar estudios hidrológicos e hidrogeológicos. Se trata de elementos que podrían calificarse como trazadores naturales, puesto que su distribución en el medio ambiente no es uniforme. Para una mejor comprensión de lo que es el uso de técnicas isotópicas en los estudios hidrológicos e hidrogeológicos se exponen una serie de conceptos.

Los **isótopos ambientales** más importantes para estudios hidrológicos son, sin duda, aquellos que forman parte de la molécula de agua, puesto que participan en todo el ciclo hidrológico. Los isótopos que cumplen con esta característica son el oxígeno-18 (O-18) y el deuterio (H-2). Su abundancia isotópica está íntimamente ligada a los procesos físico-químicos asociados al ciclo hidrológico y si bien las variaciones que se producen en su abundancia son muy pequeñas, hoy existen técnicas analíticas que permiten medirlas. De hecho no se mide su concentración directa sino que aquella relativa a un patrón denominado V-SMOW (Viena Standard Mean Ocean Water) y expresada en función de la razón de abundancia entre el isótopo menos abundante y el de mayor ocurrencia (Orphanopoulos et al., 1982)

$$\delta = \left(\frac{R_M - R_P}{R_P} \right) * 1000 \text{ ‰}$$

Donde:

R_M : es la razón isotópica de la muestra entre el nº de partículas pesadas/ nº de partículas ligeras

R_P : es la razón del patrón (V-SMOW)

En las condiciones de equilibrio termodinámico (de las precipitaciones), el contenido de O-18 y H-2 se relacionan de acuerdo a la ecuación llamada recta meteórica (Orphanopoulos et al., 1982):

$$\delta \text{ } ^2\text{H} = m * \delta \text{ } ^{18}\text{O} + d$$

Donde:

M : es la pendiente con valor 8

d : es el exceso de deuterio

El intercepto “d” responde a las condiciones de desequilibrio imperantes en el proceso de evaporación sobre el océano, y aunque varía dependiendo del lugar y de la época del año, presenta un valor promedio de +10 ‰. El hecho que el factor 8 se mantenga sensiblemente constante a nivel global, se debe a que la relación entre los factores de enriquecimiento ^2H y ^{18}O casi no depende de la temperatura, además de que la condensación, por ocurrir en estado de equilibrio, no introduce efectos cinéticos apreciables (Orphanopoulos et al., 1982).

Cuando el agua condensada es sometida a un nuevo proceso de evaporación, actúe éste durante su caída, sobre superficies abiertas o durante la escorrentía superficial y subsuperficial, el agua remanente presenta un enriquecimiento en isótopos pesados mayor para el ^{18}O que para el ^2H . El proceso no obedece a los respectivos factores de fraccionamiento debido al efecto cinético que produce las condiciones de desequilibrio. La composición isotópica de las aguas remanentes, en la relación $\delta \text{ } ^{18}\text{O}$ y $\delta \text{ } ^2\text{H}$, se desvía de la recta meteórica hacia el lado de mayores contenidos de ^{18}O , definiendo la llamada recta de evaporación. La pendiente de esta recta toma por lo tanto valores menores que 8,

generalmente entre 4 y 6, hecho que redundo además en un notorio descenso del parámetro d . El punto común de las rectas meteórica y de evaporación presenta la composición isotópica original de las aguas sometidas al proceso evaporativo (Orphanopoulos et al., 1982).

“El agua de las precipitaciones está en equilibrio, pero posteriormente, al incorporarse a la fase terrestre del ciclo hidrológico, puede sufrir lo que se denomina **fraccionamiento cinético** a causa de lo cual la relación $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ deja de obedecer la función antes señalada. El fraccionamiento se refiere a que cuando hay cambios de estado del agua (líquido \leftrightarrow vapor líquido \leftrightarrow vapor), las moléculas pesadas de agua quedan en el agua y las ligeras se evaporan. Así se modifica la razón isotópica de la fase líquida. De igual forma, si tenemos una fase gaseosa con una razón isotópica y se produce una condensación, se tienden a condensar las pesadas, quedando las ligeras; así hay cambio tanto de las razones isotópicas como de las δ ” (Orphanopoulos et al., 1982).

Entonces para interpretar datos de O-18 y H-2 se confeccionan gráficos $\delta^{18}\text{O}$ vs. $\delta^2\text{H}$ y se toma como referencia la recta meteórica, ya sea la teórica o la correspondiente al área específica de estudio. Posteriormente deben tenerse claro los siguientes principios básicos:

- Los contenidos de O-18 y de H-2 se mantienen constantes una vez que se infiltran en el agua subterránea, por lo que su valor en cualquier punto del acuífero es el reflejo de las condiciones isotópicas de la recarga.
- En un lugar determinado, aun cuando cada precipitación presenta abundancias isotópicas distintas, el promedio ponderado anual es prácticamente constante.
- Los fenómenos que con mayor importancia inciden en el fraccionamiento isotópico de las precipitaciones son: **efecto altura, continentalidad y el empobrecimiento de la masa gaseosa remanente** (“rain out”) pudiendo éste participar en los dos fenómenos anteriores.
- La evaporación del agua produce un fraccionamiento cinético, por lo cual las aguas evaporadas evolucionan siguiendo una recta que se aleja de la meteórica.

El proceso natural de condensación, por otro lado, suele desarrollarse en condiciones de equilibrio. Por lo que para él no reviste importancia el efecto cinético antes mencionado.

De todo lo anterior se desprende que la concentración de isótopos estables en las aguas está controlada básicamente por la cantidad de ciclos de evaporación y condensación a que se han visto sometidas luego de abandonar su fuente original, el océano. El agua del océano tiene una composición isotópica prácticamente constante, aunque no uniforme en todo el mundo (Orphanopoulos et al., 1982).

El vapor proveniente del océano se ve relativamente desprovisto de isótopos pesados con respecto al agua que lo generó. Este déficit de deuterio y oxígeno-18 se refleja posteriormente en las precipitaciones.

La condensación depende fuertemente de la temperatura y, en menor grado de la presión atmosférica. El efecto de la temperatura en la práctica se traduce en una correlación

negativa entre el contenido isotópico de la precipitación y las variables de latitud, altura, distancia al océano y cantidad de lluvia caída. Una masa de vapor que llega al continente, al internarse se ve sometida a condensaciones sucesivas que la van despojando de sus isótopos pesados. La fase líquida proveniente de tal masa de aire, aunque siempre más pesada que el vapor que la genera, resulta cada vez más ligera. La temperatura introduce también variaciones isotópicas estacionales en las precipitaciones observándose que las de verano son generalmente más pesadas (Sánchez San Ramón, 2002).

3.1 Principios básicos de hidroquímica

La hidroquímica al proveer información sobre la distribución de los elementos y su evolución espacial y temporal en los sistemas hídricos, ayuda a caracterizar los acuíferos y definir problemas ambientales y planes de remediación. El conocimiento de los procesos que ocurren en los ambientes acuáticos es fundamental para caracterizar y planear el manejo del recurso y en particular, para planear su aprovechamiento. Las técnicas isotópicas son parte de la hidroquímica y la combinación de los dos son indispensable para estudios hidrológicos.

Los parámetros físicos más importantes para interpretar el comportamiento de las aguas son la conductividad eléctrica, los sólidos totales disueltos y la temperatura.

Los elementos mayoritarios presentes en el agua superficial y subterránea son: calcio, magnesio, potasio, bicarbonatos, carbonatos, cloruros, sulfato, nitrato y sílice.

El contenido de iones disueltos en el agua varía en un amplio rango de concentraciones, aunque la mayor parte de las aguas tiene un origen común, que son las precipitaciones o el deshielo. El agua de lluvia suele presentar concentraciones bajas de sólidos disueltos, entre algunos mg/l en zonas continentales no industriales, a decenas de mg/l en regiones marítimas y costeras. Los iones presentes en la lluvia provienen de los compuestos que el vapor atrapa en el aire, antes y durante la precipitación. Esta agua además está en equilibrio con los gases atmosféricos, que son principalmente el oxígeno O₂, el cual proporciona al agua su capacidad oxidante, y el dióxido de carbono CO₂, que al combinarse con el agua, le confiere una moderada acidez (pH 5 a 6) (Orphanopoulos et al., 1982).

En estas condiciones el agua al precipitarse, altera su contenido de iones, y especialmente de gases, produciendo también ciertas variaciones en el suelo, en general, durante la percolación, el agua es despojada de gran parte de su oxígeno disuelto, a través de la respiración radicular y procesos de descomposición de la materia orgánica, y simultáneamente enriquecida en CO₂, producto de tales reacciones. Como consecuencia de ello, la porción que infiltra hacia la napa va siendo sensiblemente acidificada, característica que la capacita para disolver minerales del acuífero. Se observa que el contenido de iones presentes en las aguas depende del grado de agresividad del agua frente a los minerales, y suele aumentar en función del trayecto recorrido, desde las áreas de recarga, del tiempo de permanencia y de la secuencia que el agua encuentra los diferentes minerales (Sánchez San Ramón, 2002).

El uso de elementos químicos como trazadores presenta la dificultad que es casi imposible conocer a fondo las condiciones en que se producen los procesos geoquímicos, y con ello, las reacciones que van modificando las composiciones tanto del agua como del suelo. Pese a esto, e incluso sin ahondar en tales procesos, el estudio de los iones disueltos puede proveer bastante información, aunque cualitativa, siempre tiene valor, pues contribuye en alguna medida a dilucidar el complejo problema de la caracterización hídrica.

Sólidos Totales disueltos (STD)

Los Totales Sólidos Disueltos (STD) miden el peso de todas las sustancias disueltas en el agua, sean o no volátiles. El STD va a depender del trayecto recorrido y del tipo de materiales que atraviesan las aguas en su recorrido.

4. ANTECEDENTES GENERALES DE LA ZONA

Clima

Por la diversidad de clima, de rasgos morfológicos y de características litológicas, el comportamiento del escurrimiento superficial de las aguas difiere a lo largo de los más de 4.000 km que ocupa Chile en la parte sudamericana.

De esta manera, en el norte del territorio, las precipitaciones se producen muy al oriente, en la zona de La Puna, por sobre los 4.000 m s.n.m. por efecto del régimen de lluvias del Atlántico, principalmente estivales, las cuales abastecen las quebradas y ríos transversales de la Región de Tarapacá y parte de la Región de Antofagasta.

Los ríos del norte semiárido tienen sus cabeceras en la Cordillera de Los Andes y se consideran por lo tanto "ríos andinos" con escurrimiento permanente, pero de gran variabilidad anual condición de todos los ríos que se desarrollan hasta el paralelo 32°35' S dependiendo de la ubicación de un área anticiclónica importante que se sitúa a la latitud de 30° S en el Océano Pacífico

La distribución de las lluvias sigue un patrón. En un transecto oeste-este las lluvias comienzan a partir de los 2000 m s.n.m. y se incrementan con la altura hacia el este. Las precipitaciones, además del factor altitudinal, están determinadas por un sistema tropical convectivo que produce lluvias estivales en el Altiplano, de corta duración, de poca extensión territorial y generalmente de baja intensidad (menos de 20 mm/día). Por esta razón la escorrentía superficial es reducida y por tanto también la erosión, lo que ha conducido a formas de relieve poco evolucionadas. Las variaciones anuales de precipitaciones son grandes, presentándose series de años muy secos. Los eventos pluviométricos anormalmente altos sobrepasan la capacidad de porteo de la poca desarrollada red de drenaje y producen grandes aluviones que han modelado significativamente la morfología.

La información meteorológica disponible es insuficiente, particularmente en la alta cordillera andina. La evaporación desde superficies de agua y desde suelos es muy alta, con valores entre 1500 a 2500 mm/año. La precipitación anual media cerca de los 4000 m de

altura, varía entre 200 a 300 mm, lo cual explica, al comparar con la evaporación, la alta aridez. Los años lluviosos pueden tener hasta tres veces la precipitación de un año seco. Las temperaturas máximas medias diarias oscilan entre 10 y 20 °C y las medias mínimas, unos pocos grados bajo 0°C (François Risacher et. Al, 1998).

Hidrografía

Pueden considerarse varios grupos de sistemas hidrográficos:

Cuencas cerradas: particularmente andinas y pre-andinas: cuyo nivel de base hidrológico es un salar o una laguna. La mayoría de las cuencas andinas estudiadas se ubican totalmente en territorio chileno, pero hay algunas que se desarrollan parcialmente en Bolivia (I Región); Argentina (II y III Regiones); entre Chile y estos dos países (río Zapaleri, II Región) y entre Perú, Bolivia y Chile (río Ushusuma). Entre las cuencas pre-andinas sobresalen el sistema del salar de Atacama con sus ríos y quebradas (San Pedro, Vilama, Honar, Camar, Socaire, Peine, Tilomonte) y salares de Imilac y Punta Negra.

Pampa del Tamarugal y las quebradas que allí drenan: Aroma, Huasquiña, Tarapacá, Quipisca, Tambillo, Chintaguay (incluye acuífero de Pica) y Chacarilla.

Cuencas abiertas con escorrentía permanente: En la I Región, son los ríos Lluta, San José, Codpa, Camarones y Tana, en la II Región el río Loa y en la III Región los ríos Copiapó y Huasco

Hidrológicamente las cuencas cerradas del primer grupo que han originado salares y lagunas, pueden considerarse como pozas de evaporación para las aguas superficiales y subterráneas que fluyen en la cuenca. Los acuíferos están constituidos principalmente por material aluvial y rocas fracturadas del basamento, como ignimbritas, andesitas, riolitas e intrusivos ígneos (François Risacher et. Al, 1998).

Morfología

Los rasgos morfológicos principales en el Norte de Chile están relacionados a los grandes bloques estructurales del volcanismo geológicamente reciente y además a la aridez. Los procesos erosivos han sido poco importantes en el modelado del actual paisaje. En efecto, la aridez se ha mantenido desde el Eoceno Superior (Mortimer, 1980), aunque debe suponerse períodos húmedos desde el Oligoceno al Mioceno Inferior los que han sido necesarios para producir algunas de las unidades sedimentarias conocidas. El levantamiento de la Cordillera de la Costa detuvo el drenaje hacia el océano Pacífico a partir del Oligoceno Inferior. Cabe hacer notar que el cese de la erosión a partir del Mioceno Medio ha influido positivamente en la preservación de los grandes yacimientos de minerales y de sales, los que en un ambiente húmedo habrían sufrido notable lixiviación (François Risacher et. Al, 1998).

En resumen, la morfología del Norte de Chile es el producto de eventos tectónicos, del volcanismo y su evolución oeste-este y de la aridez. A continuación se describe someramente los rasgos morfológicos principales.

En el contexto de Scheuber y Reutter (1992) la Cordillera Occidental corresponde al actual arco magmático producido a partir del Mioceno Inferior y la Cordillera de la Costa y Valle Longitudinal corresponden a la región del ante-arco. (François Risacher et. Al, 1998).

Cordillera de la Costa. Corresponde a un bloque levantado dislocado por un sistema de fallas, constituyendo la falla del Atacama y su sistema de fallas asociado, una imponente estructura de unos 900 km de largo. Morfológicamente esta cordillera se presenta como un conjunto de cerros y lomajes suaves que encierran numerosas depresiones rellenas de sedimentos continentales. En el borde oriental se extienden planos coluviales con presencia frecuente de salares. En la costa, el rasgo más notorio es el gran acantilado originado en escarpes tectónicos en escalón que habrían retrocedido por le erosión marina. (Paskoff, 1976) Las rocas expuestas son sedimentarias marinas y andesitas del Cretácico y Jurásico intruidas por batolitos graníticos del Jurásico tardío al Cretácico. En ciertos lugares se presentan riolitas de probable edad terciaria (Stoertz y Ericksen, 1974)

Depresión Central o Valle Longitudinal. Tectónicamente es un graben que configura una cuenca elongada en sentido norte-sur ubicada entre la Cordillera de la Costa y la Precordillera que ha constituido el nivel de base para el drenaje y el material de erosión proveniente desde el oriente y en el cual se han intercalado volcanitas, principalmente ignimbritas. Este material provino de la erosión del arco tectónico del Paleógeno, ubicado en la actual Precordillera, y posteriormente por material ígneo y sedimentario del arco magmático actual del Mioceno-Holoceno (Jensen, 1992). Bruggen (1950) propuso la denominación de Formación Riolítica dentro de la cual otros autores han propuesto nombres de formaciones más locales Esta unidad morfológica conforma un plano depositacional interrumpido por cerros y pequeños cordones montañosos. Aproximadamente entre los 22°30' y 19°30'S se extiende en un relieve suave denominado Pampa del Tamarugal, constituida por sedimentos continentales y lavas riolíticas. Hacia el sur aparecen serranías transversales. La presencia en el borde occidental de la Depresión Central de depositaciones salinas y horizontes de diatomeas son evidencia de la existencia de antiguos lagos que allí se asentaron debido a su basculamiento hacia el oeste. Esta inclinación puede constatarse en el salar de Pintados cuyo borde oriental aparece más elevado (François Risacher et. Al, 1998).

En la Pampa del Tamarugal Jensen (1992) describe, de norte a sur, varias unidades litoestratigráficas : En el sector Pampa Oxaya, la formación Azapa (Salas et al., 1966), subyaciendo a la Formación Oxaya, la que se correlaciona en su parte inferior con la Formación Riolítica y Altos de Pica. En el sector Pampa Tana, describe varias unidades con material sedimentario y volcánico; en el sector Altos de Pica, la formación del mismo nombre (Galli y Dingman, 1962); en el sector Sierra de Moreno, las formaciones Sichal e Ichuno (Makshev, 1978); en el sector salar de Lllamará, la unidad de Hilaricos (Jensen, 1992) y Formación Quillagua (François Risacher et. Al, 1998).

En la Segunda Región, el Valle Central presenta una forma diferente. La Pampa del Tamarugal se extiende hasta la latitud de Calama donde la cuenca de este nombre es diferente en geología, presentando depósitos lacustres de calizas y diatomitas y depósitos

volcánicos. Más al sur aparecen, cortando la continuidad, serranías transversales como las sierras de Moctezuma, El Tigre y Cuevitas.

Precordillera. Se denomina así a los rasgos montañosos de la Cordillera de Domeyko y la Cordillera del Medio. Esta última se desarrolla hacia el norte del curso medio del río Loa. La Cordillera de Domeyko se extiende entre los 22° 20' y los 25°30' con una longitud de 450 km y un ancho entre 20 a 30 km. La altura media de 3000 m. Su eje presenta una convexidad hacia el oeste. Las estructuras que la limitan aparecen como fallas normales y transcurrentes. Está constituida principalmente por distintos tipos de rocas del Mesozoico y Cenozoico. Entre ellas, andesitas, tobas, brechas, sedimentarias marinas y continentales que configuran varias formaciones como Agua Dulce, Purilactis, Cinchado y Tambores descritas por Ramírez y Gardeweg (1982). (François Risacher et. Al, 1998).

Cuencas Preandinas. Implantadas en un graben tectónico, se extienden entre la Precordillera y la Cordillera Occidental. En sus partes más bajas se formaron salares como los salares de Atacama, Punta Negra y Pajonales. El primero ha sido objeto de varias publicaciones así como de estudios de empresas a los cuales es difícil acceder (François Risacher et. Al, 1998).

Cordillera de los Andes o Cordillera Occidental. Este horst tectónico conforma un relieve impresionante que se extiende mucho más al este del territorio chileno. El Altiplano o Puna es una extensa meseta de 4000 m de altura media que se extiende en el noreste de Chile, noroeste de Argentina, sur-este de Perú y mitad occidental de Bolivia. Está compuesta de rocas sedimentarias, volcánicas e intrusivas con edades desde el Paleozoico al Cuaternario. Está flanqueada al este por la Cordillera Oriental y al oeste por la Cordillera Occidental. En Chile está constituido por un basamento volcano-sedimentario del Terciario. En el Altiplano al oriente de Arica, Salas et al., (1966) denominan Formación Putani a unos 500 m de sedimentos continentales de probable edad Oligoceno. Ella estaría correlacionada con la Formación Coro-Coro en Bolivia, con la cual también se correlacionarían las formaciones San Pedro y Tambores en la cuenca del salar de Atacama (François Risacher et. Al, 1998).

En discordancia sobre la Formación San Pedro, hacia el este, se encuentra la Formación Riolítica (Bruggen, 1950) que comienza a formarse en el Mioceno Inferior, sobre la cual aparecen los estrato volcanes andesíticos o Formación Andesítica, de edad Mioceno Medio, aunque su buena preservación sugiere edad cuaternaria. Ambas formaciones estarían genética y químicamente relacionadas. (Pichler y Zeil, 1972). Por otra parte, Zeil y Pichler (1967) atribuyen el origen del magma de las riolitas a fusión del sial de la corteza superior mientras que el de las andesitas se habrían originado por fusión parcial de la corteza inferior. El activo volcanismo producido por la efusión de estas lavas permitió la formación de cuencas cerradas intermontanas cuyo nivel de base dio origen a lagunas y salares (François Risacher et. Al, 1998).

5. CARACTERIZACIÓN ISOTÓPICA

El análisis que se presenta a continuación tiene como finalidad caracterizar las aguas, tanto superficiales como subterráneas de las regiones I, II, III, y IV sobre la base de la información recopilada y trabajada.

El objetivo de esta caracterización es realizar una aproximación al comportamiento del contenido isotópico en el agua tanto superficial como subterránea de la zona de estudio. La zona donde se han recopilado mayor cantidad de datos corresponde a la I Región ya que esta zona ha sido muy estudiada debido a la gran demanda de agua que existe en esta región, a diferencia de la IV Región de Coquimbo en la cual los datos recopilados son muy escasos. A continuación se realizará una caracterización por cada una de las regiones.

5.1. Primera región de Tarapacá

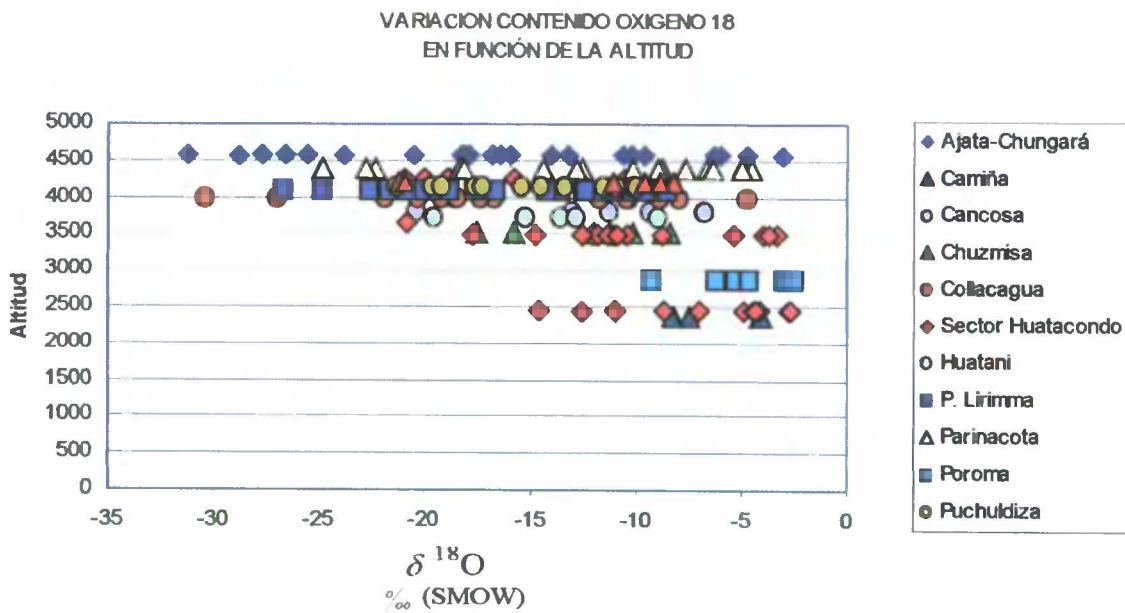
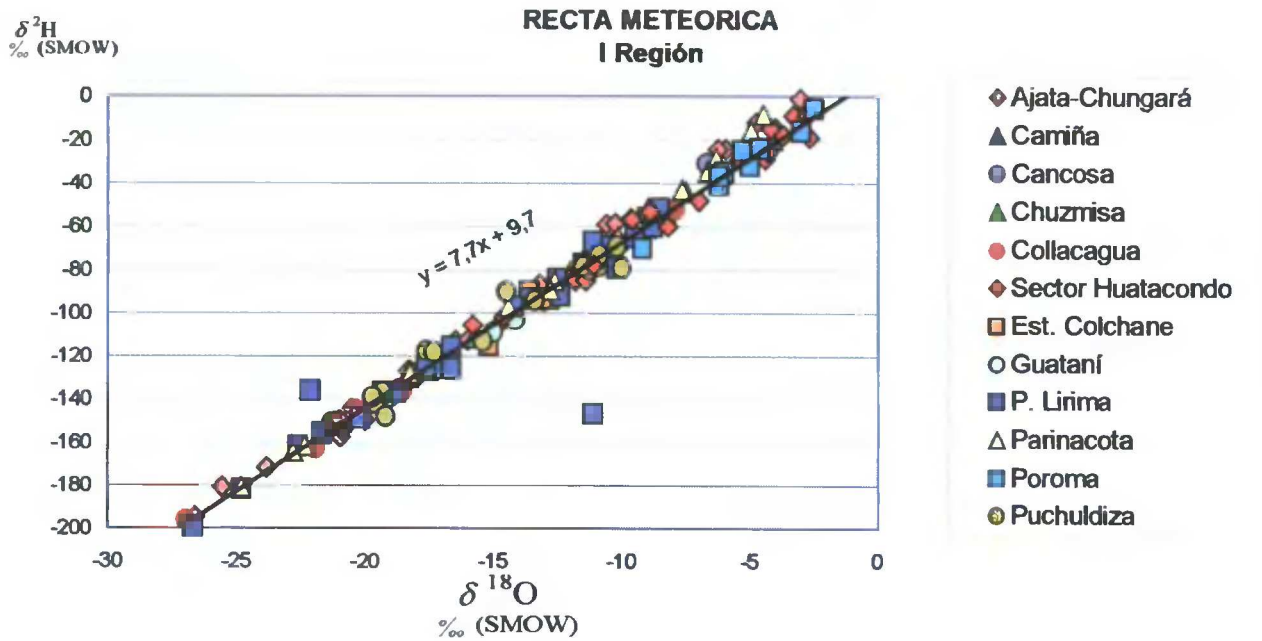
Como se mencionó anteriormente la Primera Región es la que posee mayor cantidad de estudios isotópicos y de recursos hídricos del total de los datos recopilados, por lo tanto, es la región que mayor cantidad de datos presenta. Debido a su extrema aridez es necesario utilizar técnicas no convencionales en los estudios de hidrología como lo son las técnicas isotópicas. En el presente trabajo se recopiló la mayor cantidad de datos posibles para su análisis y a continuación se presentan los resultados.

Como se puede observar (Mapa N°1) la mayor cantidad de muestras corresponden a las de pozo, principalmente en el sector del Salar Pintados, el Salar Llamara y el sector de Pica en donde la Dirección General de Aguas ha realizado un completo estudio de evaluación de recursos hídricos tomando una gran cantidad de muestras (éste entre otros estudios que se han realizado). Por el contrario, las muestras de lluvias son las más escasas, pero las más importantes desde el punto de vista del análisis isotópico. Éstas se concentran principalmente en la zona altiplánica y algunas quebradas de la Pampa del Tamarugal. Las muestras de ríos se concentran en el sector del río Collacagua, Salar del Huasco y el Río Lluta y algunas quebradas de la Pampa del Tamarugal. En el Salar Surire también se concentran una gran cantidad de muestras de vertientes así como también en el lago Chungará. En general la mayoría de las muestras se agrupan en el sector sur de la región y en la zona del altiplano, sector de gran interés en los estudios de evaluación de recursos hídricos.

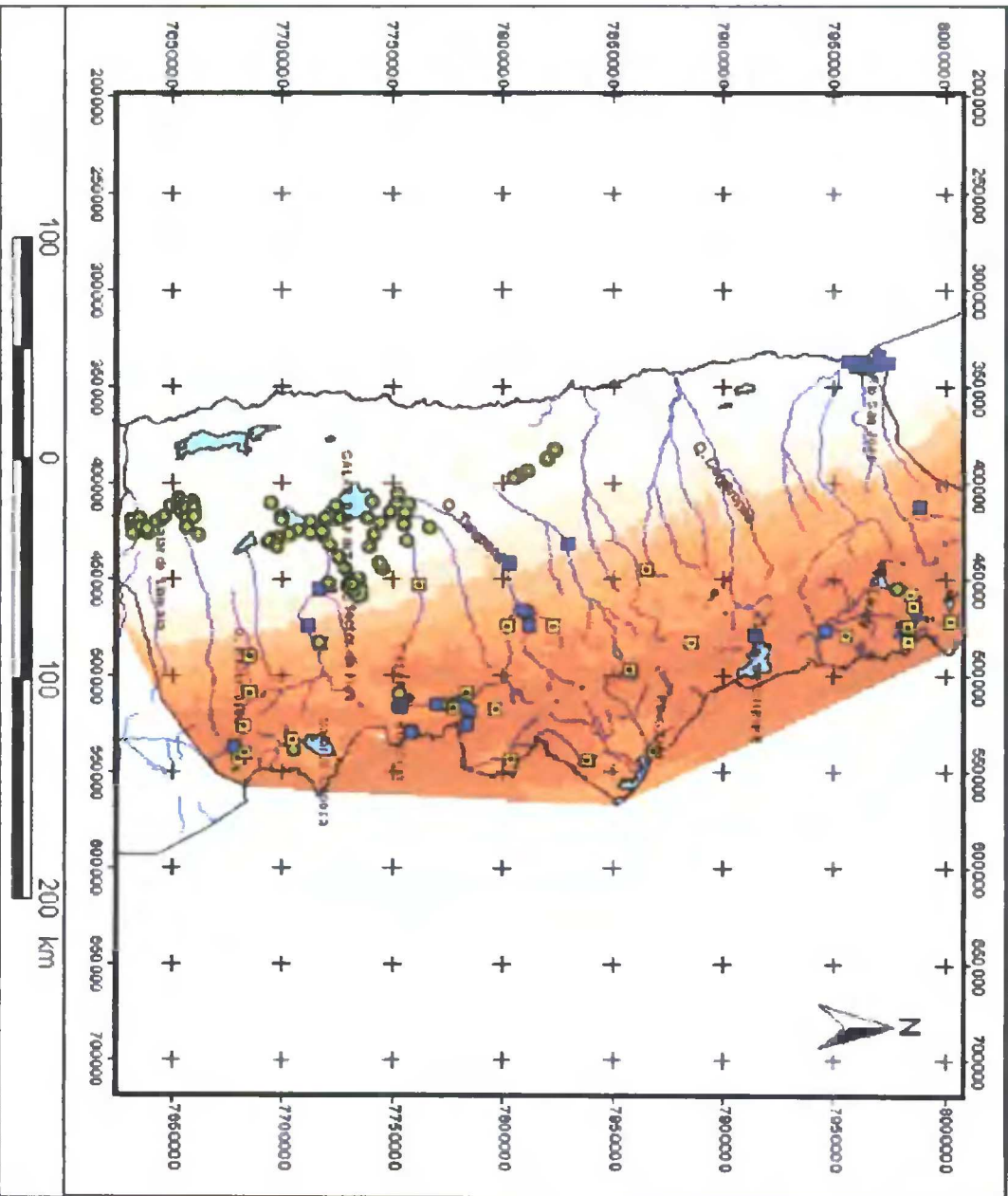
5.1.1. Precipitaciones

Las precipitaciones se caracterizan por mostrar una gran de amplitud en su contenido isotópico (-1‰ y -31‰ de $\delta^{18}\text{O}$ y -14‰ y -147‰ de $\delta^2\text{H}$). En la recta meteórica (gráfico N° 1) obtenida se puede observar que las muestras cumplen con la recta meteórica propuesta por Peña et al. Sin embargo se puede observar cómo varían los valores isotópicos para los mismos puntos, por ejemplo, las muestras Ajata-Chungará muestran una variación entre -1‰ y -27‰ de $\delta^{18}\text{O}$, es decir, precipitaciones con gran variación en el contenido isotópico.

Lo mismo ocurre con las otras muestras, el único sector en que la variación es menor es el sector de la Pampa Poroma (2800 m s.n.m.). Existen algunas muestras de la Pampa Lirimá que se alejan de la Recta Meteorica.



DISTRIBUCION DE MUESTRAS CON DATOS ISOTOPICOS I Region de Tarapacá



SIMBOLOGIA

Tipo muestra

- Muestras de pozo
- Muestras lluvia
- Muestras de rio

Altitud (ms n.m.)

- 0 - 666
- 666 - 1333
- 1333 - 2000
- 2000 - 2666
- 2666 - 3333
- 3333 - 3333 - 4000
- 4000 - 4666
- 4666 - 5333
- 5333 - 6000

- Salares y lagunas
- Limite regional
- Rios y quebradas

I Región de Tarapacá



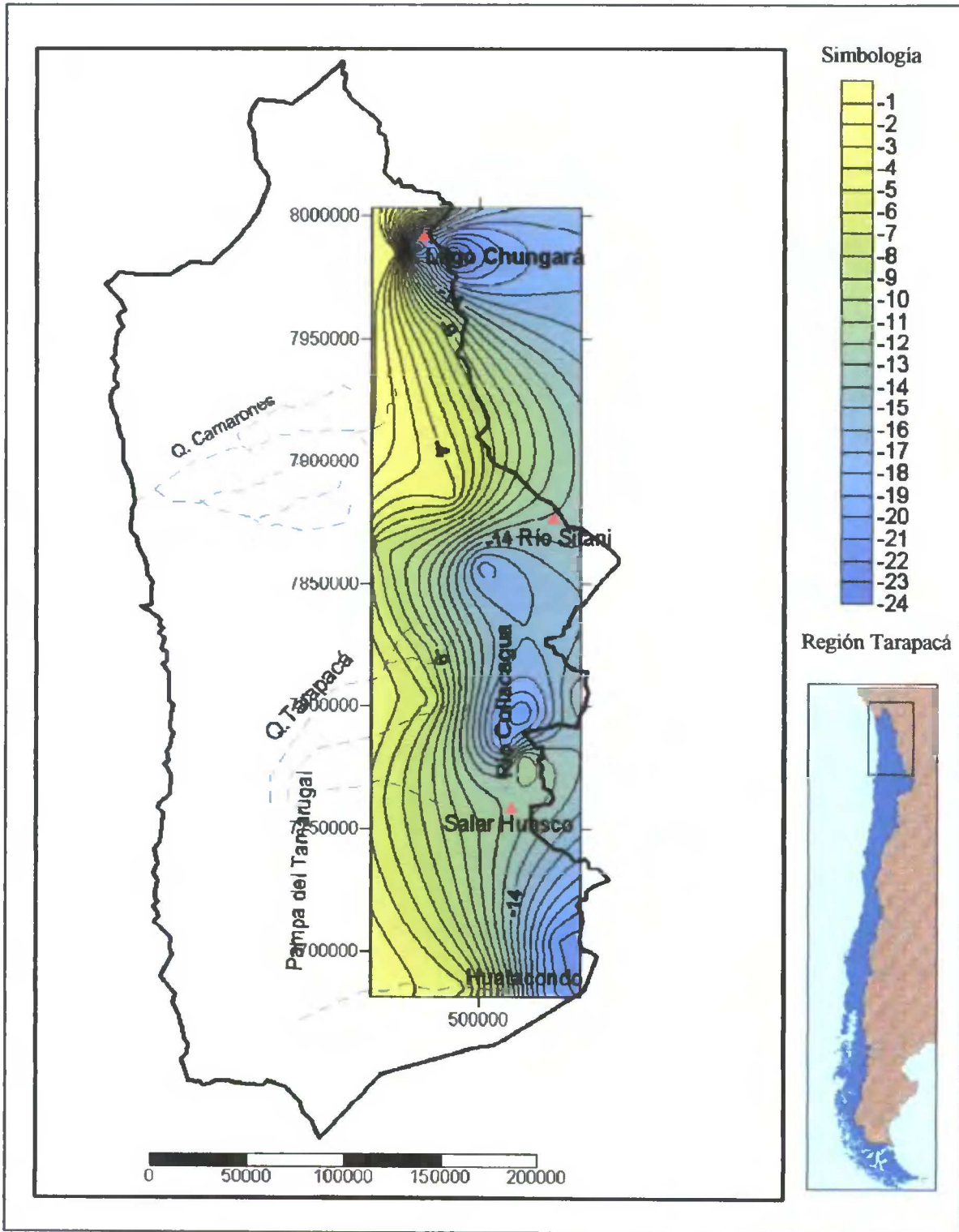
Fuente de Datos: DGA
Año: 2004

Mapa N° 1

Siguiendo lo anteriormente dicho, al comparar el contenido de oxígeno-18 de las muestras con la altitud se aprecia que existen varios puntos a la misma altitud pero con gran variación del contenido de oxígeno-18 (gráfico N° 2). Las muestras del sector de Huatacondo muestran variación en la altitud ya que corresponden a distintos tramos de la quebrada del mismo nombre y una gran amplitud en el contenido de oxígeno-18. En general, se puede decir que los valores isotópicos corresponden a la relación contenido isotópico-altitud,

En el Mapa N°2 se puede observar que las precipitaciones obedecen al efecto altitud. A medida que las masas de aire se elevan y se alejan de la costa se van liberando de los isótopos más pesados tomando valores más bajos en las zonas más altas. Se aprecia cómo a medida que las muestras ascienden hacia el Lago Chungará (4600 m s.n.m.) el contenido de oxígeno-18 es menor. En general se aprecia que desde la Pampa del Tamarugal hacia el altiplano los valores de oxígeno-18 van disminuyendo.

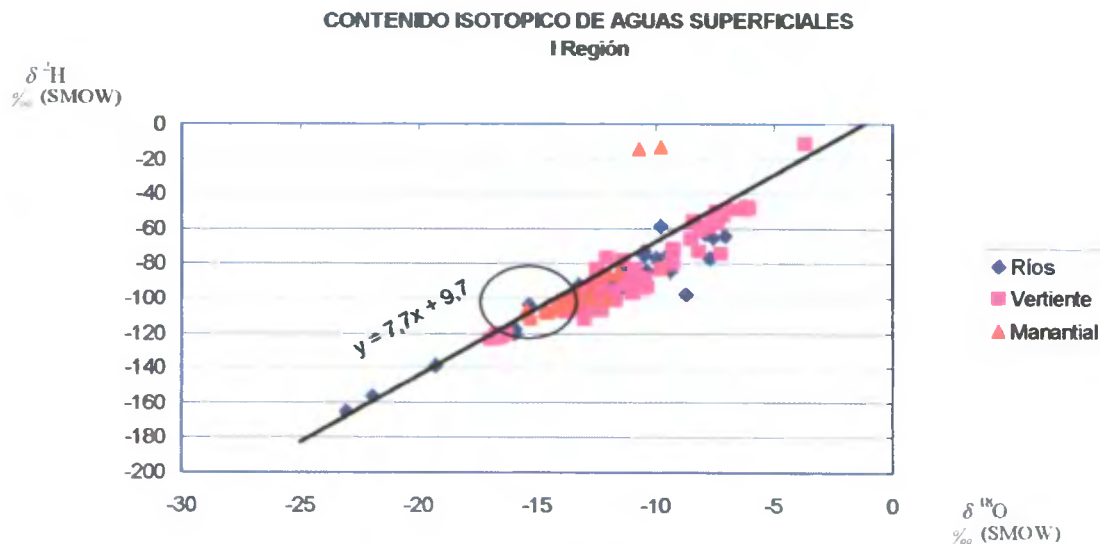
**DISTRIBUCIÓN CONTENIDO OXIGENO 18
EN LAS PRECIPITACIONES.
I REGIÓN**



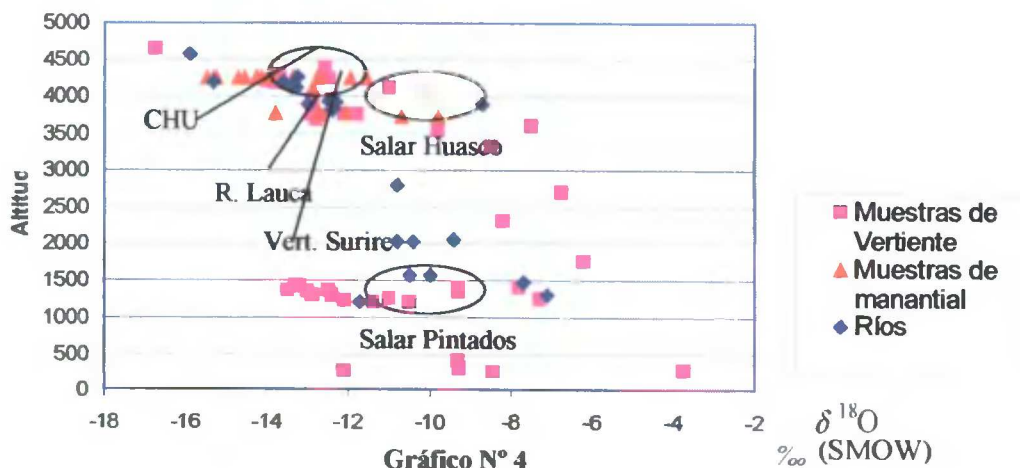
5.1.2. Aguas superficiales

La composición isotópica del agua superficial se presenta homogénea siguiendo la tendencia de la línea de la recta meteórica local. También se aprecia que existe un conjunto de muestras que pertenecen a un mismo tipo de agua con valores entre -12‰ y -14‰ de $\delta^{18}\text{O}$ y -90‰ y -110‰ de $\delta^2\text{H}$, esto ocurre generalmente cuando las aguas poseen una misma altura de recarga. En el gráfico N° 4 se muestra la relación de la altitud y el contenido de oxígeno-18, la dispersión de los puntos indica que existen aguas con diferente contenido de oxígeno-18. El primer tipo corresponde a aguas con un contenido isotópico entre -12‰ y -13.9‰ de $\delta^{18}\text{O}$ a una altura promedio de 1400 m s.n.m. Son principalmente muestras de vertientes ubicadas en el sector de Pica.

Mas arriba se pueden ver aguas con un contenido de oxígeno-18 similar entre la cota 3.500 y 4.500 m s.n.m. Existe otro tipo de aguas con valores isotópicos entre -14‰ y -15‰ de $\delta^{18}\text{O}$ en la cota 4300 m s.n.m., éstas son aguas más livianas y corresponden a muestras del lago Chungará y río Lauca, los cuales no se relacionan con los tipos mencionados anteriormente. Como se ve en el gráfico N° 4 la altura máxima de los datos recopilados corresponde a la cota 4500-4300 m s.n.m. y la altura mínima corresponde casi al del nivel del mar.



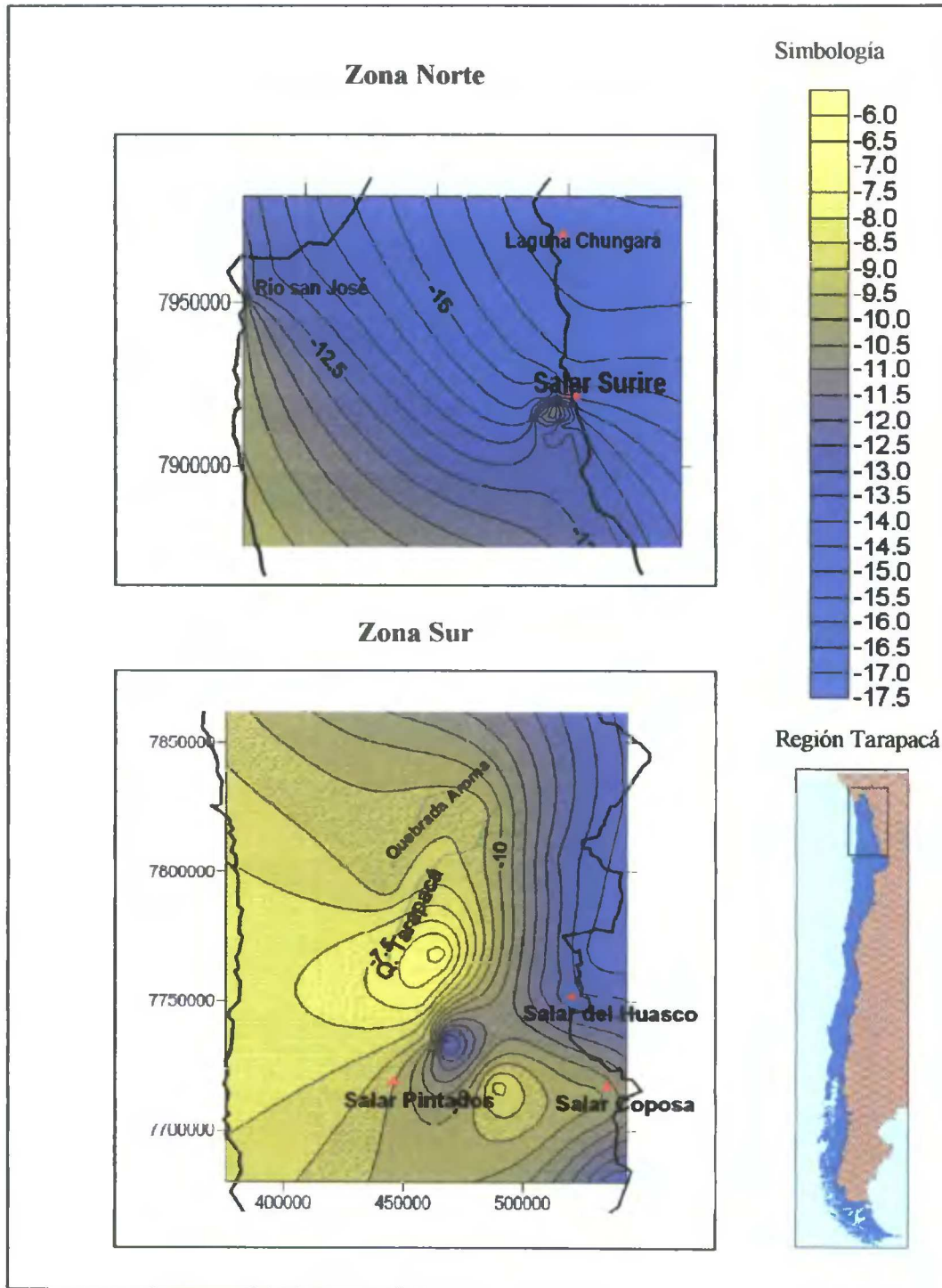
VARIACION CONTENIDO OXIGENO 18
EN FUNCION DE LA ALTITUD
I Región



Lo anteriormente dicho se puede observar más claramente en los mapas N° 3 y N° 4 en donde se muestra la distribución del contenido de oxígeno-18 para las muestras de río y de vertientes y manantiales. Las muestras del sector de la quebrada de Tarapacá poseen los valores más pesados, los cuales no guardan relación con las demás muestras (corresponden a los puntos más dispersos del gráfico N° 4). El sector del Salar Surire presenta en su centro un tipo de agua más pesada (-11 ‰ de $\delta^{18}\text{O}$) que su alrededor (-15 ‰ de $\delta^{18}\text{O}$). En general se ve gran diferencia en el contenido de oxígeno-18 de las muestras de vertientes y manantiales.

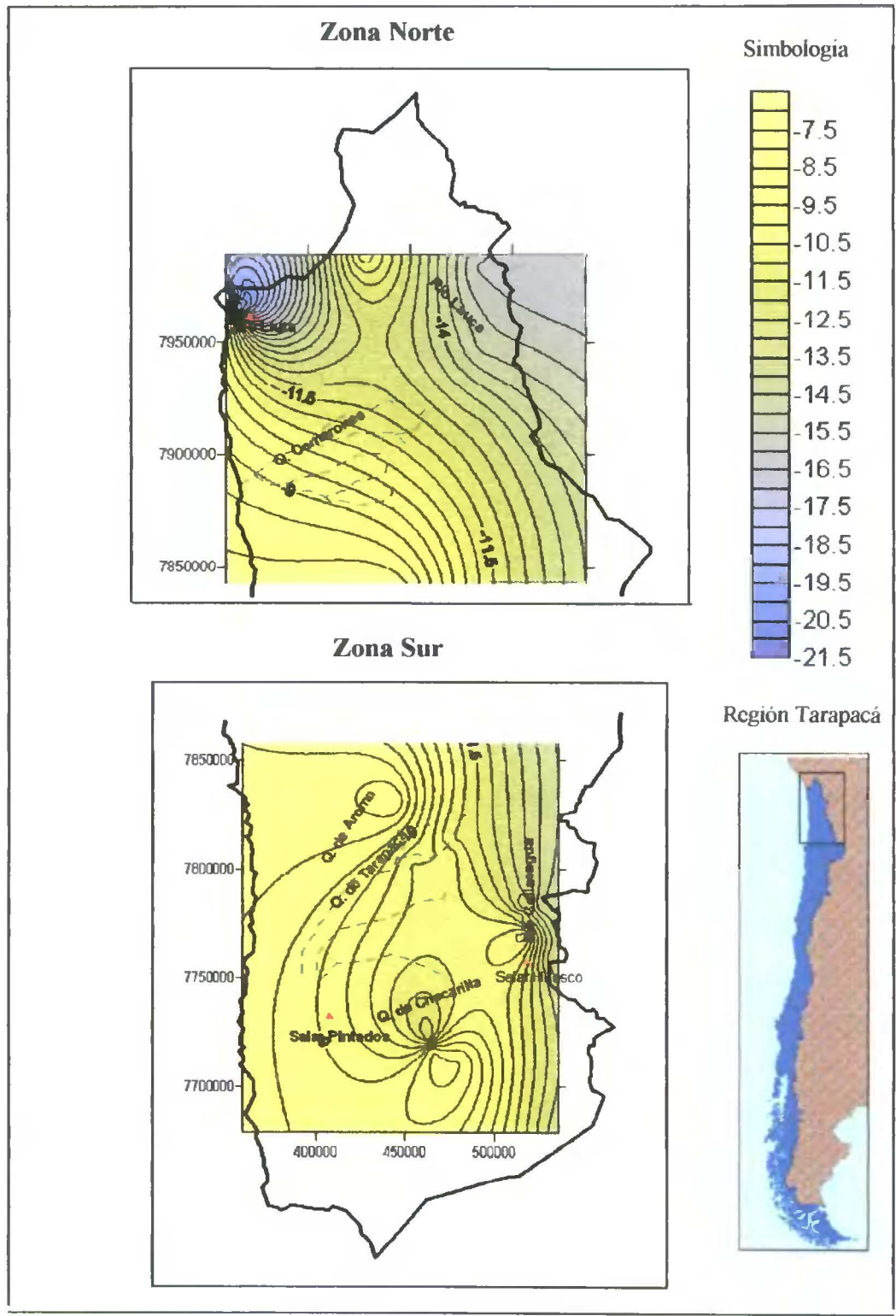
A diferencia de lo anterior, las muestras de ríos muestran gran homogeneidad (mapa N° 4) aunque el contenido de oxígeno-18 va disminuyendo levemente a medida que aumenta la altitud. En el sector de la Pampa del Tamarugal los valores oscilan entre -7 ‰ y -10 ‰ de $\delta^{18}\text{O}$ a excepción de la Q. Chacarilla. En la zona del altiplano los valores oscilan entre -11 ‰ y -15 ‰ de $\delta^{18}\text{O}$ y la zona que posee los valores más bajos de oxígeno-18 es la del río Lluta (-18 ‰ y -21 ‰ de $\delta^{18}\text{O}$).

**DISTRIBUCIÓN CONTENIDO OXIGENO 18
EN VERTIENTES Y MANATAIALES
I REGION**



Mapa N° 3

DISTRIBUCIÓN CONTENIDO OXIGENO 18 EN MUESTRAS DE RIOS I REGION



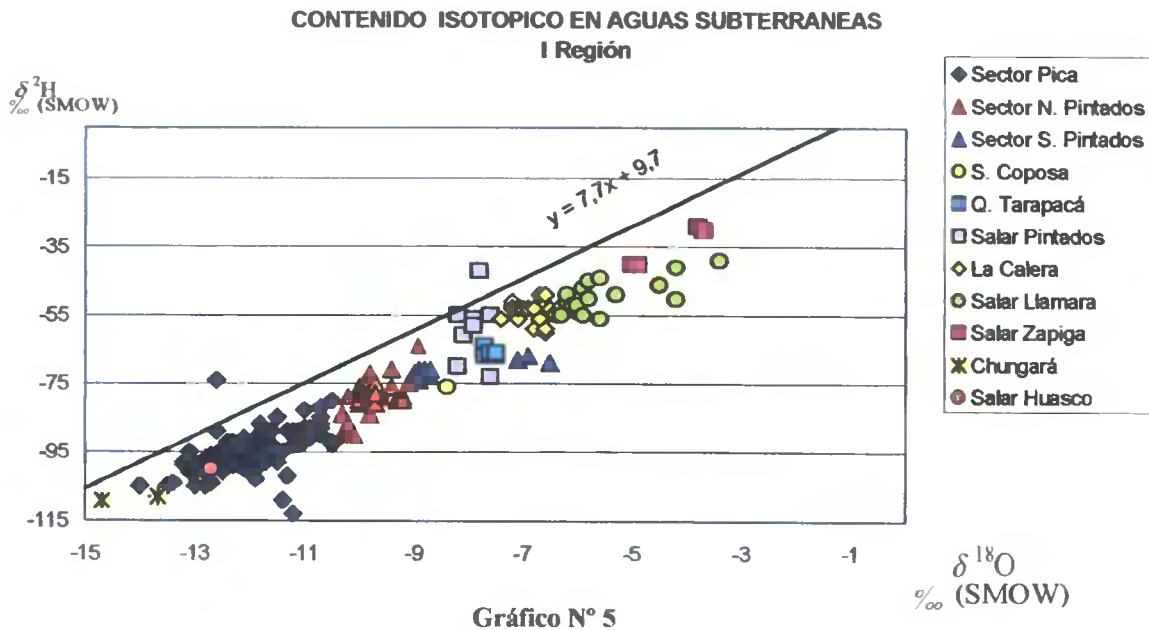
Mapa N° 4

5.13. Aguas subterráneas

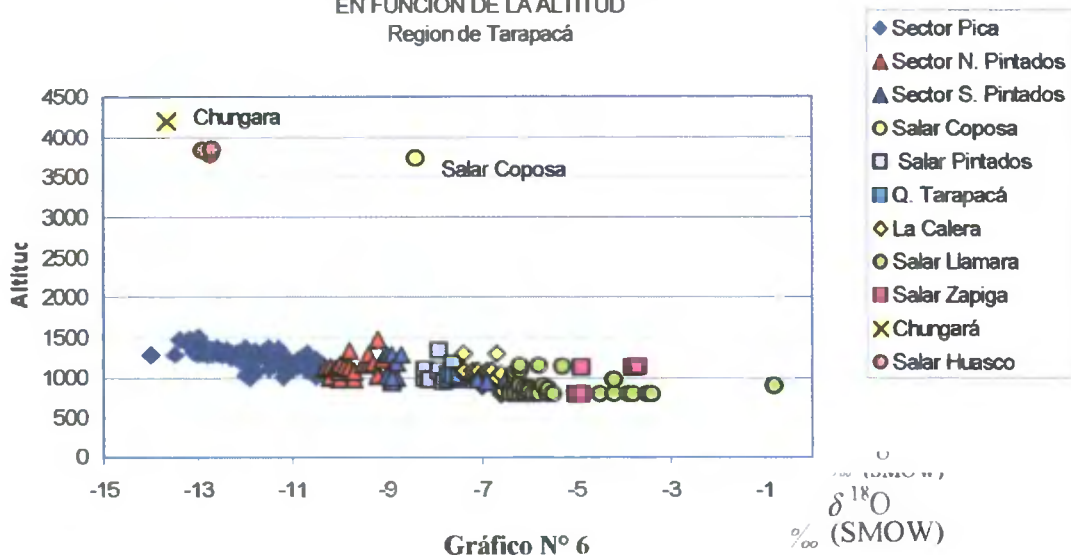
El contenido isotópico de las muestras de agua subterránea, varía entre -4‰ y -14‰ de $\delta^{18}\text{O}$ y -29‰ y -113‰ de $\delta^2\text{H}$. Esta gran variación significa que nos encontramos con distintos tipos de agua con zonas de recarga de características diferentes o puede ser un solo acuífero pero que recibe recarga de aguas con características isotópicas diferentes.

Como se aprecia en gráfico N° 5 el contenido isotópico de las muestras de pozo se desplazan a lo largo de la recta meteórica cumpliéndose la relación altura-contenido isotópico (ver gráfico N° 6). En el sector de Pica el contenido isotópico varía entre -13‰ y -11‰ de $\delta^{18}\text{O}$ y -82‰ y -100‰ de $\delta^2\text{H}$. También se aprecia que el sector del Salar Pintados posee valores similares al de la Quebrada Tarapacá y que el Salar Llamara tiene valores muy dispersos. En general sólo dos muestras se alejan de la recta meteórica.

Al considerar la altitud y las muestras de pozos se aprecia la similitud en el contenido de oxígeno-18 entre las aguas del Salar del Huasco y el sector de Pica. Se aprecia también que el Salar de Pintados y la Q. de Tarapacá presentan valores isotópicos similares (gráfico N° 5). En el gráfico N° 6 también se puede observar que tanto el Salar de Pintados como la Q. de Tarapacá se encuentran en cotas similares. Por otro lado, los valores más pesados de Oxígeno-18 se encuentran en el Salar de Llamara y el Salar Zapiga, éstos presentan valores de oxígeno-18 similares pero a distinta altitud y latitud.



VARIACION CONTENIDO OXIGENO 18
EN FUNCION DE LA ALTITUD
Region de Tarapacá



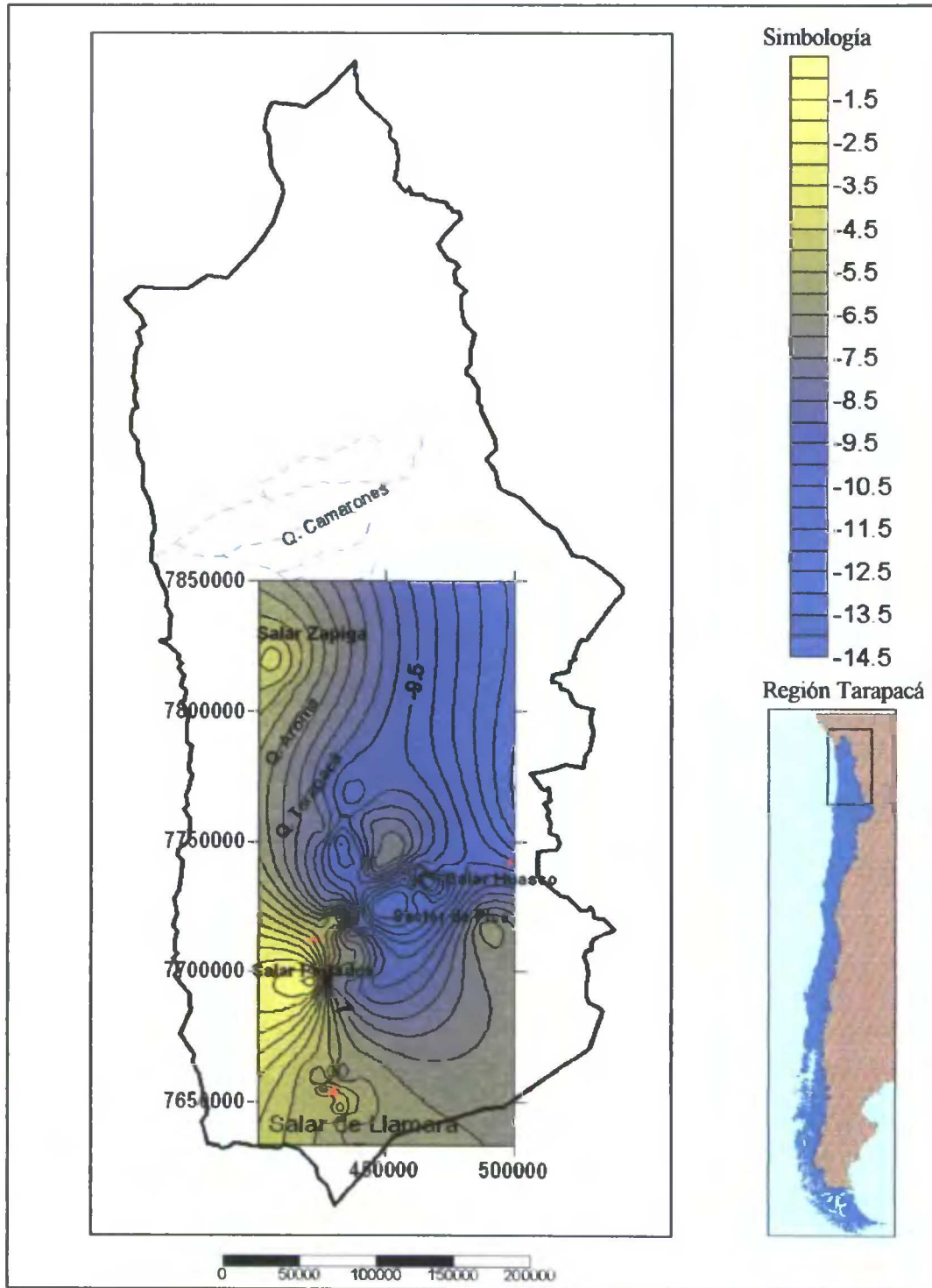
Como se puede observar el único punto que no relaciona el contenido isotópico con la altitud es el Salar de Coposa, pues se supone que a mayor altitud, menor es el contenido de éste. Las causas pueden ser variadas y su análisis depende de la cantidad de información existente.

En el mapa N° 5 se aprecia con mayor claridad lo expresado anteriormente. Los sectores del Salar Huasco y Pica presentan valores de oxígeno-18 similares (-12 ‰ a -13 ‰ de $\delta^{18}\text{O}$). El Salar de Pintados presenta valores un poco más altos (-8 ‰ a -10 ‰ de $\delta^{18}\text{O}$) al igual que la Quebrada Aroma y la Quebrada Tarapacá. El Salar de Llamara presenta los valores más altos del área de estudio juntos con las muestras del Salar Zapiga.

Las muestras ubicadas en el sector del altiplano presentan valores diferenciados, el Salar del Huasco posee valores altos de oxígeno-18, el Salar de Coposa valores entre -7 ‰ y -8 ‰ de $\delta^{18}\text{O}$ y por último el Salar de Zapiga presenta valores más altos de oxígeno-18 (entre -3 ‰ a -4 ‰ de $\delta^{18}\text{O}$).

En general, en el mapa se observa que los sectores de Pica, parte de la Quebrada de Tarapacá y del salar del Huasco presentan valores homogéneos, formando un área con similar contenido de oxígeno-18.

**DISTRIBUCION CONTENIDO
OXIGENO18 EN POZOS
I Región de Tarapacá**



Mapa N° 5

5.2. Segunda Región de Antofagasta

Como se aprecia en el mapa N° 6 la mayor cantidad de muestras con datos isotópicos corresponden a las muestras de pozos las cuales se concentran principalmente en la Quebrada de Taltal y el sector de Aguas Blancas. Las muestras de río se ubican principalmente en la cuenca del río Loa a excepción de algunas ubicadas en la Quebrada Pastos Largos. En el sector del salar de Atacama y altiplano se encuentran solamente algunas muestras de lluvia y de nieve. Las muestras de vertiente se ubican principalmente en la quebrada Pastos Largos y los salares Pajonales, Aguas Blancas y la Laguna la Azufrera. En general, son dos las áreas que mejor están cubiertas de datos, la cuenca del río Loa y la Quebrada de Taltal, en el resto de la región no se encontraron datos isotópicos.

5.2.1. Precipitaciones y nieve

Las muestras de lluvia y nieve recopiladas abarcan sólo algunas áreas específicas de la región. Las muestras de lluvia presentan una gran amplitud en el contenido isotópico, entre -4‰ y -15‰ de $\delta^{18}\text{O}$ y -11‰ y -104‰ de $\delta^2\text{H}$, al igual que las muestras de nieve (-2‰ y -18‰ de $\delta^{18}\text{O}$ y -33‰ y -130‰ de $\delta^2\text{H}$).

Como se ve en el gráfico N° 5 no todas las muestras cumplen con la recta meteórica propuesta por Peña et al.

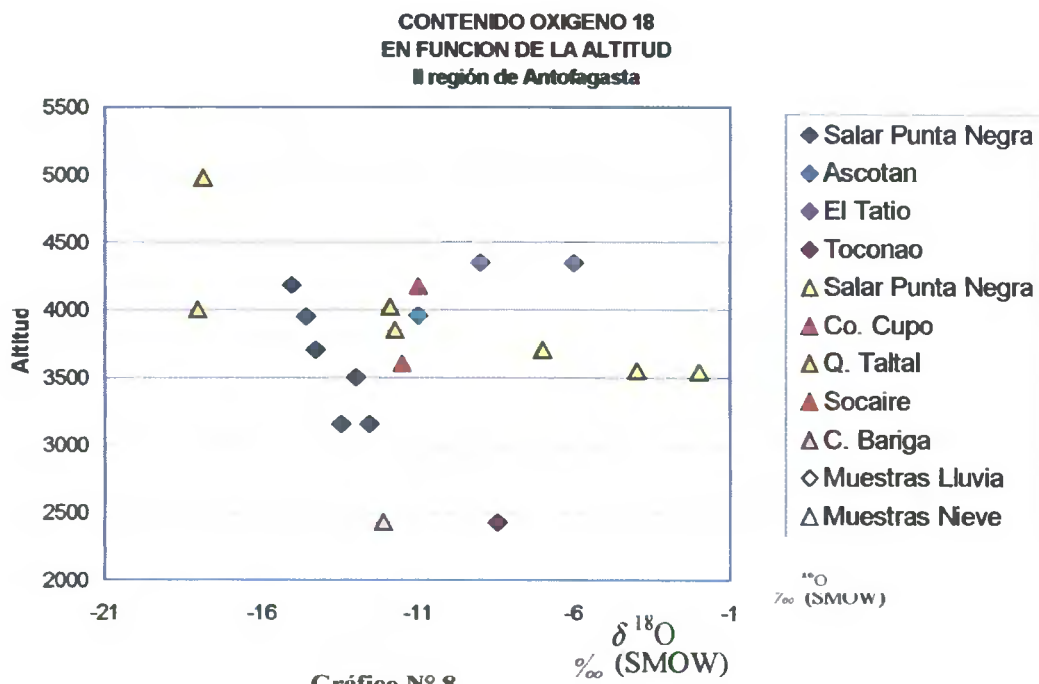
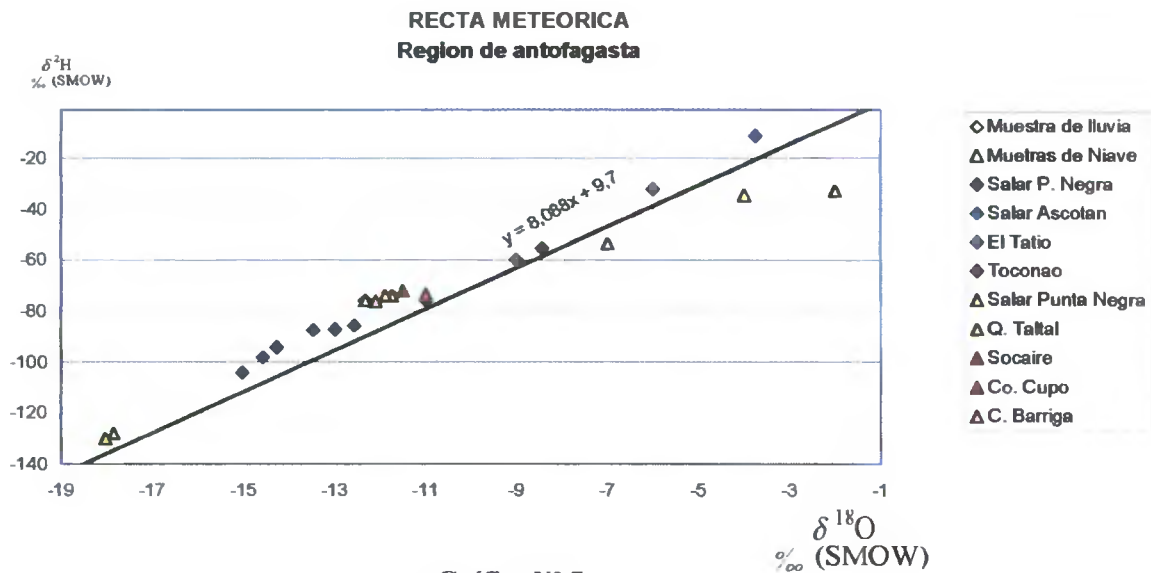
Las muestras de nieve del Salar Punta Negra se alejan de la recta meteórica, el resto de las muestras siguen la tendencia de la recta.

El contenido de oxígeno-18 de las muestras de lluvia del salar Punta Negra varía entre -13‰ y -15‰ de $\delta^{18}\text{O}$ y no poseen el mismo contenido isotópico que las muestras de nieve del mismo lugar.

Las muestras de nieve de la Quebrada de Taltal muestran gran variación en el contenido de oxígeno-18 (entre -4‰ y -18‰ de $\delta^{18}\text{O}$). Esta variación se podría asociar al efecto continentalidad, desde la desembocadura de la Quebrada de Taltal hasta el interior de ésta.

Hay un grupo de muestras de nieve y de precipitación que poseen similar contenido de oxígeno-18 (-12‰ de $\delta^2\text{H}$). Dichos puntos corresponden a la Quebrada de Taltal, Cuesta Barriga y Socaire.

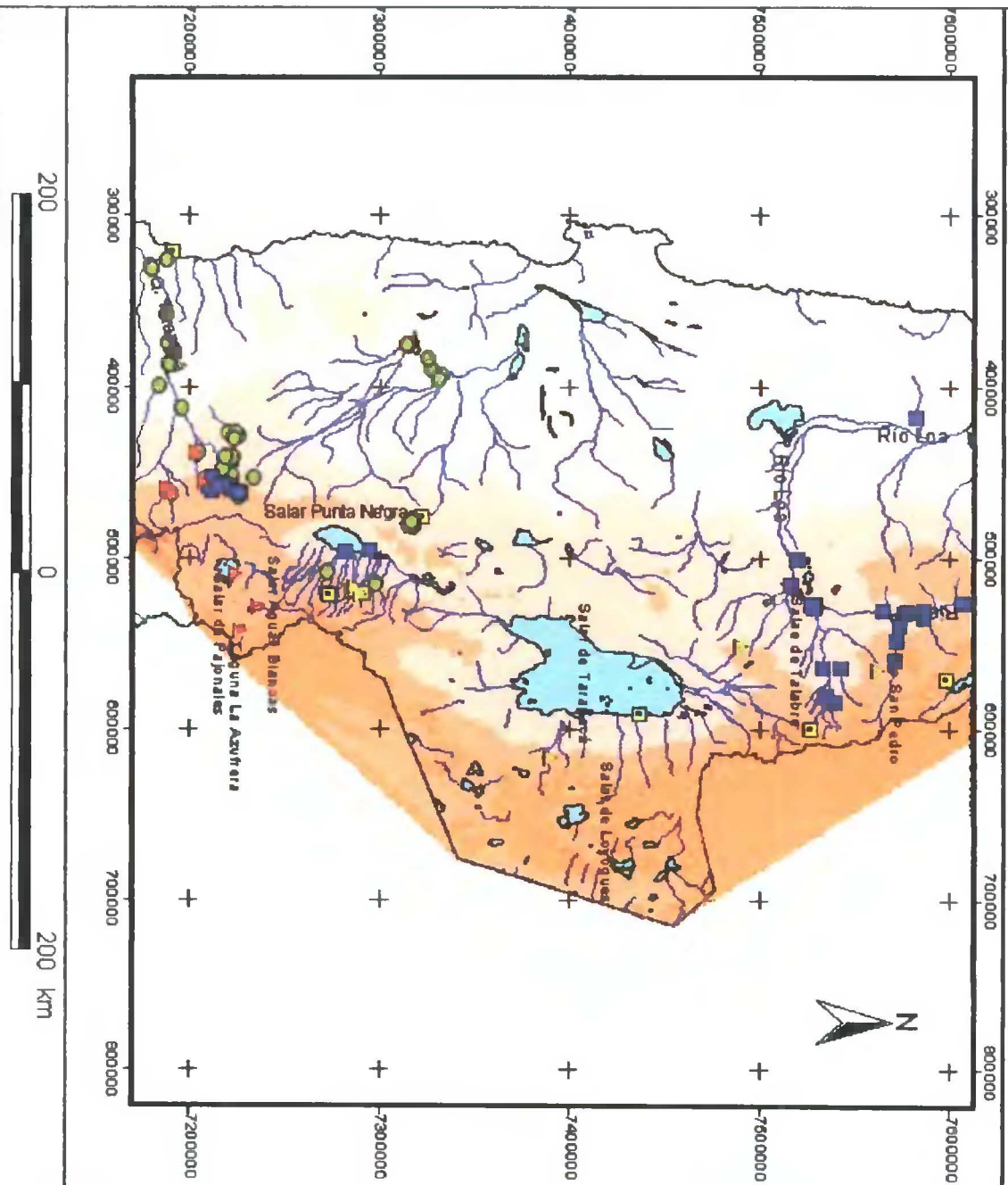
También se ve claramente como las muestra de nieve del sector Co. Cupo y la de lluvia del salar de Ascotán poseen el mismo contenido de oxígeno-18.



Al comparar el contenido de oxígeno-18 de las muestras con la altitud (Ver gráfico N° 8) se puede decir:

Las muestras de lluvia del Salar Punta Negra varían su contenido de oxígeno-18 a medida que varía la altitud. Por otro lado, las muestras de nieve del Salar Punta Negra no guardan relación en el contenido de oxígeno-18 con las muestras de lluvia. La Quebrada de Taltal muestra gran variación, como se mencionó anteriormente, corresponden a muestras a diferentes altitudes en la Quebrada de Taltal, es decir, las muestras se ven afectadas por la continentalidad y la altitud. Las muestras de Ascotán y el Cerro Cupo poseen el mismo contenido de oxígeno y se localizan a una altitud similar.

DISTRIBUCION DE MUESTRAS CON DATOS ISOTOPICOS II Region de Antofagasta



SIMBOLOGIA

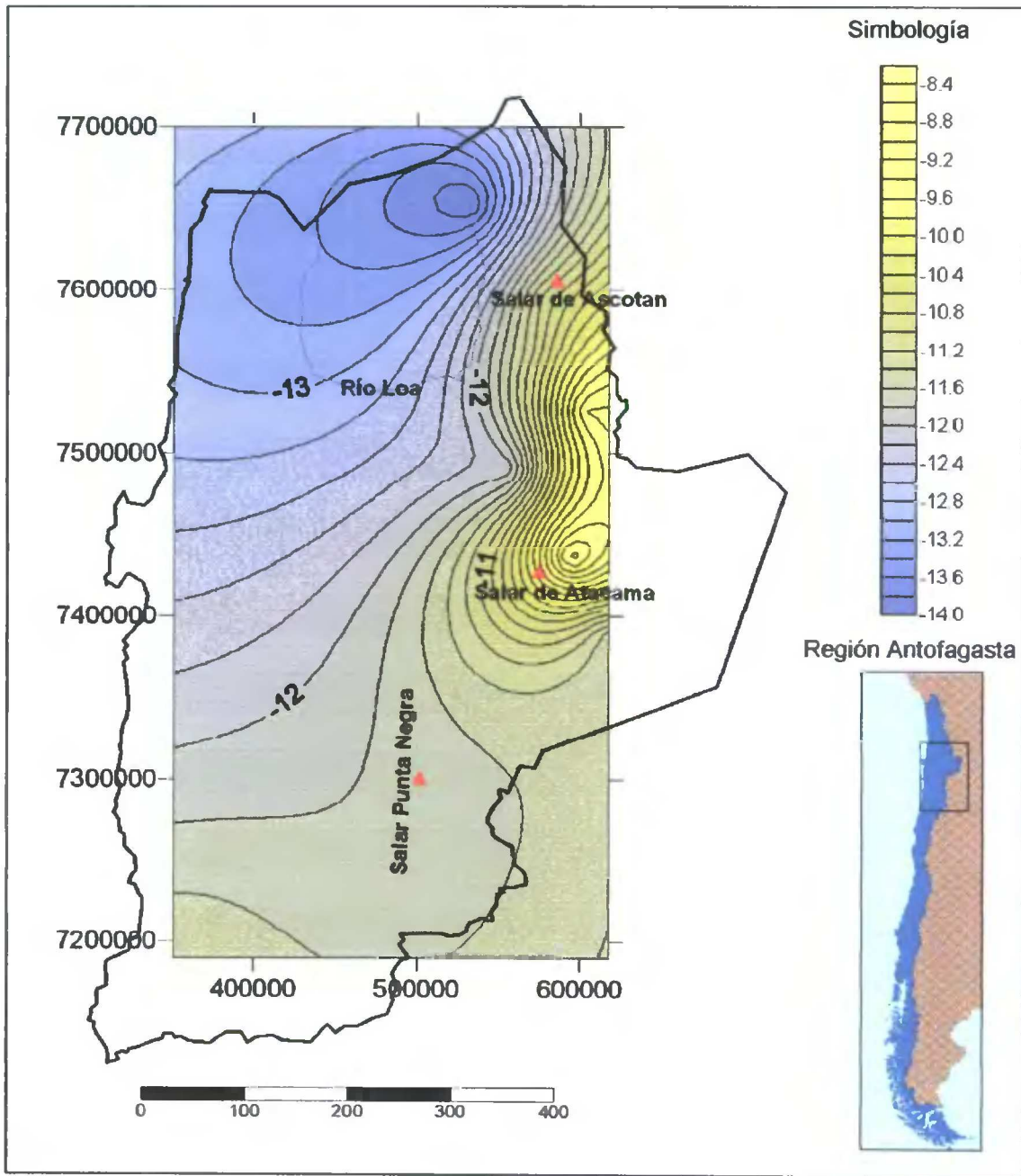
- Tipo muestra**
- Muestras de pozo
 - Muestras lluvia
 - Muestras Nieve
 - Muestras de vertiente
 - Muestras de río
- Altitud (m.e.n.m.)**
- 0 - 1112
 - 1112 - 2225
 - 2225 - 3337
 - 3337 - 4450
 - 4450 - 5563
 - 5563 - 6675
 - 6675 - 7788
 - 7788 - 8901
 - 8901 - 10013
- Salares y lagunas**
-
- Limite regional**
-
- Rios y quebradas**
-

II Región Antofagasta



Fuente de Datos: DGA
Año 2004

Mapa Nº 6



Mapa N° 7

Como se puede observar en el mapa N° 7, la distribución del contenido de oxígeno-18 en las muestras de lluvias los valores más pesados se encuentran en la zona del altiplano (esta concentración de valores pesados de oxígeno en el altiplano es característico de las aguas lluvias ricas en isótopos), principalmente entre el Salar de Atacama y el Salar de Ascotán. Desde el Salar de Ascotán hacia el río Loa los valores se tornan más livianos.

Los valores más livianos de oxígeno se 18 se concentran en la parte más norte del Río Loa y en las muestras del Salar Punta Negra (entre -12‰ y -15‰ de $\delta^{18}\text{O}$). Se observa también que los valores mínimos de oxígeno-18 son bastante elevados considerando que son muestras de lluvia.

5.2.2. Aguas superficiales

La caracterización isotópica (deuterio y oxígeno-18) de aguas superficiales se refiere principalmente a muestras de ríos, vertientes y manantiales de la Región de Antofagasta. Como se aprecia en el gráfico N° 9, las muestras se ubican bajo la recta meteórica local, lo cual significa que las aguas superficiales están sometidas a procesos de evaporación en su recorrido.

Se puede observar cómo los valores de deuterio y oxígeno-18 del río Loa varían a lo largo de su recorrido, lo cual puede ser debido a la evaporación a lo largo del río con lo cual resultan más livianas.

Hay que destacar que el río Salado es un aporte de aguas isotópicamente más pesadas, por lo tanto los valores más pesados que aparecen en el gráfico corresponden a muestras del río Salado.

Las muestras de la Quebrada de Taltal, corresponden al sector más interior de ésta. Las muestras de vertientes se alejan de la recta meteórica local, lo cual indica que estas aguas han sufrido algún grado de evaporación.

La Laguna la Azufrera posee valores de oxígeno-18 similares a algunas muestras de río y de vertientes de la Q. de Taltal. Lo mismo ocurre con el Salar de Pajonales que muestra el mismo contenido de oxígeno-18 que la Quebrada de Taltal.

Las muestras de río del Salar Punta Negra poseen valores isotópicos pesados, si comparamos estas muestras con las muestras de nieve del mismo Salar, aguas arriba (3600 m s.n.m), podremos notar que poseen valores similares.

**CONTENIDO ISOTOPICO EN AGUAS SUPERFICIALES
II Región de Antofagasta**

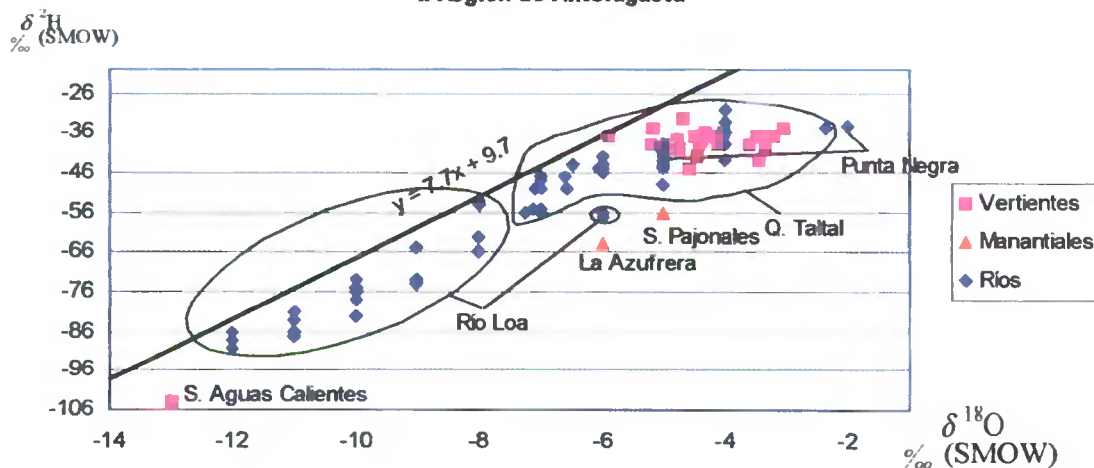


Gráfico N° 9

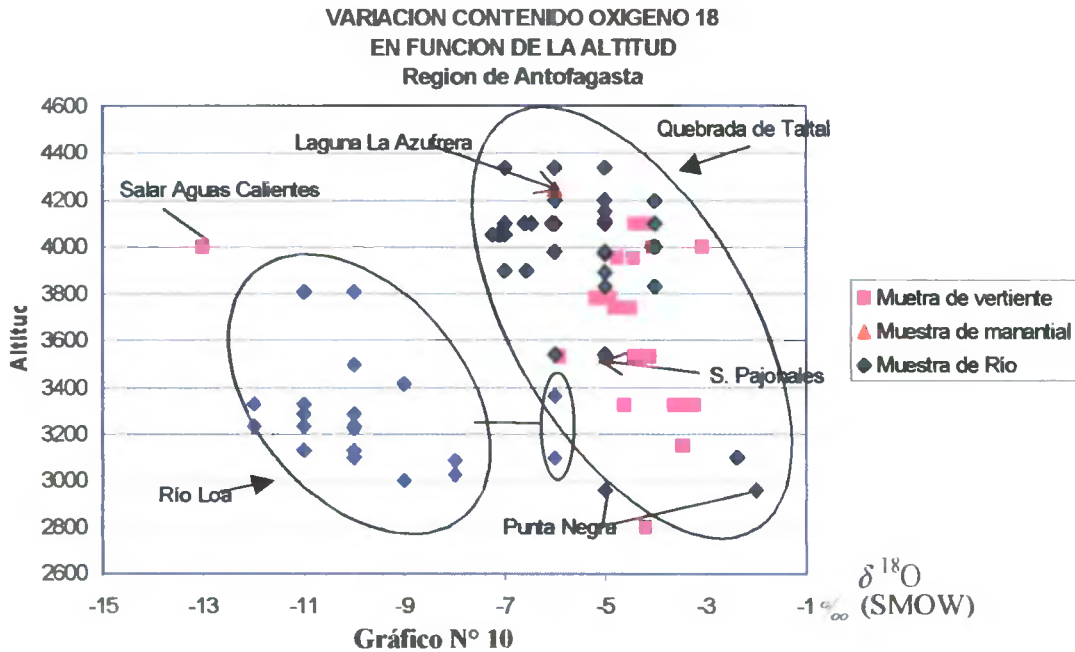
Si se observa la altitud de los puntos y el contenido de oxígeno-18 (Gráfico N° 10) se aprecia que el contenido de oxígeno-18 a alturas mayores es bajo. En el gráfico se aprecia como los valores de oxígeno-18 disminuyen a medida que las muestras de vertientes aumentan su altitud.

Las muestras de río de la Quebrada de Taltal poseen gran amplitud en su contenido de oxígeno-18 (entre -2‰ y -7‰ de $\delta^{18}\text{O}$). Esto significa que recibe aportes de distintos tipos de agua.

El Salar de Aguas Calientes posee un contenido de oxígeno-18 más liviano que el resto de las muestras y corresponde a otro tipo de aguas más pesadas que no se relacionan con la Quebrada de Taltal.

Con respecto a las muestras del río Loa, se puede decir que el contenido de oxígeno-18 tiende a ser más liviano (entre -6‰ y -12‰ de $\delta^{18}\text{O}$) en comparación al contenido de oxígeno-18 de las muestras de la Quebrada de Taltal.

Las muestras del río Salado poseen un contenido de oxígeno-18 que varía entre -6‰ y -9‰ de $\delta^{18}\text{O}$.



Con respecto a la distribución del contenido de oxígeno-18 en las muestras de río, se puede decir (mapa N° 8) que los valores más livianos se encuentran al norte del río Loa, y los valores más pesados se encuentran en la zona de la Quebrada de Taltal y Salar Punta Negra.

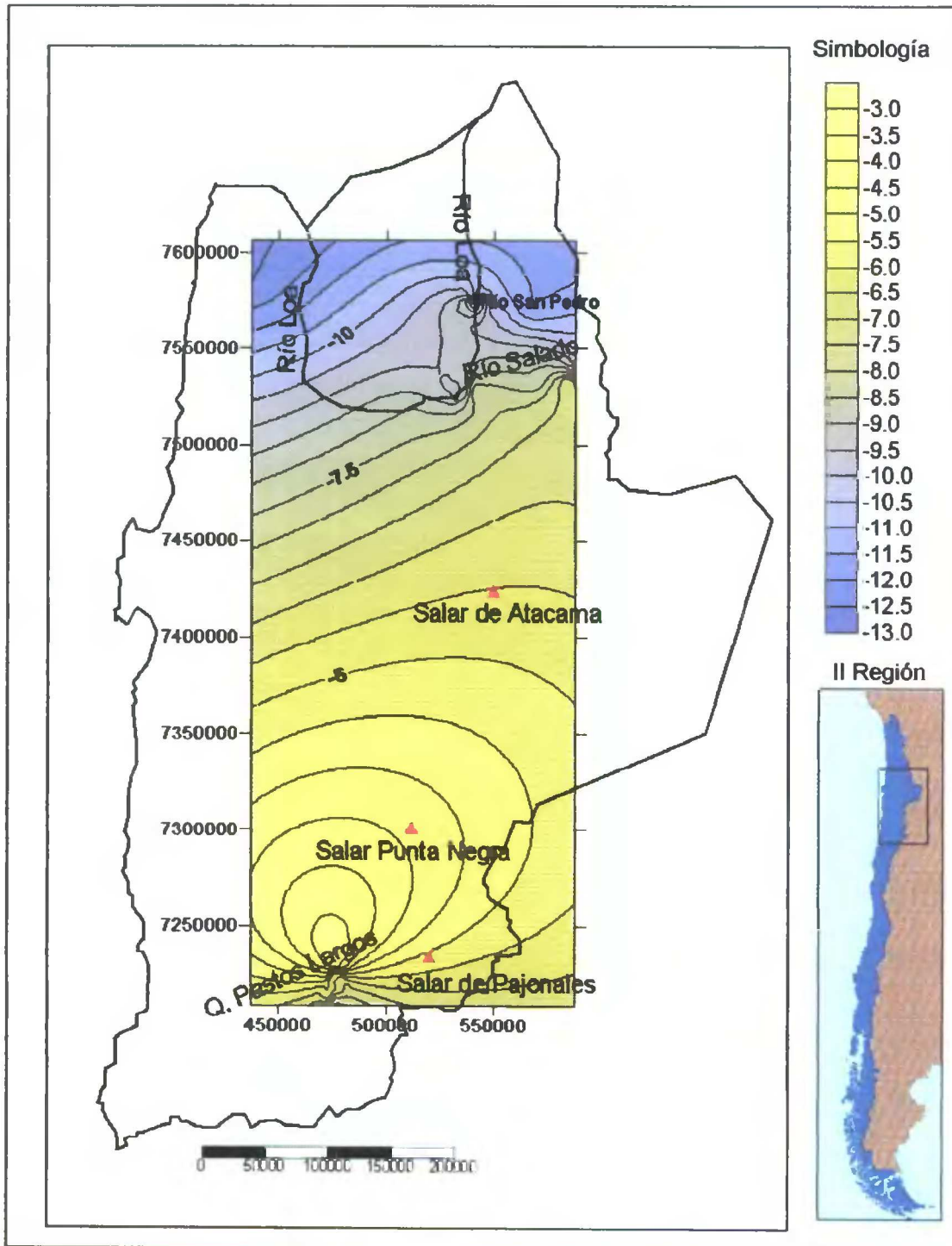
En el caso del río Loa, el río Salado parece ser un aporte al río Loa de aguas pesadas. Por otro lado, el río San Pedro aporta al río Loa aguas más livianas (-10‰ y -11 de $\delta^{18}\text{O}\text{‰}$).

En el mapa N° 9, se aprecia la distribución del contenido de oxígeno-18 en las muestras de vertientes y manantiales.

El contenido de oxígeno-18 en las muestras de vertientes en la Q. de Taltal es alto, al igual que el contenido de oxígeno-18 de las muestras de río en el mismo lugar, es decir, son aguas con un contenido de oxígeno-18 similares. Como se mencionó anteriormente estas vertientes poseen valores isotópicos similares a los de la zona de la Quebrada de Taltal.

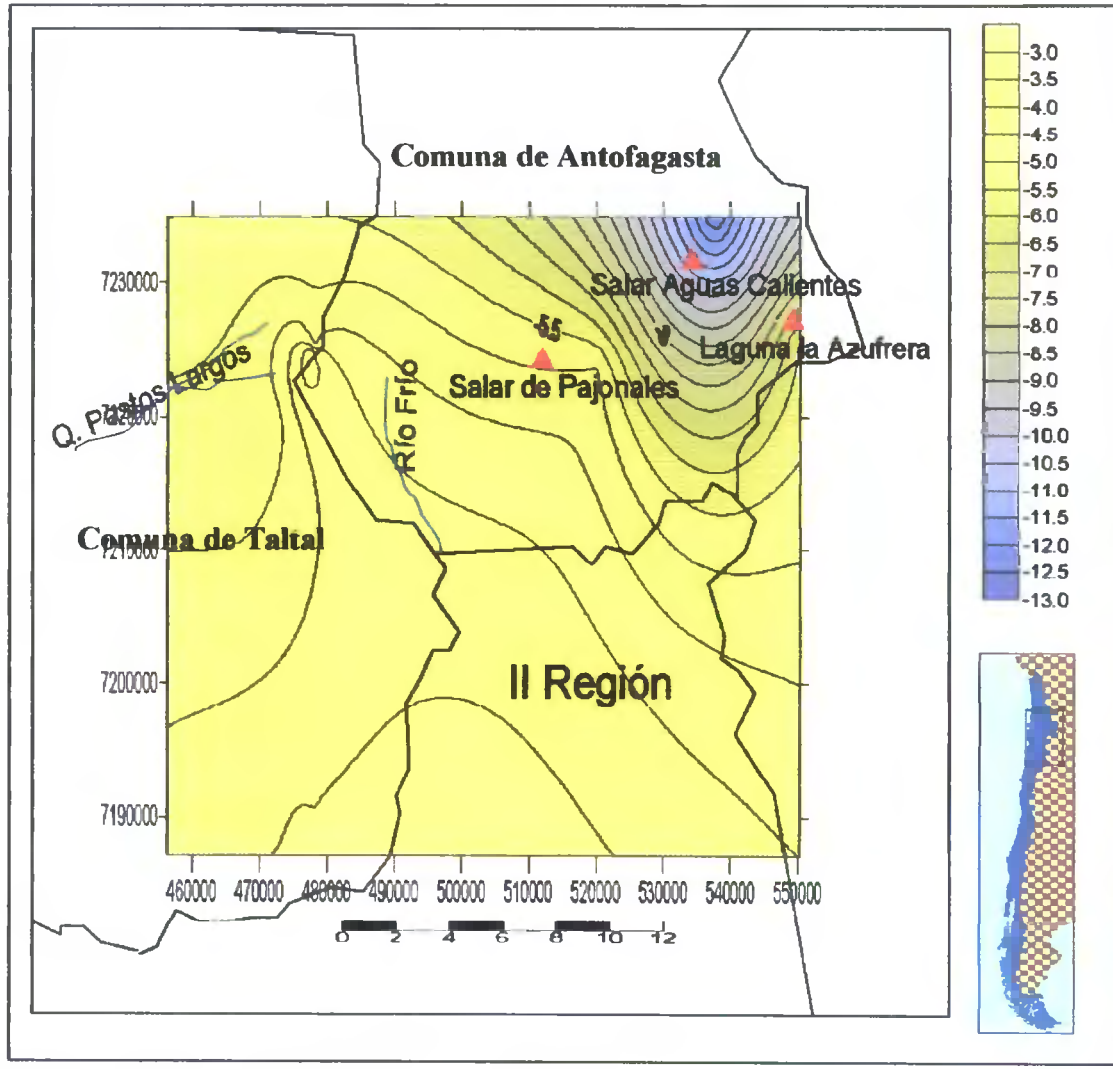
Se aprecia que el Salar de Aguas Calientes posee el valor más liviano de oxígeno-18, pero no hay suficientes muestras para explicar este comportamiento.

DISTRIBUCION CONTENIDO OXIGENO 18 EN MUESTRAS DE RIO II Región de Antofagasta



Mapa N° 8

**DISTRIBUCIÓN CONTENIDO OXIGENO 18 EN
MUESTRAS DE VERTIENTES Y MANANTIALES
II Región de Antofagasta**



Mapa N° 9

5.2.3. Aguas subterráneas

El contenido isotópico de las muestras de pozos varía entre $-0,2\text{‰}$ y -6‰ de $\delta^{18}\text{O}$ y -7‰ y -55‰ de $\delta^2\text{H}$.

Los valores de las muestras de pozos se desplazan hacia valores más altos de oxígeno-18 y más bajos de deuterio con respecto a la recta meteórica, es decir, no sigue la tendencia de la recta meteórica local.

Como se aprecia (Gráfico N° 11) las muestras ubicadas en el sector de Aguas Blancas poseen valores similares al agua del sector de Aguas Verdes (Q. el Chaco después de Q. Yervas Buenas). Este sector presenta gran variación en el contenido isotópico, entre -1‰ y -4‰ de $\delta^{18}\text{O}$ y -21‰ y -38‰ de $\delta^2\text{H}$. Hay que considerar que este sector de la Quebrada el Chaco recibe aguas de distintas Quebradas aguas arriba (Yervas Buenas, Vaquilla, Sandón).

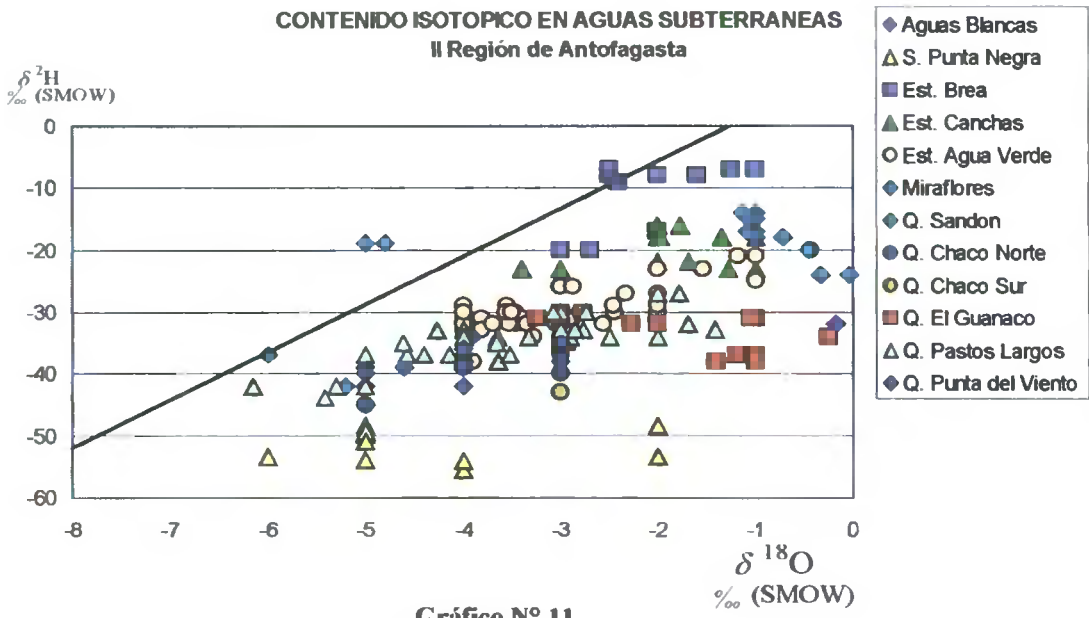
Las muestras del sector Estación Brea son las que más se acercan a la recta meteórica local. La Estación Brea es el área que está más cerca del océano de todas las otras muestras (desembocadura de la Q. de Taltal).

Las muestras del Salar de Punta Negra no corresponden al comportamiento del resto de las muestras, poseen valores de deuterio menores que las muestras del sector de la quebrada de Taltal y que del sector Aguas Blancas.

En general, las muestras de la zona de la Quebrada de Taltal muestran gran variación y poca homogeneidad, también se puede decir que las de vertientes y ríos ubicadas en la parte alta de la Quebrada de Taltal poseen similar contenido isotópico que las muestras de las aguas subterráneas de la Quebrada de Taltal.

Como se aprecia en el gráfico N° 11, las muestras se desplazan hacia valores más pesados de oxígeno-18, lo significa que estas aguas han sufrido evaporación en su recorrido antes de infiltrarse.

La variación del contenido isotópico en algunas muestras puede estar asociado a la fecha en que fueron tomadas (existen muestras del mismo punto pero de distintas fechas que contienen valores isotópicos muy diferentes).

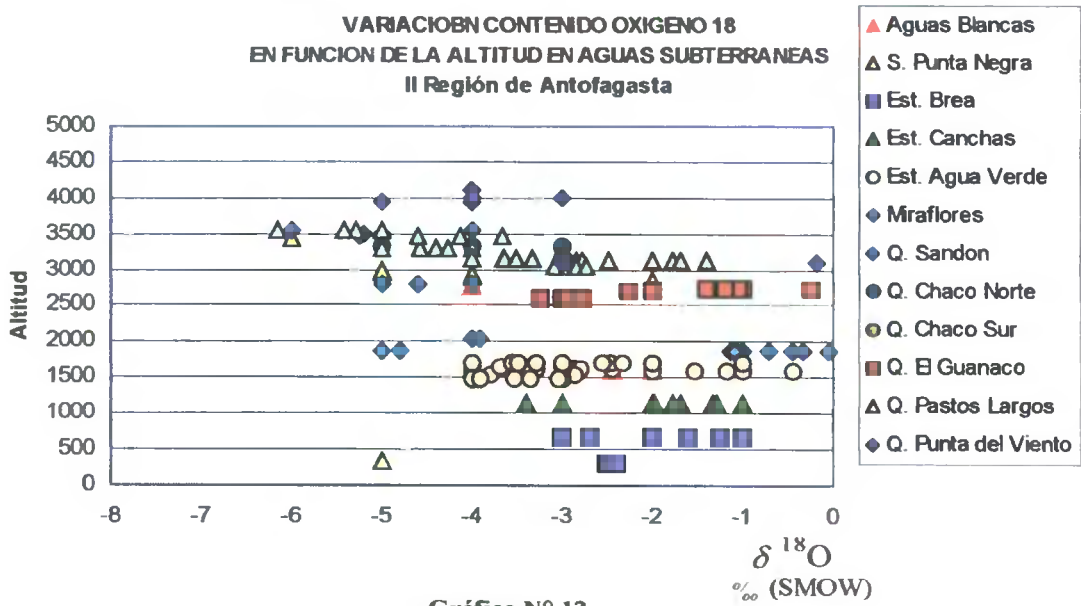


Al observar el contenido de oxígeno-18 y la altitud (Gráfico N° 12), se aprecia que muchas de las muestras corresponden a una misma altitud, es decir corresponden a muestras del mismo punto, pero con distinto contenido de oxígeno-18.

En el gráfico N° 12 se aprecia la similitud en los valores del oxígeno-18 del sector de Aguas Blancas y del sector de Aguas Blancas, las cuales se encuentran a una misma altitud.

También, las muestras de aguas subterráneas de la Quebrada de Taltal tomadas a una misma altitud poseen una gran variación en su contenido de oxígeno-18.

Las muestras del Salar Punta Negra también muestran una amplia variación en el contenido de oxígeno-18 (entre -2‰ y -6‰ de $\delta^{18}O$).

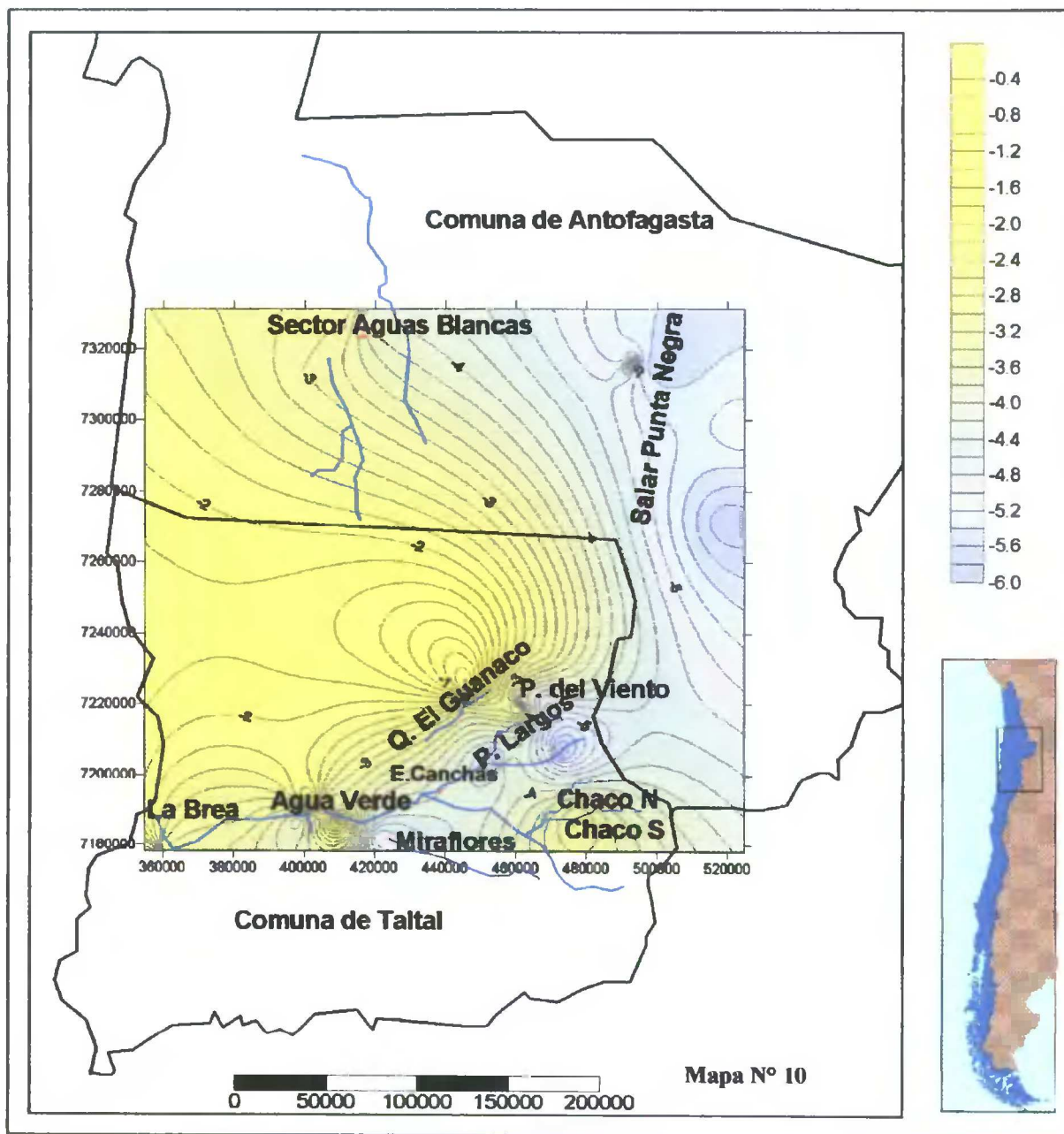


También se puede decir, que las muestras de pozo de la zona de la Quebrada Pastos Largos y Punta del Viento poseen los mismos valores isotópicos que el de la vertientes analizadas anteriormente, las cuales se encuentran aguas arribas de dichas quebradas, a los pies de la cordillera de Domeyko.

En el mapa N° 10, se aprecia la distribución del contenido de oxígeno-18 en la Región de Antofagasta., los valores de oxígeno-18 no superan los -6 ‰ de $\delta^{18}\text{O}$, y son aguas pesadas debido al proceso de evaporación.

Los sectores de Miraflores, Pastos Largos, Salar Punta Negra y Punta del Viento poseen los valores de oxígeno-18 más bajos. Hay algunos puntos en la Quebrada el Guanaco que presentan valores altos de oxígeno-18.

**DISTRIBUCIÓN CONTENIDO OXIGENO 18
EN AGUAS SUBTERRÁNEAS
II Región de Antofagasta**



5.3. Tercera Región de Atacama

En esta región las muestras recopiladas son menores que en las regiones anteriores, en total son 723 muestras de las cuales 86 poseen datos isotópicos: 2 muestras de vegas, 2 de nieve, 30 de pozos, 25 de río y 27 de vertientes. No se encontraron datos de precipitación. Estos datos recopilados fueron obtenidos principalmente de dos fuentes: "Estudio hidrogeológico

del valle del río Copiapó, segmento embalse Lautaro-Piedra Colgada, Región de Atacama”, y del estudio “Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II, III regiones Chile” realizado por la DGA.

Como se aprecia en el mapa N° 11, las muestras recolectadas están distribuidas entre el río Copiapó y los salares ubicados en la parte norte de la Cordillera de los Andes de la Tercera Región.

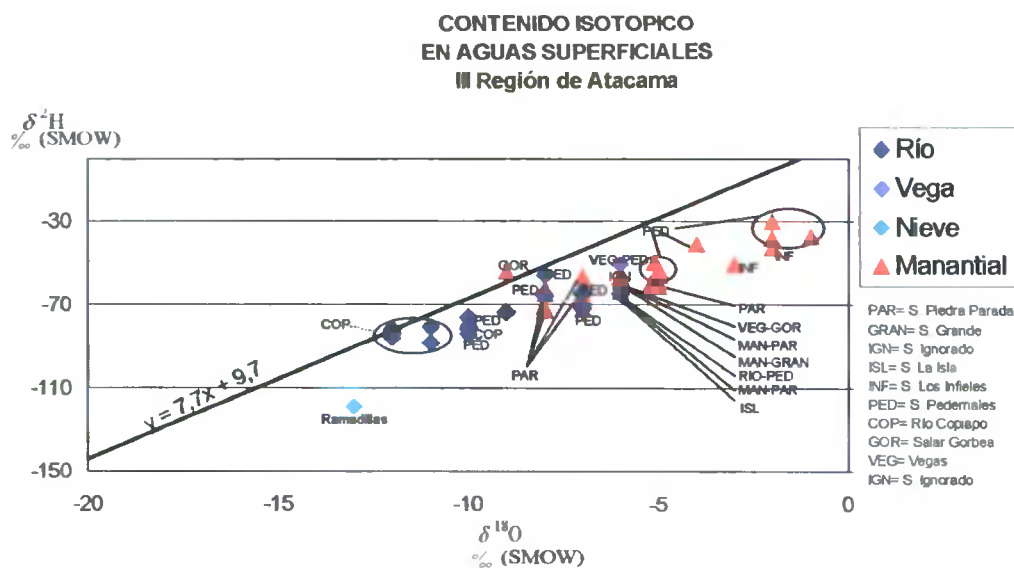
En el sector de los salares se ubican muestras de manantiales, ríos y 2 vegas, una en el Salar de Gorbea y otra vega (transformándose en río) en el sector del Salar de Pedernales. Estos salares pertenecen a las cuencas cerradas existentes en la región.

En el sector del río Copiapó hay mayor N° de muestras de pozos, y las muestras de río se ubican en el interior del río Copiapó, entre el sector de La Puerta y río Montosa. Hay una sola muestra de nieve ubicada en el sector de Ramadillas. Con esta información disponible se realizó la caracterización isotópica de la tercera Región de Atacama.

5.3.1. Aguas superficiales

Las muestras de aguas superficiales muestran variaciones entre -1‰ y -12‰ de $\delta^{18}\text{O}$, y -37‰ y -86‰ de $\delta^2\text{H}$, lo cual muestra una gran variedad en el origen de los aportes (ver gráfico N° 13).

Las muestras de manantiales, las cuales son principalmente del sector de los salares, poseen gran variación en el contenido isotópico, entre -1‰ de $\delta^2\text{H}$ y -10‰ de $\delta^{18}\text{O}$ y -37‰ de $\delta^2\text{H}$ y -77‰ de $\delta^{18}\text{O}$. Como se aprecia, el Salar de Pedernales es el que posee el mayor número de muestras de vertientes y de pozos, debido a que es el Salar y la cuenca más importante de la región. Se aprecia claramente las diferencias entre las muestras de ríos y de vertientes.



En el gráfico N° 13 las muestras de agua con mayor contenido isotópico se ubican entre los valores -1‰ y -2‰ de $\delta^{18}\text{O}$, estas muestras corresponden al Salar de Pedernales en el sector de Lagunillas, en la parte NW del salar y en el sector de la Quebrada Pastos Largos. En este mismo rango se encuentra una muestra del Salar de los Infieles es decir, corresponde a aguas isotópicamente similares.

Luego le sigue una muestra cuyo contenido isotópico es de -4‰ y -41‰ de $\delta^{18}\text{O}$, ubicada en el sector NE del salar. Más adelante se ve otro grupo ubicado entre los valores -5‰ y -5.1‰ de $\delta^{18}\text{O}$, en este mismo rango se encuentran las muestras del Salar Piedra Parada ubicadas en el sector sur de éste.

Existe un grupo de muestras que se ubican en un mismo rango de valores (entre -6‰ y -51‰ de $\delta^{18}\text{O}$ y -6‰ y -60‰ de $\delta^2\text{H}$), el Salar de Pedernales, Piedra Parada, salar Grande, el de la Isla, Salar Ignorado, la muestra de vega del Salar Pedernales y Gorbea (V. Leoncito) y una muestra de río del S. Pedernales (R. Negro) (Ver gráfico N°13). Según el gráfico, todas estas muestras tienen valores similares. También se aprecia que la muestra de vega del Salar Gorbea no se relaciona con la muestra de vertiente del Salar del mismo nombre, pero sí posee un contenido isotópico similar a la muestra de manantial del Salar Ignorado.

Aunque los manantiales de donde se sacaron las muestras del Salar Gorbea e Ignorado están relativamente cercanos (700 m) no coinciden sus valores isotópicos.

Hacia valores isotópicos más livianos se pueden encontrar otras muestras de río y vertientes del Salar Pedernales que varían entre -7‰ y -8‰ de $\delta^{18}\text{O}$ y -56‰ y -72‰ de $\delta^2\text{H}$ (ver gráfico 13).

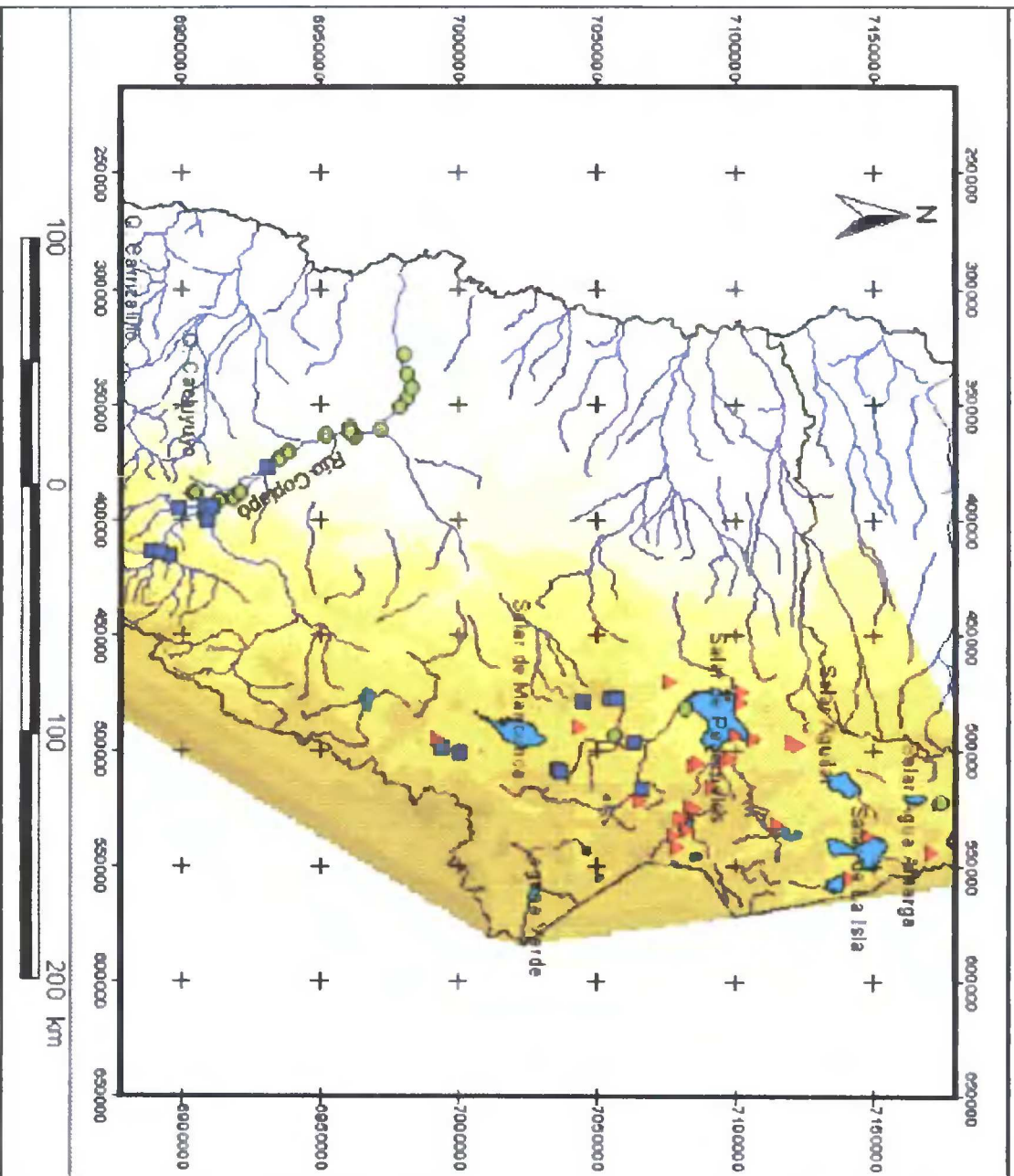
Por último las muestras del Río Copiapó poseen un contenido isotópico más liviano, entre -11‰ y -81‰ de $\delta^{18}\text{O}$ y -12‰ y -86‰ de $\delta^2\text{H}$, estos valores se alejan de los valores obtenidos en las muestras de los Salares de la Cordillera de los Andes. Sin embargo, como se aprecia en el gráfico N°13, algunas muestras del Salar Pedernales poseen valores similares a las muestras del río Copiapó.

Se puede apreciar también una muestra de nieve con un contenido de -13‰ y -119‰ de $\delta^{18}\text{O}$, esta muestra aparece muy alejada de la línea de la recta meteórica.

Los valores más bajos del río Copiapó se ubican en los ríos afluentes: Pulido, Montosa, Chacay y Manflas. La muestra ubicada en el río Jorquera posee un valor de -11‰ y -81‰ de $\delta^{18}\text{O}$, la del río Manflas -10‰ y -82‰ de $\delta^{18}\text{O}$ y la muestra entre en la junta de estos posee un valor de -11‰ y -88‰ de $\delta^{18}\text{O}$. Como se ve, se trata de aguas isotópicamente distintas a lo largo de río y sus afluentes, esto se explicaría por el aporte de variadas fuentes o de precipitaciones con diferentes contenidos isotópicos.

DISTRIBUCION DE MUESTRAS CON DATOS ISOTOPICOS

III Region de Atacama



SIMBOLOGIA

Tipo muestra

- Muestras de pozo
- ▲ Muestras de vertiente
- Muestras de río

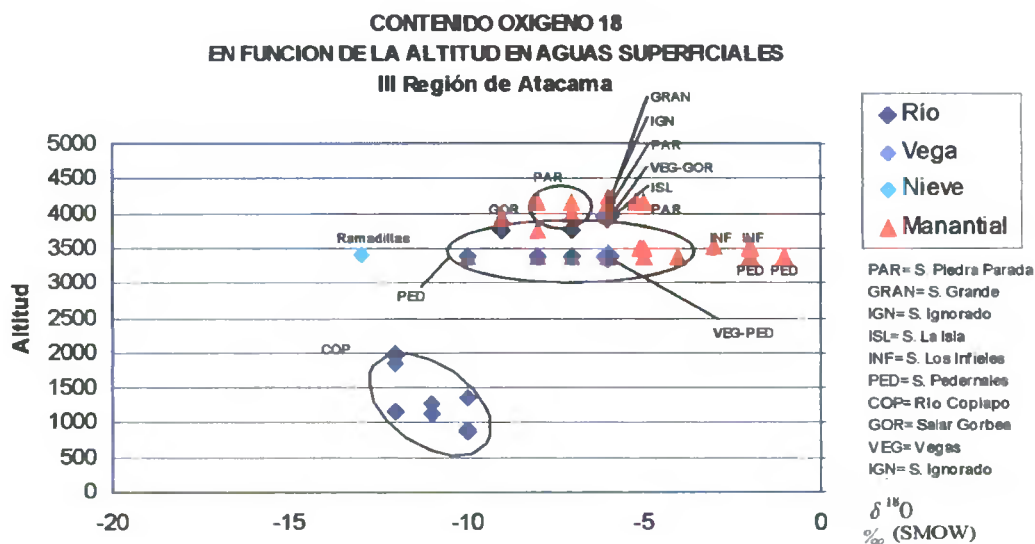
Altitud (m s n m)

- 0 - 739
- 739 - 1479
- 1479 - 2218
- 2218 - 2958
- 2958 - 3697
- 3697 - 4437
- 4437 - 5176
- 5176 - 5916
- 5916 - 6655

- Salares y lagunas
- Lim Regional
- Ríos y quebradas

Fuente de Datos: DGA
Año: 2004

Mapa Nº 11



Al realizar una comparación entre la altitud de las muestras y el contenido de oxígeno-18 (Gráfico N°14) podemos ver la variación del contenido de oxígeno-18 de los salares a una misma altitud, lo cual indica distintos aportes o que dichas aguas superficiales sufren distintos procesos al aflorar.

Se aprecia que los valores de oxígeno-18 de algunas muestras de los Sales Pedernales y P. Parada coinciden en algunos rangos.

El rango de variación en el contenido de oxígeno-18 del Salar Pedernales está dentro de los valores de oxígeno-18 del resto de los salares, en cambio sólo algunos de estos salares más pequeños se relacionan isotópicamente entre ellos, como es el caso del Salar Grande, Parado y Salar La Isla.

En las muestras del río Copiapó (Gráfico N° 14) se aprecia que hay una relación entre la altitud y el contenido de oxígeno-18. A medida que va disminuyendo la altitud las aguas se tornan más pesadas.

Con respecto a la distribución del contenido de oxígeno-18, en el mapa N° 12 se puede apreciar que las muestras más pesadas son las presentes en el sector del Salar de Gorbea, Salar La Isla, Salar. Piedra Parada y el sector del río Juncal.

Se aprecia también cómo el Salar de Pedernales muestra una gran degradación de colores debido a la variación en el contenido de oxígeno-18 de las muestras utilizadas. Los extremos del S. Pedernales muestran diferentes tendencias isotópicas.

El Salar Los Infieles, la Laguna Lagunilla y el sector NW del Salar Pedernales muestran un contenido de oxígeno-18 similar, formando un área con similares valores. Algo parecido sucede con los sectores del Salar de Gorbea hasta el sector del río Juncal, éstos forman un área similar en contenido de oxígeno-18.

De acuerdo al mapa N° 12, los manantiales ubicados en el sector SW del Salar Pedernales son los que poseen mayores valores de oxígeno-18.

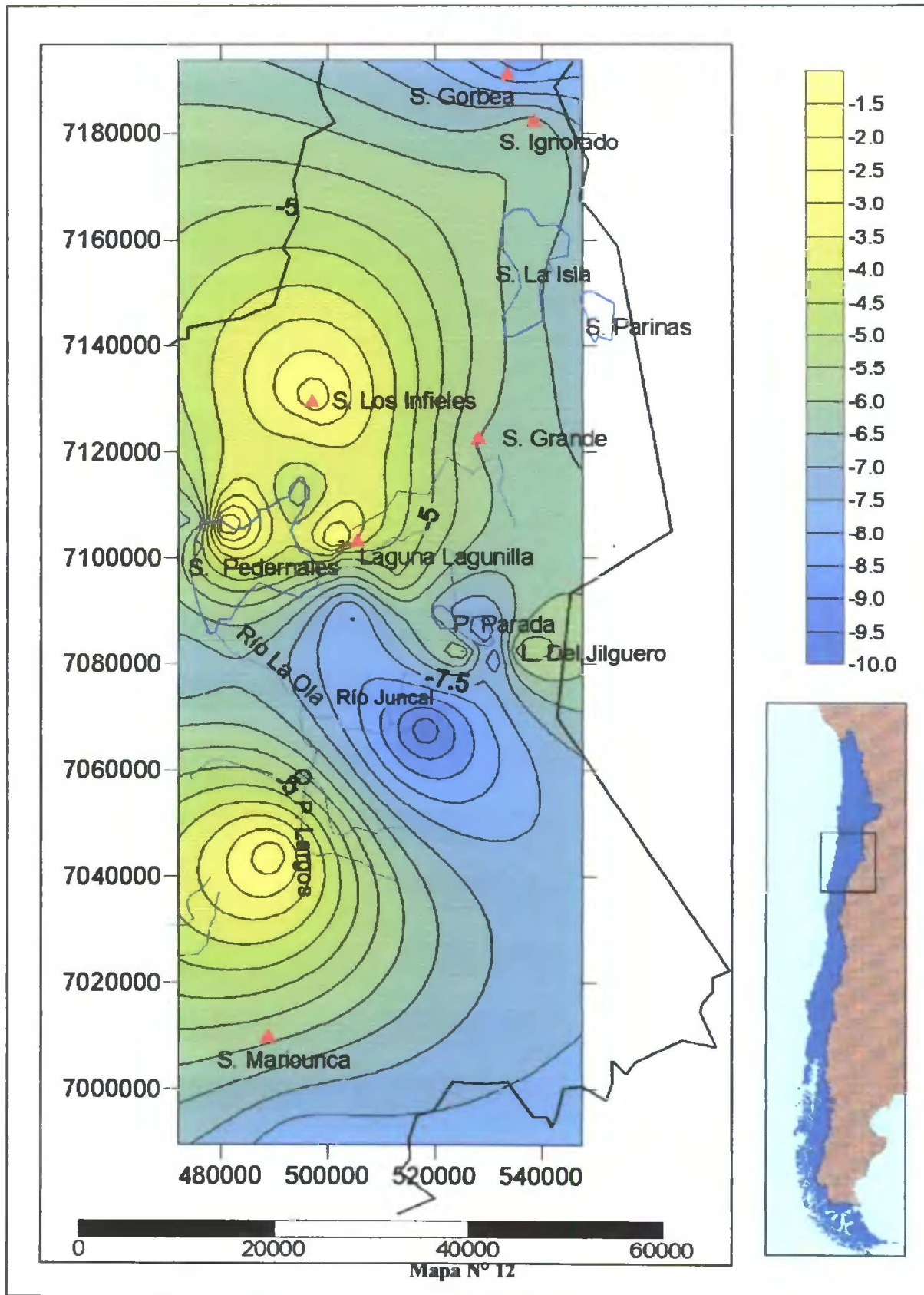
El Salar de Piedra Parada en su parte SW presenta un contenido de oxígeno-18 más pesado que el resto del salar al igual que la laguna El Jilguero ubicada al Este de este Salar.

Con respecto a la distribución de oxígeno-18 en muestras de río, en el mapa N° 13 se aprecia que en el sector del Salar de Pedernales los valores de oxígeno-18 varían entre -7‰ y -10‰ de $\delta^{18}\text{O}$, siendo el sector del río Juncal el que presenta el contenido de oxígeno-18 más pesado y el sector de la Quebrada Pastos Largos valores más livianos.

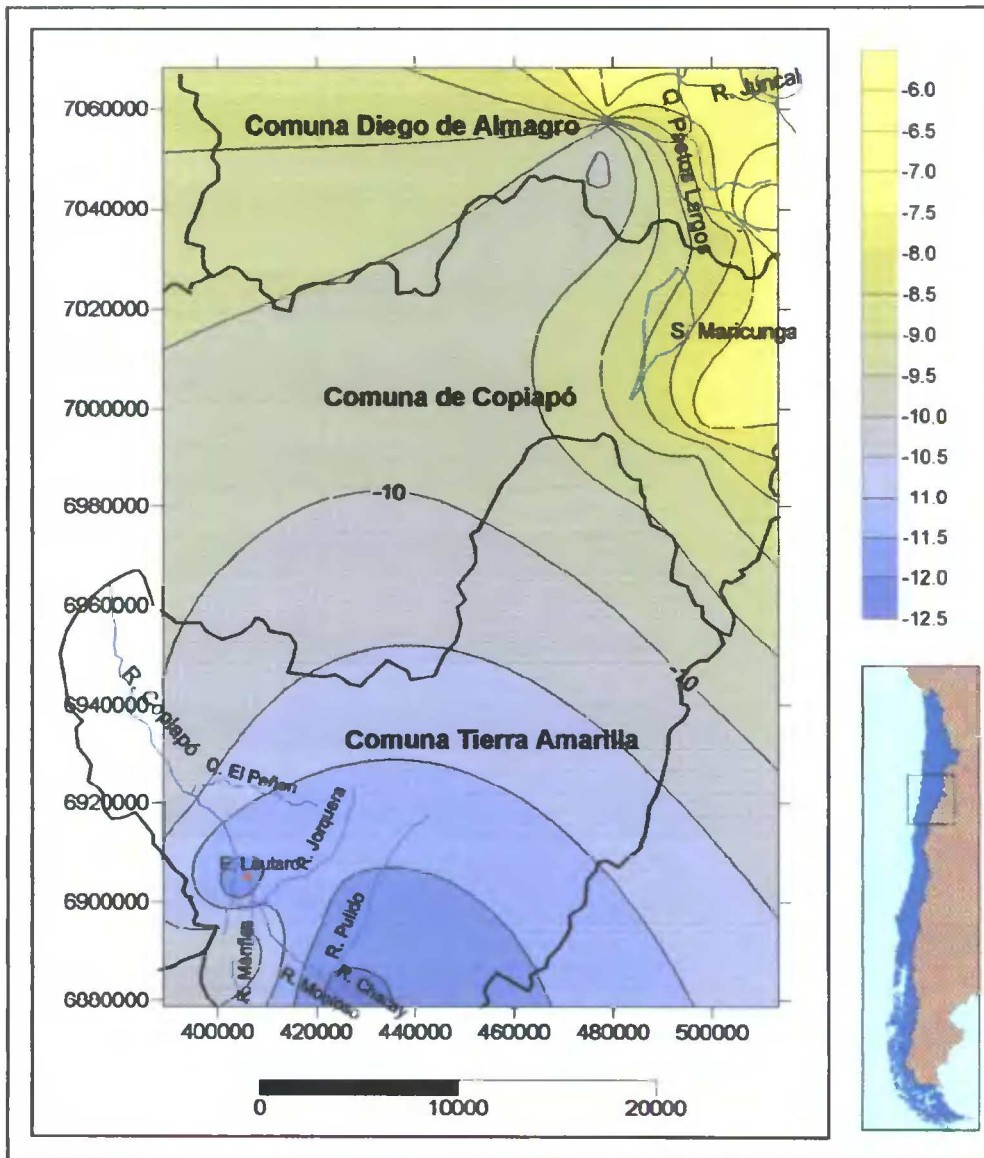
Si comparamos el mapa N° 12 y el mapa N° 13 para el mismo sector, se aprecia que los valores de oxígeno-18 de los manantiales allí existentes corresponden a los valores de oxígeno-18 de los ríos del mismo sector.

Con respecto al sector del río Copiapó se aprecia una leve tendencia a aumentar el contenido de oxígeno-18 en dirección a la costa, a excepción de algunos núcleos que diferente contenido de oxígeno-18.

**DISTRIBUCIÓN CONTENIDO OXIGENO 18
EN MUESTRAS DE MANANTIALES
III Región de Atacama**



**DISTRIBUCIÓN CONTENIDO OXIGENO 18
EN MUESTRAS DE RIO
III Región de Atacama**



Mapa N° 13

5.3.2. Aguas subterráneas

Las muestras de aguas subterráneas corresponden específicamente a muestras de pozo, ubicadas principalmente en el sector del río Copiapó y algunas muestras en el sector de los salares en la Cordillera de los Andes.

Como se aprecia en el gráfico N° 15, las muestras de pozos se alejan progresivamente de la recta meteórica, lo cual indica que las aguas en su recorrido sufren procesos de evaporación antes de infiltrarse.

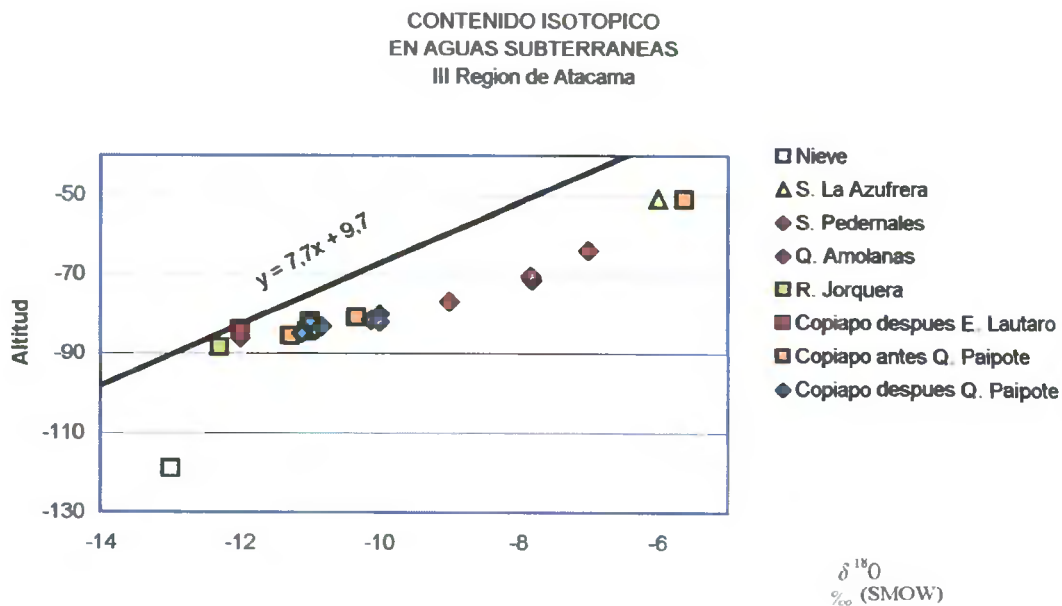
Por otro lado, se aprecia la gran variación en el contenido isotópico en el sector del río Copiapó, este varía entre -5‰ y -51‰ de $\delta^{18}\text{O}$ y -12‰ y -88‰ de $\delta^2\text{H}$.

Siguiendo en dirección a la costa, las muestras en el gráfico N° 15 están separadas por secciones del río. Los valores isotópicos más pesados (-12‰ y -84‰ de $\delta^{18}\text{O}$ y -12.3‰ y -88.4‰ de $\delta^2\text{H}$) se encuentran entre los sectores del río Jorquera, parte baja de la Quebrada Amolanas y las muestras ubicadas después del embalse Lautaro.

Respecto a la Quebrada Amolanas, en el gráfico N° 15 se aprecia una gran variación en sus contenidos isotópicos.

Las muestras del sector anterior a la Quebrada de Paipote y las de después de la Quebrada de Paipote, presentan dos tipos de aguas, entre -10.83‰ y -83.1‰ de $\delta^{18}\text{O}$ y -11.28‰ y -85.4‰ de $\delta^2\text{H}$ y -10‰ y -81‰ de $\delta^{18}\text{O}$ y -10.33‰ y -80.9‰ de $\delta^2\text{H}$.

En las muestras del sector anterior a la Quebrada de Paipote se aprecia que existe una muestra con un contenido isotópico muy pesado (-5‰ y -51‰ de $\delta^{18}\text{O}$) que corresponde a la mina Carola y no tiene relación con el contenido isotópico de las demás muestras de ese sector. Las muestras de pozos del sector de los salares presentan valores relativamente más pesados.



Si comparamos el contenido de oxígeno-18 con la altitud de las muestras (Gráfico N° 16), se aprecia que existe cierta relación entre altitud y contenido de oxígeno-18. A medida que disminuye la altitud, disminuye el contenido de oxígeno-18, en el recorrido hacia el mar las aguas del río Copiapo y sus afluentes se van evaporando, lo cual aumenta su contenido de oxígeno-18.

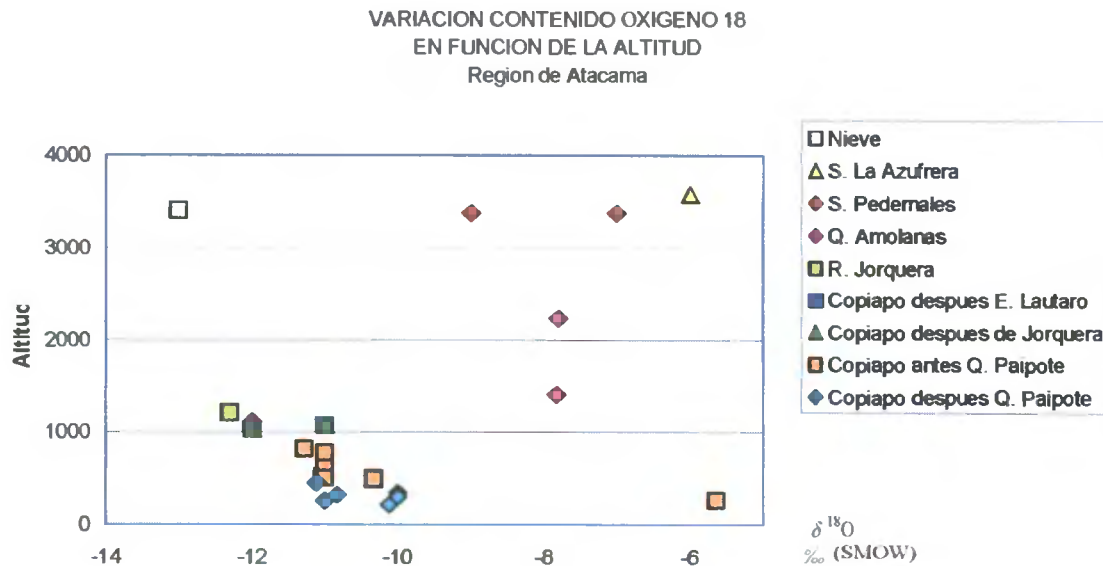


Gráfico N° 16

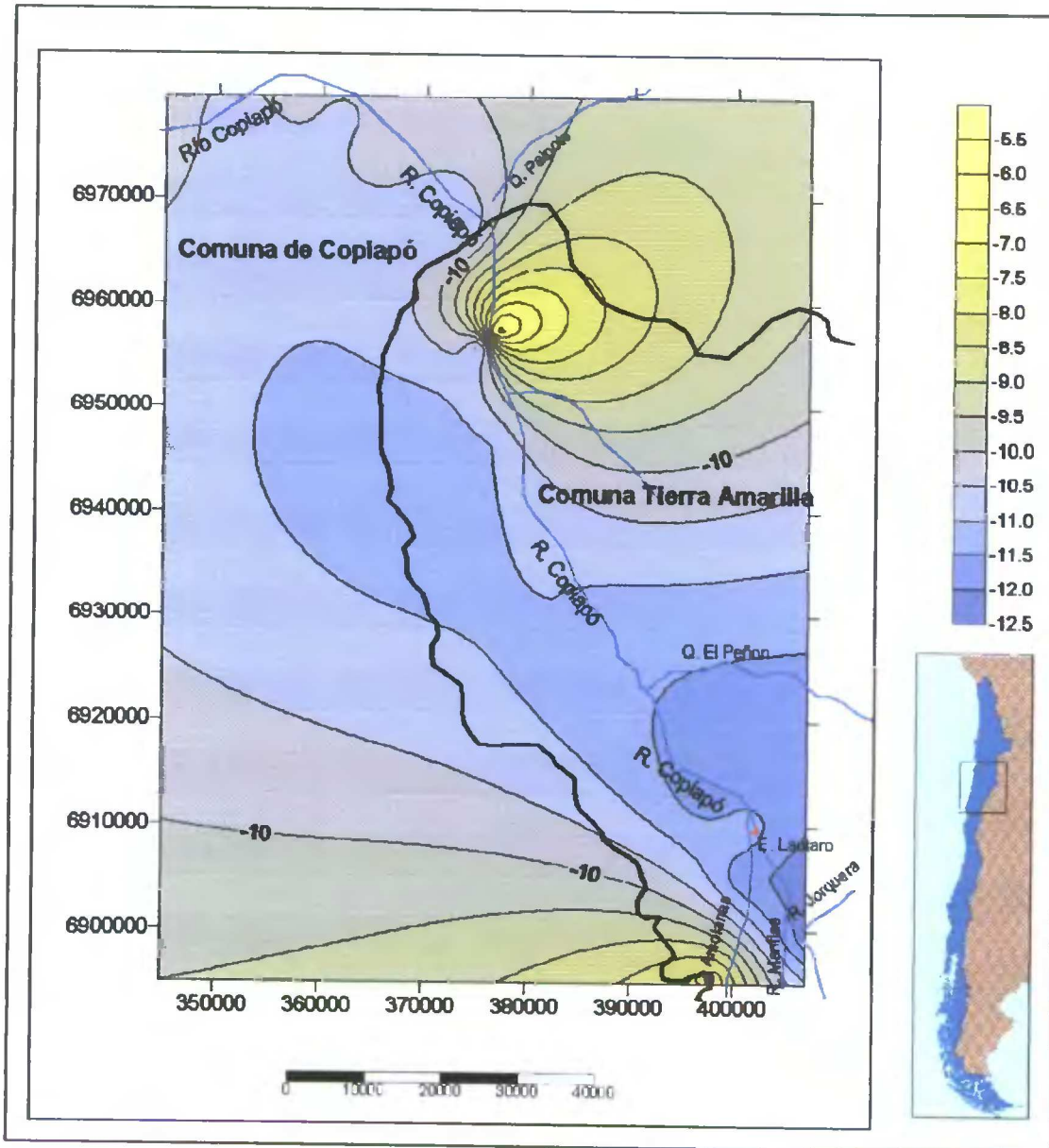
En la Quebrada Amolanas también se pueden ver dos muestras que poseen valores de oxígeno-18 más elevados, estas muestras se encuentran a mayor altura, por lo que se aprecia afectada su composición isotópica.

Con respecto a la distribución del contenido de oxígeno-18 en las muestras de pozos, el mapa N°14 muestra gran variación en los contenidos de oxígeno-18. Se aprecia claramente como en la Quebrada Amolanas se presentan valores de oxígeno-18 elevados en la parte más alta de la Quebrada. El tramo R. Jorquera-Quebrada El Peñón muestra valores de oxígeno-18 bajos (-12 ‰ y -11 ‰ de $\delta^{18}O$).

Antes de llegar a la Quebrada de Paipote el contenido de oxígeno-18 va disminuyendo, sin embargo, se ve claramente un centro de alto contenido de oxígeno-18 (-5 ‰ de $\delta^{18}O$) en una zona donde el oxígeno-18 varía entre -10 ‰ y -11 ‰ de $\delta^{18}O$.

Después de la Quebrada de Paipote, el contenido de oxígeno-18 también varía entre -10 ‰ y -11 ‰ de $\delta^{18}O$. En estos dos últimos tramos las aguas subterráneas parecen mezclarse entre dos tipos, desde el punto de vista isotópico.

DISTRIBUCIÓN OXIGENO 18 EN AGUAS
SUBTERRÁNEAS, SECTOR DEL RIO COPIAPO
III Región de Tarapacá



Mapa N° 14

5.4. Cuarta Región de Coquimbo

Los datos recopilados para esta región son extremadamente escasos en comparación con las demás regiones, las cuales cuentan con una gran variedad de información.

Los datos recopilados pertenecen principalmente a la Quebrada Los Choros, ubicada en la comuna de La Higuera. Son 6 muestras (Ver mapa N° 15), 4 de pozos y 2 de vertientes,

ubicadas entre la desembocadura de la quebrada Los Choros y el poblado de Pajaritos. En el mapa N° 15 se aprecia la ubicación de dichos puntos.

5.4.1. Aguas subterráneas y superficiales

Debido a la escasez de estos datos las muestras de pozos y vertientes se trataran conjuntamente.

Como se aprecia en el gráfico N° 17 ninguna de las muestras se acerca a la recta meteórica local, a excepción de la muestra de pozo CH-41, ubicada en la desembocadura del la Quebrada de los Choros Altos, el resto de las muestras se desvían hacia un valor mayor de oxígeno-18, a excepción de la muestra de vertiente CH-41 la cual se desvía hacia una cantidad mayor de deuterio.

Las muestras T-PC-1 y CH-1 muestran un contenido isotópico similar, aunque están ubicadas a distintas altitudes y distancia de la Costa. La muestra LH-2 es la más pesada. El Afloramiento ubicado arriba del poblado Pajaritos presenta el valor isotópico más bajo. Si comparamos los valores de oxígeno-18 con la altitud (Gráfico N° 18), podemos ver que éste punto es el que se encuentra a mayor altitud (1.000 m s.n.m.).

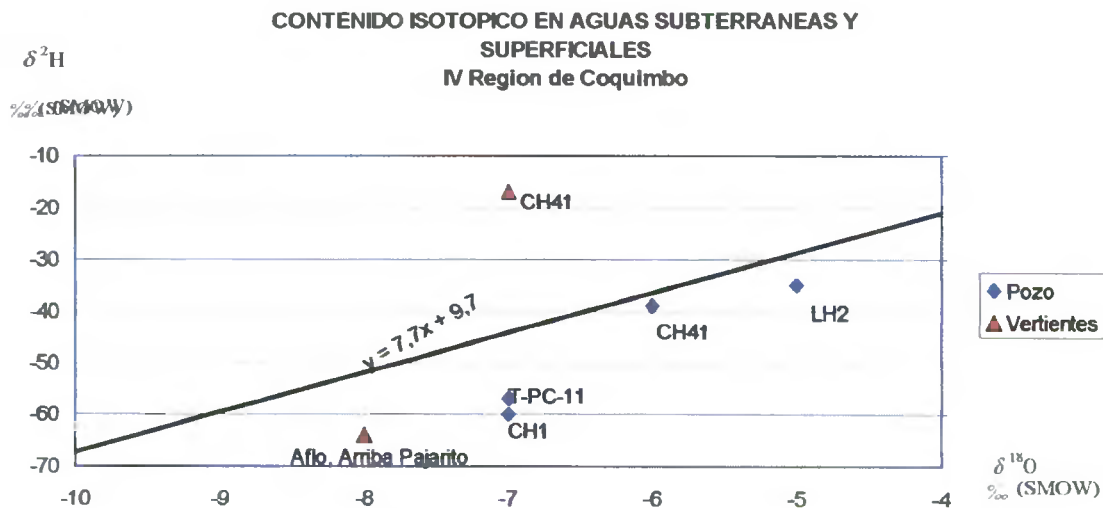
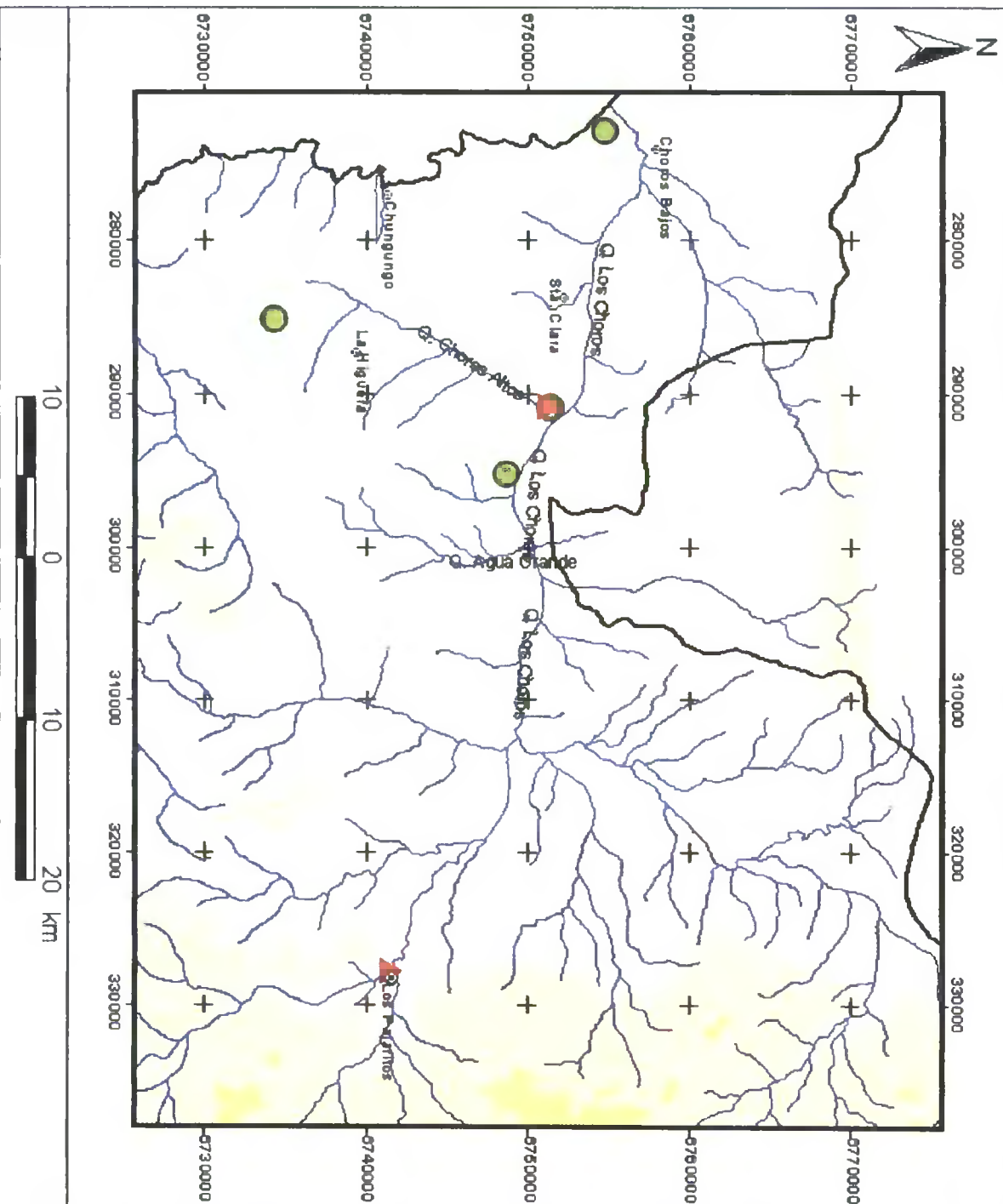


Gráfico N° 17

DISTRIBUCION DE MUESTRAS CON DATOS ISOTOPICOS

IV Region de Coquimbo



SIMBOLOGIA

- Tipo muestra**
- Muestras de pozo
 - ▲ Muestras de vertiente
- Altitud (m.s.n.m.)**
- 0 - 746
 - 746 - 1493
 - 1493 - 2240
 - 2240 - 2986
- Limite regional**
- Rios y quebradas**

Región de Coquimbo



Fuente de Datos: DGA
Año: 2004

En el gráfico N° 18 se muestra cómo las muestras LH-2, CH-41 y CH-1 a medida que aumentan en altitud se van enriqueciendo de oxígeno-18, sin embargo el afloramiento ubicado arriba de Pajaritos no cumple esta condición.

Las muestras T-PC-1, vertiente CH-41 y CH-1 poseen similares contenidos isotópicos, según el gráfico 18.

Cabe destacar que la escasez de datos es un impedimento para una caracterización más abundante y hay que considerarlo como una limitante

En el mapa N° 16 se puede ver con mayor claridad la distribución del contenido de oxígeno-18. Hay que destacar que la interpolación realizada para hacer este mapa puede que no sea del todo representativa a causa de la falta de datos.

El sector de la Higuera (LH2) representa un aporte de aguas ricas en oxígeno-18, la vertiente CH-41 localizada en la desembocadura de la Quebrada los Choros Bajos posee el mismo valor isotópico que el agua subterránea de la muestra LH-2 sin embargo, la muestra de agua LH2 posee un contenido de oxígeno-18 más cercano a la muestra de agua subterránea CH-41 que a la muestra de vertiente CH-1. Estas dos últimas muestras están ubicadas en la misma zona.

Como se ve en el mapa, la muestra de vertiente CH-41 posee un similar valor de oxígeno-18 que la muestra de pozo T-PC-11 (-7‰ de $\delta^{18}\text{O}$).

La muestra de pozo CH-1 también se encuentra en el mismo rango de oxígeno-18 que las muestras anteriores.

La muestra de vertiente del sector Pajaritos es la que presenta menor valor de oxígeno-18, si se diera la relación que se ha dado en las otras muestras vertientes y ríos de las otras regiones, debería aumentar el contenido de oxígeno-18 a medida que se las aguas avanzan hacia la costa ya que se van evaporando, pero la falta de datos no permiten hacer esta conclusión.

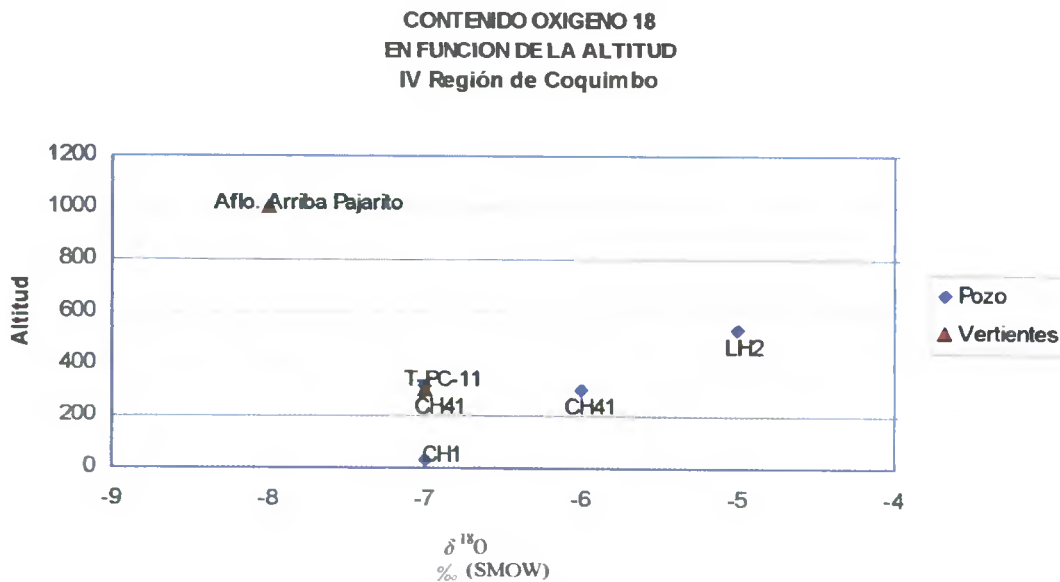
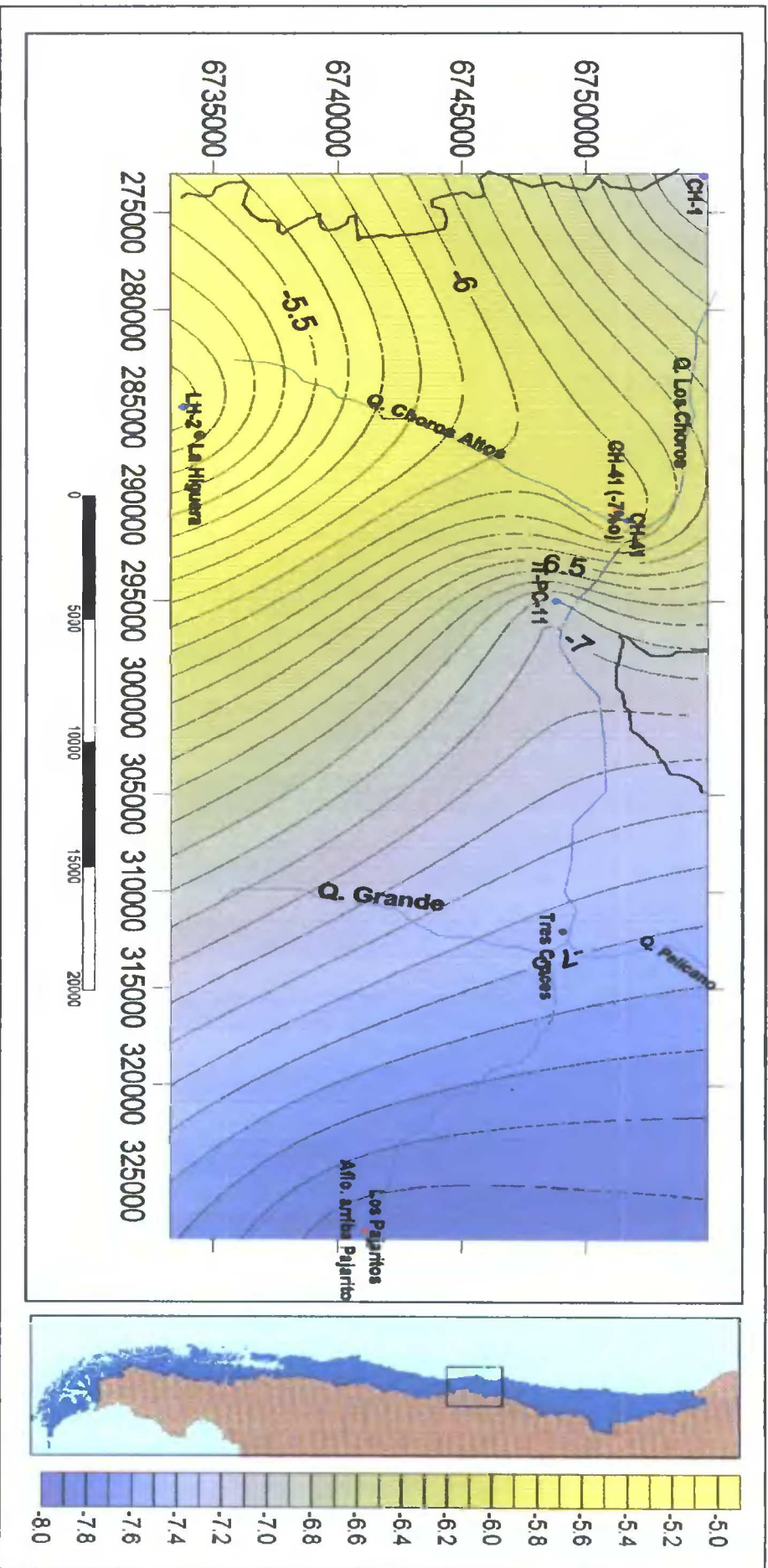


Gráfico N° 18

**DISTRIBUCIÓN CONTENIDO OXIGENO 18
EN MUESTRAS DE POZO Y VERTIENTES
IV Región de Coquimbo**



Mapa N° 16

6. CARACTERIZACION QUÍMICA

Las características físico-químicas de las aguas, tanto superficiales como subterráneas son otra forma de proveer información acerca de la distribución de los elementos y su evolución temporal y espacial al igual que las técnicas isotópicas. Con la combinación de estas dos técnicas es posible realizar un completo análisis de las aguas superficiales y subterráneas. Por esta razón es muy importante realizar una caracterización química del área de estudio en donde se determinarán los tipos de aguas de cada región y la cantidad de Sólidos Totales Disueltos. Las muestras utilizadas presentan un error de balance menor al 10%.

6.1. Primera Región de Tarapacá

Los datos utilizados para la caracterización química de esta región son los macroelementos presentes en el agua. La cantidad de muestras que poseen un error de balance de menor a 10% y corresponden a 967 muestras de las cuales 244 son de pozos y 823 corresponden a aguas superficiales. Las muestras se distribuyen homogéneamente en la región, concentrándose principalmente en el Lago Chungará, Salar del Huasco, Salar de Coposa y el Salar Pintados.

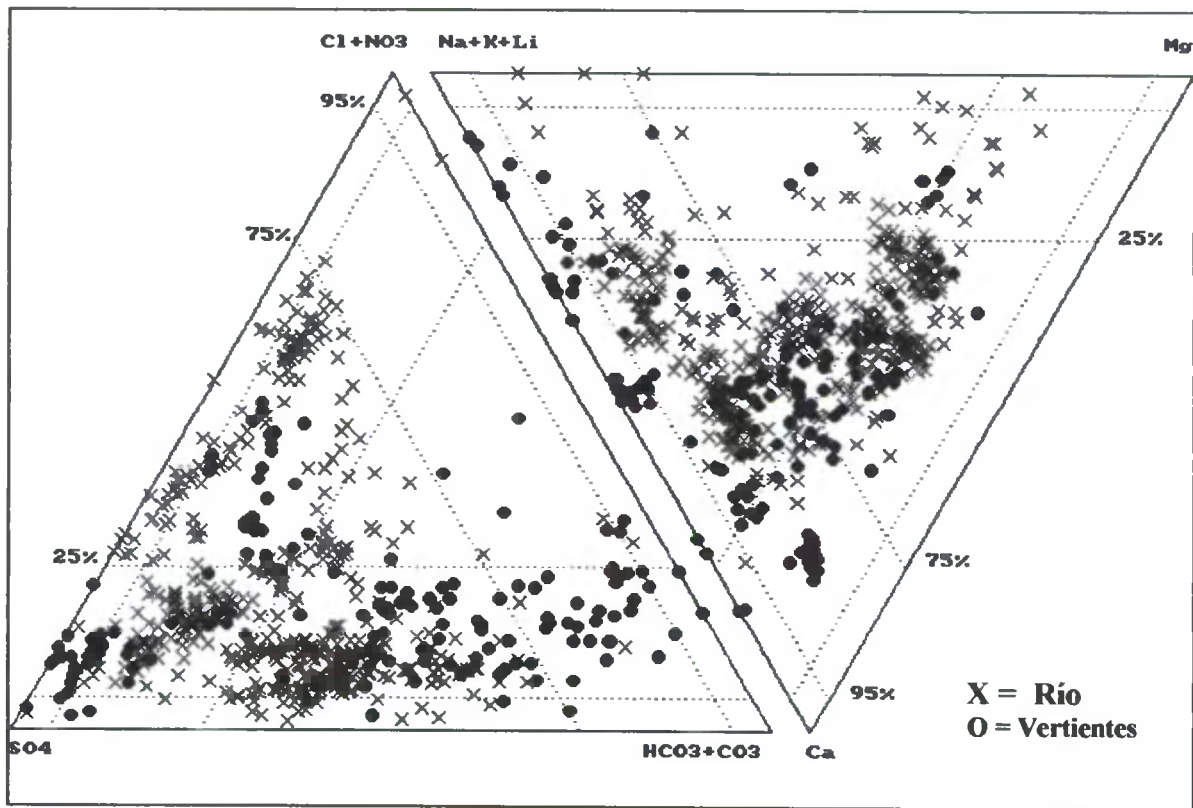
6.1.1. Aguas superficiales

Las muestras de aguas superficiales de la Región de Antofagasta corresponden a vertientes y ríos. Como se aprecia en el diagrama triangular (fig. N° 6) las muestras de vertientes se agrupan hacia mayores cantidades de SO_4 y HCO_3 , a excepción de algunas muestras que presentan una tendencia hacia el $Cl-SO_4$, las muestras que presentan una alta concentración de Cl corresponden a los sectores de la Quebrada San José, Salar de Surire y Salar Coposa. Se puede decir entonces que existen principalmente dos tipos de aguas; una con mayor cantidad de SO_4 y otra con mayor cantidad de HCO_3 . Con respecto a las muestras de ríos se aprecia claramente una tendencia a SO_4 y Cl , a excepción de algunas muestras que se ubican cercanas a HCO_3 y corresponden a muestras de ríos del altiplano. En el triángulo de los cationes se aprecia una distribución homogénea entre las muestras de ríos y vertientes. Sin embargo, algunas muestras de vertientes se acercan en mayor medida al Ca . En general las muestras se agrupan en su mayoría al centro del triángulo con algunas tendencias hacia Na y Mg en algunas muestras de ríos. En la tabla N° 1 se aprecia el resumen de los tipos químicos encontrados en las muestras de aguas superficiales.

Tabla N° 1. TIPO QUÍMICO. I REGION

Fuente	Tipo químico	N° de muestras
Vertientes	Ca/ HCO_3	49
	Ca/ SO_4	55
	Na/ SO_4	32
	Na/ HCO_3	8
Ríos	Ca/ SO_4	203
	Mg/ SO_4	135
	Na/ Cl	71
	Na/ SO_4	28
	Ca/ HCO_3	25
	Mg/ HCO_3	19

Fig. N° 6. TIPO QUÍMICO AGUAS SUPERFICIALES



6.1.2. Aguas subterráneas

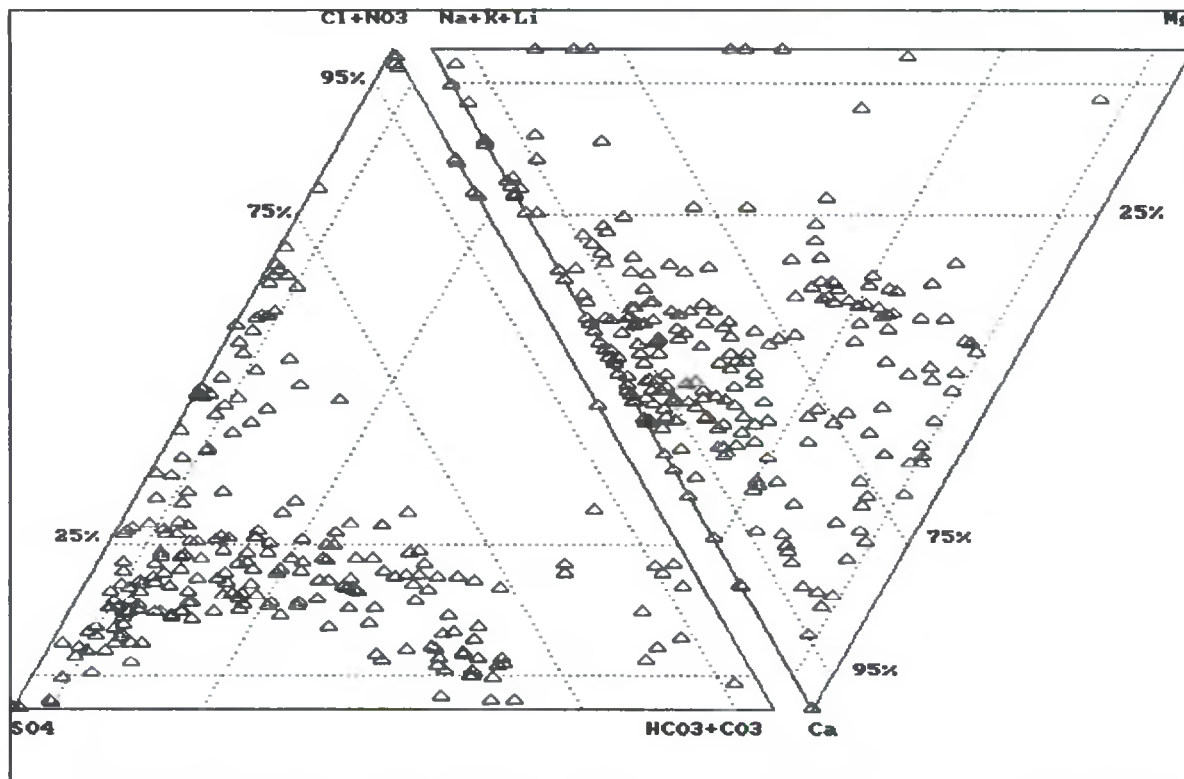
Las muestras de aguas subterráneas de la región de Antofagasta se concentran principalmente en el sector del Salar de Pintados y sector de Pica. Como se aprecia en la figura N° 7, en el triángulo de los aniones las muestras de pozo se concentran principalmente hacia mayores cantidades de SO₄. Algunas muestras se agrupan cercanas al HCO₃ y Cl. Es decir, los aniones que predominan son SO₄ y HCO₃ al igual que en las muestras de aguas superficiales tratadas anteriormente.

En el triángulo de cationes sin embargo, las muestras se acercan a Na y Ca principalmente, el Mg se mantiene constante, es decir, los tipos de cationes que predominan son el Na y el Ca. En general los tipos químicos asociados a los datos recopilados son los siguientes:

Tabla N°2. TIPO QUÍMICO POZOS

Fuente	Tipo químico	N° de muestras
Pozo	Ca/SO ₄	93
	Na/SO ₄	62
	Ca/HCO ₃	29
	Na/Cl	18
	Mg/HCO ₃	11
	Na/HCO ₃	11
	Ca/Cl	9
	Mg/SO ₄	8
	Mg/Cl	3

Fig. N° 7. TIPO QUÍMICO
AGUAS SUBTERRANEAS



Como se dijo anteriormente los tipos químicos que predominan son el Ca/SO₄, Na/SO₄, Ca/HCO₃ y en menor medida Na/Cl, los demás componentes aparecen sólo en algunas muestras.

En general las muestras de pozos son aguas principalmente calcicas-sulfatadas, sódicas sulfatadas y calcicas-alcalinas.

Los componentes que se presentan en menor porcentaje son el Mg y el Cl como se aprecia en la figura N°7 y en la tabla N°2.

Con respecto a los STD, esta región presenta salinidades que varían entre 0,1 y 370.000 mg/l, las cuales llegan a ser muy altas. Hay que tener en cuenta que la salinidad del mar es de 35.000 mg/l, y las salinidades de las muestras, en su mayoría pertenecen a salares. En el gráfico N°19, se aprecia el número de muestras de aguas subterráneas y superficiales existentes en cada rango de salinidades. La mayor frecuencia de salinidades se da en las muestras de pozos en el rango de STD de 2000 a 3000 mg/l, lo cual comprende a 39 muestras, en las muestras de vertientes se da la mayor frecuencia en el rango de 400 a 500 mg/l de STD en 23 muestras, y en las de río la mayor frecuencia se da en el rango de 200 a 300 mg/l de STD en 7 muestras.

Las aguas subterráneas suelen tener un alto nivel de salinidad debido al recorrido de los flujos de agua por suelos ricos en sales, antes de infiltrarse. Por lo mismo, las muestras de vertientes presentan también valores de STD altos. En el gráfico N°19 se puede ver que hay un alto número de muestras de vertientes en rangos elevados de STD.

SALINIDAD DE AGUAS SUBTERRANEAS Y SUPERFICIALES
I Región de Tarapacá

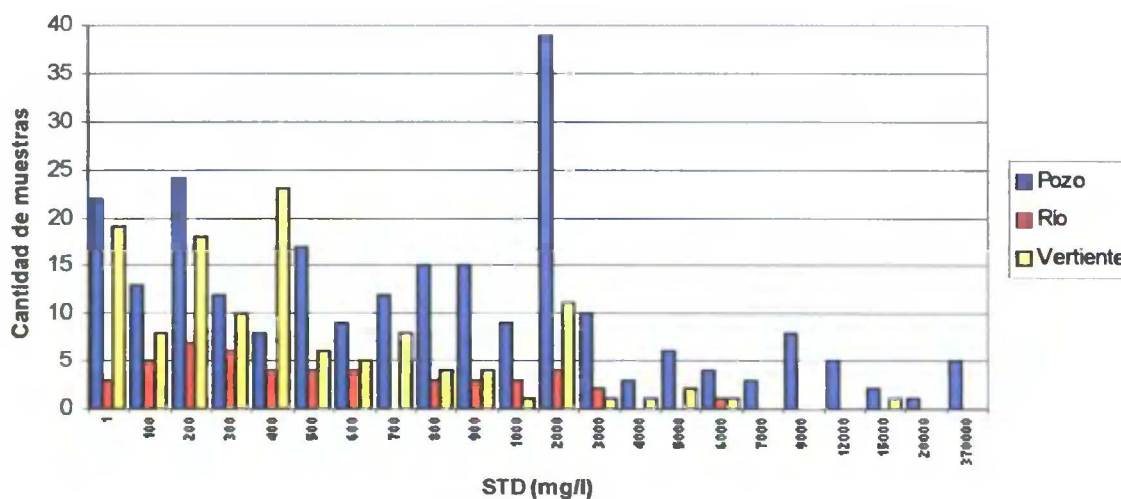


Gráfico N° 19

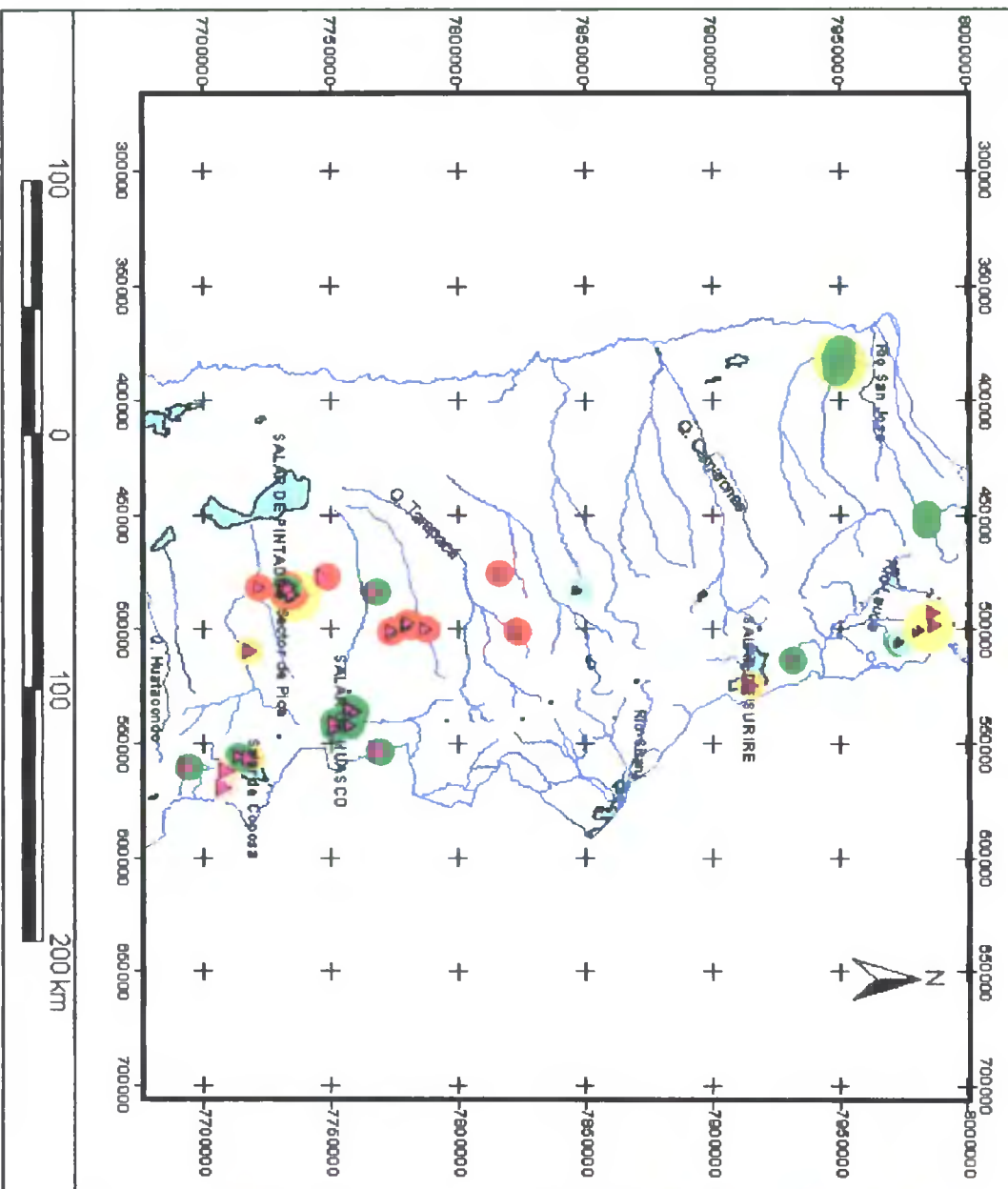
En los mapas N° 17, 18, 19 se aprecia la distribución de los sólidos totales disueltos y el tipo químico de las muestras. Las muestras que no poseen tipo químico significan que el error de balance es mayor a 10%. En el mapa se encuentran localizadas las muestras de pozos, ríos y vertientes con sus respectivas salinidades (STD) y sus tipos químicos.

Con respecto a las vertientes, se puede decir que en general las muestras de tipo sodicas-sulfatadas poseen STD bajos (4,4-1500 mg/l), al igual que las muestras que poseen aguas de tipo cálcicas-sulfatadas, a excepción de algunas muestras localizadas en el altiplano que elevan sus STD (6000 mg/l).

En las muestras de ríos se aprecia que el tipo químico predominante son las aguas magnésicas-sulfatadas, las cuales poseen valores de STD bajos. Un segundo tipo químico predominante son las aguas cálcicas-sulfatadas, las cuales también presentan en general valores de STD bajos (4,4-1500 mg/l). Las aguas de tipo sódico-cloruradas presentan valores más altos de STD (hasta 6000 mg/l). Las aguas magnésicas-carbonatadas presentan valores de STD bajos (200-900 mg/l) en la zona del río Lauca, pero más elevados en el sector del río Collacagua (hasta 2000 mg/l).

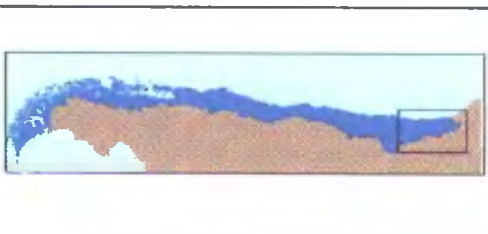
En las muestras de pozos (mapa N°19) se pueden observar los tipos químicos predominantes y los STD, los cuales muestran niveles muy altos. Las aguas sódicas-sulfatadas muestran valores de STD bajos en comparación al resto de las muestras de ríos de la región (1-6000 mg/l), este tipo químico se distribuye principalmente en el Salar Pintados. Las aguas cálcicas-sulfatadas también presentan valores de STD bajos (1-6000 mg/l), sólo en el norte del Salar Pintados aumenta el contenido de STD (hasta 365620 mg/l). En este sector del Salar Pintados se dan también aguas de tipo magnésicas-sulfatadas las cuales presentan valores de STD más elevados (hasta 23000 mg/l). Este tipo químico también se encuentra en los Salares Surire (365620 mg/l de STD) y Salar Coposa (1-6000 mg/l de STD). Las aguas sódicas-cloruradas se localizan en el sector del Salar Zapiga, Salar Pintados y Salar Coposa con STD bajos (1-6000 mg/l).

DISTRIBUCION CONTENIDO STD Y TIPO QUIMICO MUESTRAS DE VERTIENTE I Región Tarapacá



SIMBOLOGIA

Tipo Químico	
▲	Na/SO ₄
▲	Na/HCO ₃
▲	Na/Cl
▲	Mg/SO ₄
▲	Mg/HCO ₃
▲	Ca/SO ₄
▲	Ca/HCO ₃
■	Ca/Cl



Total Solidos Disueltos (mg/l)

- ▲ 4.4 - 300
 - ▲ 300 - 1210
 - ▲ 1210 - 6693
 - ▲ 6693 - 177100
- ~ Ríos y Quebradas
□ Lagunas y Salares
~ Limite Regional

Fuente Datos: DGA
Año: 2004

Mapa Nº 17

6.2. Segunda Región de Antofagasta

Los datos químicos utilizados están dentro del error de balance (menor a un 10%). De un total de 1102 muestras 734 poseen un error de balance menor a 10%, de éstas, 4 muestras son de lluvia, 148 de pozo, 107 de ríos y 122 de vertientes. Las muestras se distribuyen principalmente en los sectores del Altiplano, sector de Aguas Blancas y la Quebrada de Taltal.

6.2.1. Aguas superficiales

Las aguas superficiales constan de muestras de lluvia, ríos y vertientes. Las muestras de vertientes se distribuyen en el sector del Altiplano, las muestras de ríos en parte del Altiplano, el río Loa y Salar Punta Negra y las muestras de pozos en el sector del Altiplano, Salar Punta Negra, Quebrada de Taltal y sector de Aguas blancas. Como se aprecia en la figura N°8, en el triángulo de aniones las muestras se concentran hacia Cl y SO₄ y se alejan de HCO₃, a diferencia de las muestras de aguas superficiales de la I región las cuales se acercaban más a HCO₃.

Algunas muestras de vertientes se sitúan a lo largo de una línea recta entre Cl y SO₄, las muestras más cercanas a SO₄ tienden a desplazarse hacia mayores cantidades de HCO₃. Se aprecia entonces que existen dos componentes predominantes; el Cl y el SO₄.

En las muestras de ríos se aprecia que se concentran principalmente al centro entre HCO₃, Cl y SO₄, pero con tendencia hacia Cl. Se puede decir entonces que los cationes predominantes son el Cl y en menor medida el SO₄. En el triángulo de cationes, se aprecia claramente que los predominantes son el Na y el Ca, el Mg se mantiene constante.

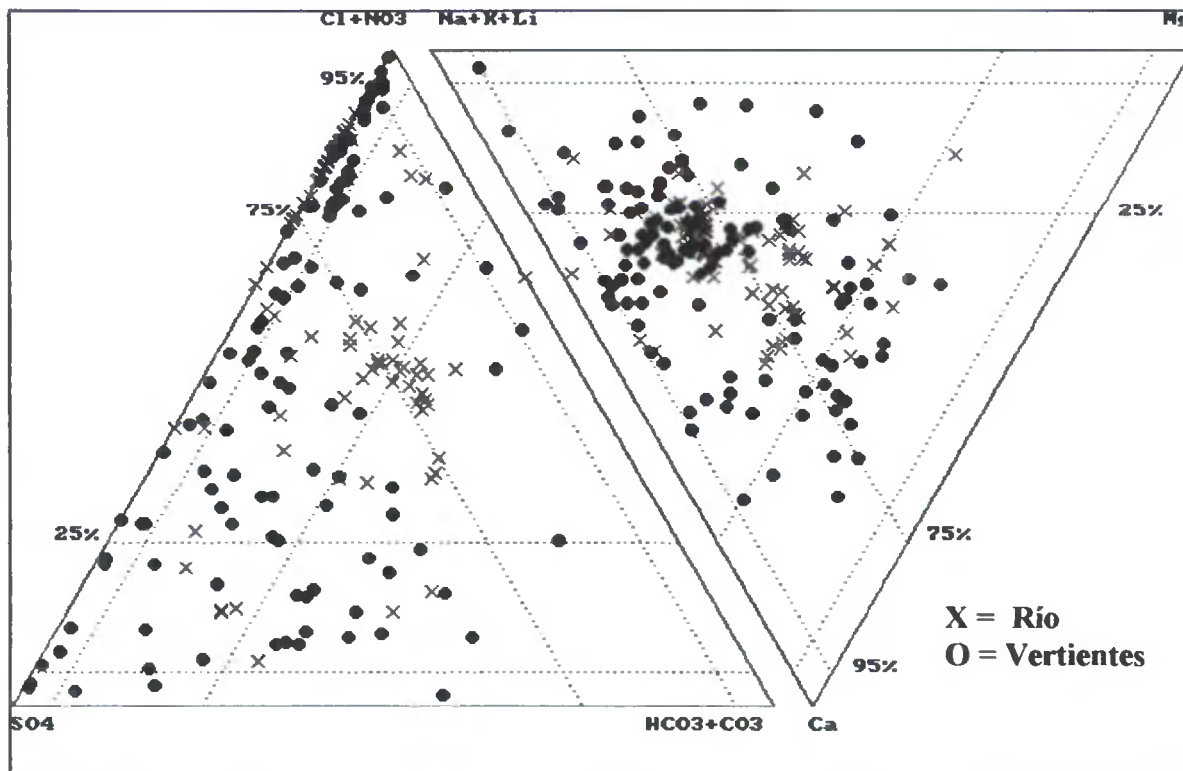
De las cuatro muestras de lluvia existentes 3 son de tipo Ca/Cl y una Na/SO₄ y corresponden al sector del altiplano. En general los tipos químicos que se dieron en las muestras de vertientes y ríos son los siguientes:

Tabla N°3. TIPO QUÍMICO. SUPERFICIALES

Fuente	Tipo químico	N° de muestras
Vertientes	Na/Cl	66
	Ca/SO ₄	27
	Na/SO ₄	14
	Mg/SO ₄	6
	Mg/HCO ₃	3
	Ca/HCO ₃	2
	Ca/Cl	2
	Na/HCO ₃	1
	Mg/Cl	1
Ríos	Na/Cl	79
	Ca/Cl	13
	Mg/SO ₄	5
	Ca/HCO ₃	4
	Na/SO ₄	3
	Ca/SO ₄	3

Como se aprecia en la tabla N°3, el tipo químico predominante en las muestras de vertientes son las aguas sódicas-cloruradas y cálcicas-sulfatadas y algunas sódicas-sulfatadas, los demás tipos químicos se presentan en una proporción menor. En las muestras de rios los tipos predominantes son las aguas sódicas-sulfatadas y cálcicas-cloruradas.

Fig. N° 8. TIPO QUÍMICO AGUAS SUPERFICIALES



6.2.2. Aguas subterráneas

Las muestras de pozo se concentran principalmente en el altiplano, Salar de Aguas Blancas y la Quebrada de Taltal, como se dijo anteriormente. En la figura N°8, en el triángulo de aniones las muestras se acercan claramente a mayores cantidades de Cl y SO4, el HCO3 no presenta predominancia.

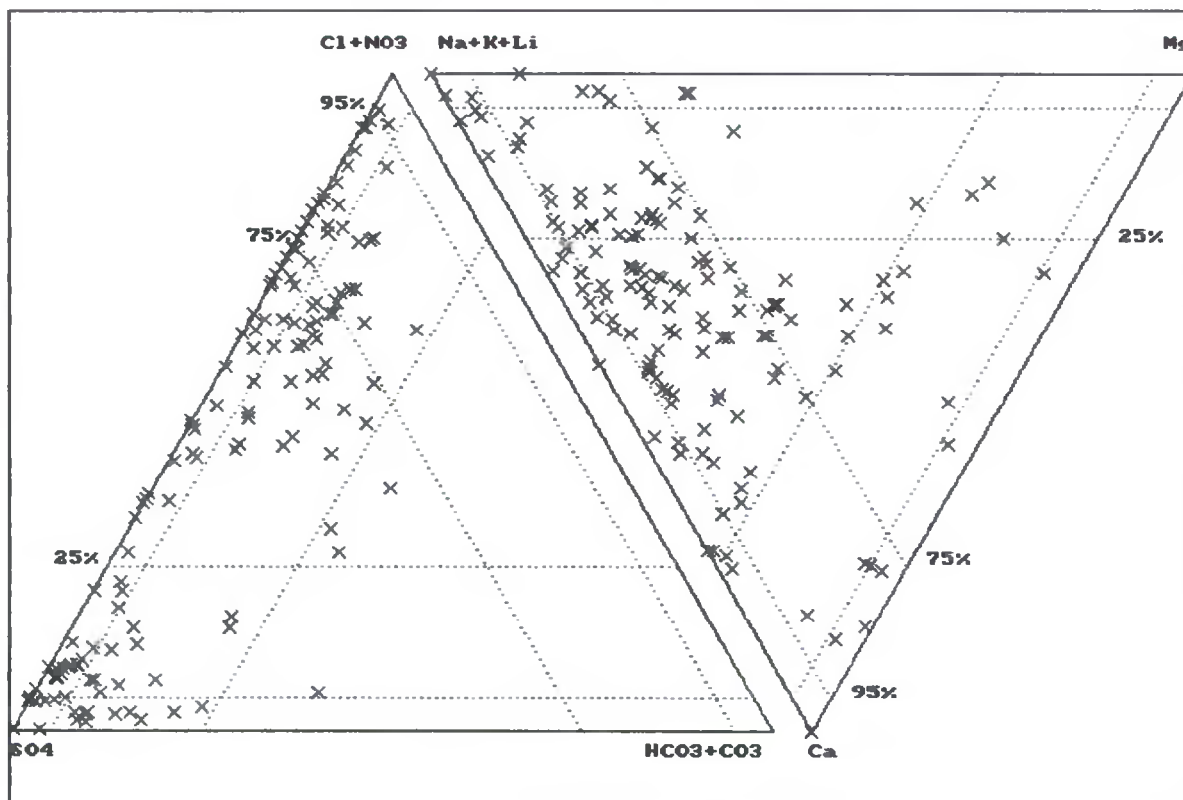
En el triángulo de cationes se observa que los componentes predominantes en las muestras son el Ca y el Na, sin embargo algunas muestras se desplazan ligeramente hacia Mg. En general se puede decir que los tipos químicos presentes son los siguientes:

Tabla N°4. TIPO QUÍMICO. POZOS

Fuente	Tipo químico	N° de muestras
Pozo	Na/Cl	67
	Na/SO4	30
	Ca/SO4	30
	Ca/Cl	11
	Ca/Mg	10

Como se aprecia en la tabla N°4 el tipo químico predominante es el sódico- clorurada al igual que en las muestras de ríos y vertientes. También predominan las aguas de tipo sódico-sulfatadas y cálcica-sulfatada el mismo tipo predominante en las muestras de vertientes.

**Fig. N° 9. TIPO QUÍMICO
AGUAS SUBTERRANEAS**



Con respecto a los STD esta región posee valores muy elevados, lo cual es característico de la zona norte del país. De acuerdo al gráfico N° 20 la mayor cantidad de muestras se concentra entre los intervalos 1000 y 4000 mg/l de STD, a diferencia de la I región, la cual se concentraba entre rangos más bajos (1000-2000 mg/l de STD).

De acuerdo al gráfico, las muestras de ríos son las que representan la mayor cantidad concentradas entre los rangos (1000-4000 mg/l de STD). La muestras de pozos se distribuyen en diferentes rangos, presentando una mayor frecuencia en los rangos 300-400 y 1000-4000 mg/l de STD. Las muestras de vertientes también se concentran entre los rangos 1000-4000 mg/l de STD, pero en menor cantidad de muestras.

En el gráfico se aprecia claramente que la mayor frecuencia de muestras se concentran en valores muy altos de STD.

SALINIDAD DE LAS MUESTRAS
Región de Antofagasta

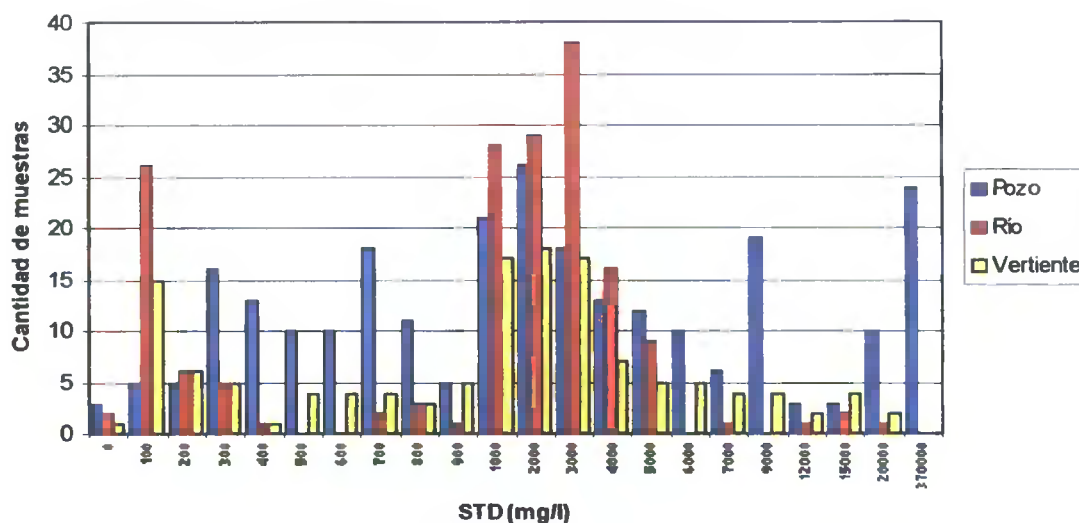


Gráfico N° 20

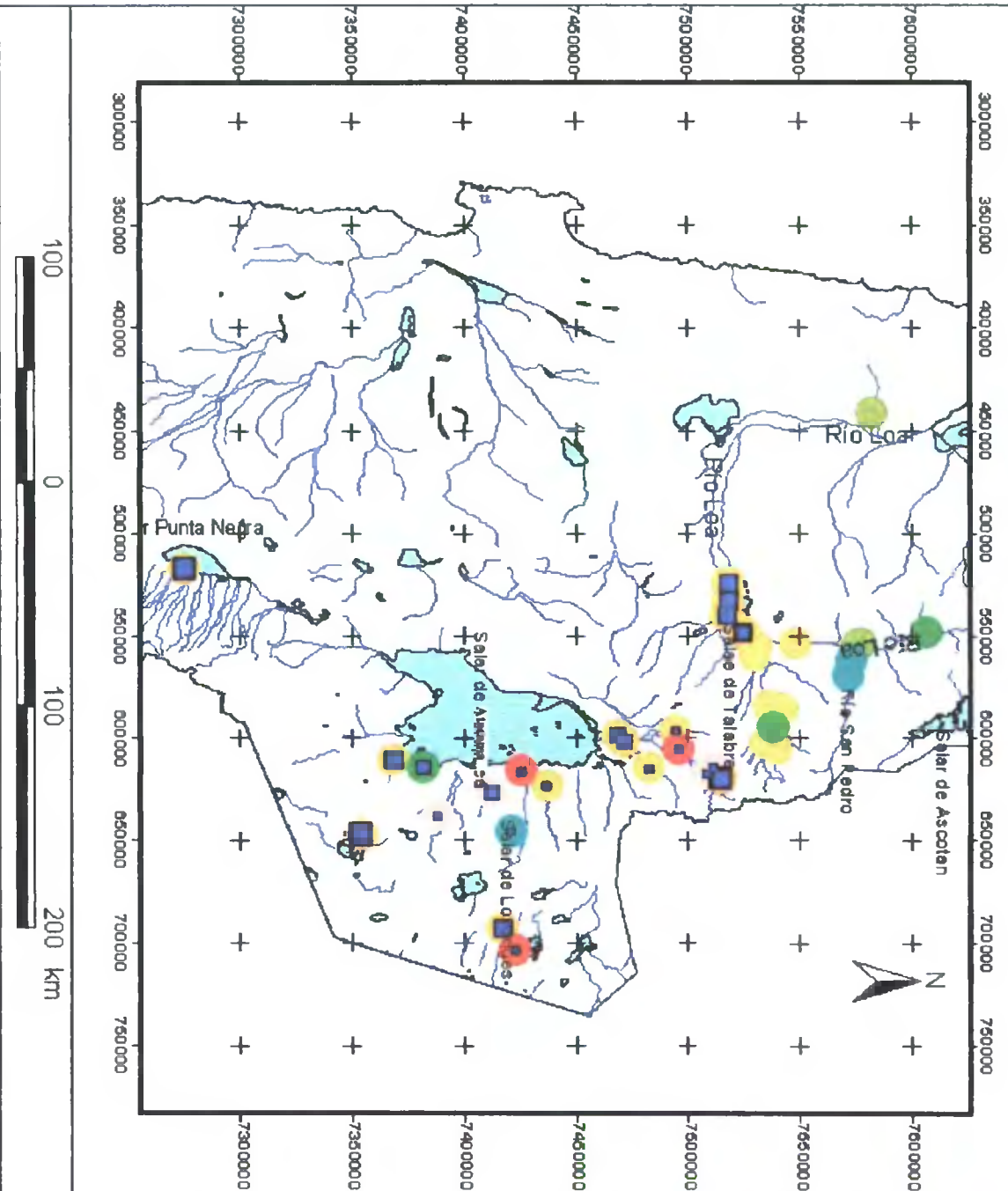
En los mapas N° 20, 21, y 22 se aprecia la distribución de los tipos químicos predominantes de cada muestra y sus contenidos de STD.

Con respecto a las vertientes, se puede observar la predominancia de las aguas sódicas-cloruradas, especialmente en los sectores del Salar de Ascotán, Aguas Calientes, Pajonales y Salar Punta Negra. Las aguas de tipo cálcico-sulfatadas también son predominantes sobretodo en el sector del Altiplano. Con respecto a los STD los valores más altos (14000-25000 mg/l de STD) se localizan en los Salares de Ascotán, Pajonales, Punta Negra y Salar de Atacama. Los valores más bajos de STD (hasta 6000 mg/l de STD) se encuentran entre el Salar de Carcote y Ascotán y en el sector del Salar Loyoques y Aguas Calientes (Altiplano).

En las muestras de pozos, el tipo químico más dominante es el sódico-clorurado. Estas se localizan principalmente en el Salar de Ascotán, Salar de Atacama y Salar Punta Negra. Las aguas tipo sódicas-sulfatadas también se presentan en un gran cantidad de muestras, las cuales están localizadas entre los Salares Ascotán, Atacama, Punta Negra, sector de Aguas Blancas y algunas en el río Loa. Los tipos químicos predominante que se da en las muestras de pozos son los mismos que se dan en las muestras de ríos y vertientes de esta región. En el Salar de Loyoques, Aguas Blancas y Carcote se presentan los mayores valores de STD (200000-350000 mg/l de STD), en el resto de las muestras los STD son bajos (hasta 54000 mg/l de STD) en comparación a las otras muestras.

En las muestras de ríos predominan las aguas tipo sódicas-cloruradas al igual que en las muestras anteriores, éstas se distribuyen entre el río Loa y el Salar de Atacama. Las aguas tipo cálcicas-cloruradas se distribuyen entre el Salar de Loyoques y Atacama. También predominan aguas tipo magnésicas-sulfatadas, las cuales se localizan entre el Salar de Talabre y el Salar de Atacama. Los mayores valores de STD se localizan en el río Loa, Salar de Talabre, Salar Punta Negra, Salar de Loyoques, Aguas Blancas y Salar de Atacama (8000-29000 mg/l de STD). En general, predominan los valores de STD elevados, en comparación al resto de las muestras de ríos.

DISTRIBUCION CONTENIDO STD Y TIPO QUIMICO MUESTRAS DE RIO II Región Antofagasta



Región de Antofagasta



SIMBOLOGIA Tipo Quimico

- Na/SO₄
- Na/Cl
- Mg/SO₄
- Ca/SO₄
- Ca/HCO₃
- Ca/Cl

Total Solidos Didueltos (mg/l)

- 240.9 - 1497
- 1497 - 3260
- 3260 - 8112
- 8112 - 29120

- Rios y Quebradas
- Lagunas y Salares
- Limite Regional

Fuente Datos: DGA
Año: 2004

Mapa Nº 22

6.3. Tercera Región de Atacama

Las muestras utilizadas se distribuyen principalmente en el sector de la Cordillera de los Andes, el sector de los Salares y a lo largo del río Copiapó (Ver mapa N° 23, 24, 25). De un total de 724 muestras, 444 tienen el error de balance menor al 10%; de éstos, 197 son muestras de pozos, 71 de río y 64 de vertientes.

6.3.1. Aguas superficiales

Las muestras de aguas superficiales constan de ríos y de vertientes. Las muestras de vertientes se localizan principalmente en la Cordillera de Los Andes y en medida en el río Copiapó. Las muestras de ríos se distribuyen en los sectores de la Cordillera de los Andes y principalmente en el sector del río Copiapó.

Como se aprecia en la figura N°10, en el triángulo de los aniones las muestras se acercan a Cl y SO₄, algunas de ellas con una leve tendencia hacia HCO₃. En general se aprecia que hay dos componentes principales el Cl y los SO₄.

Las muestras de vertientes se alinean entre Cl y SO₄ con pequeñas tendencias hacia HCO₃ pero no en gran medida, solo dos muestras poseen alta concentración de HCO₃.

Las muestras de ríos, sin embargo, se concentran principalmente en SO₄ y algunas se desplazan hacia Cl y levemente a HCO₃.

En el triángulo de los cationes se observa que las muestras tanto de ríos como de vertientes se agrupan principalmente hacia Na y Ca y sólo unas cuantas hacia Mg.

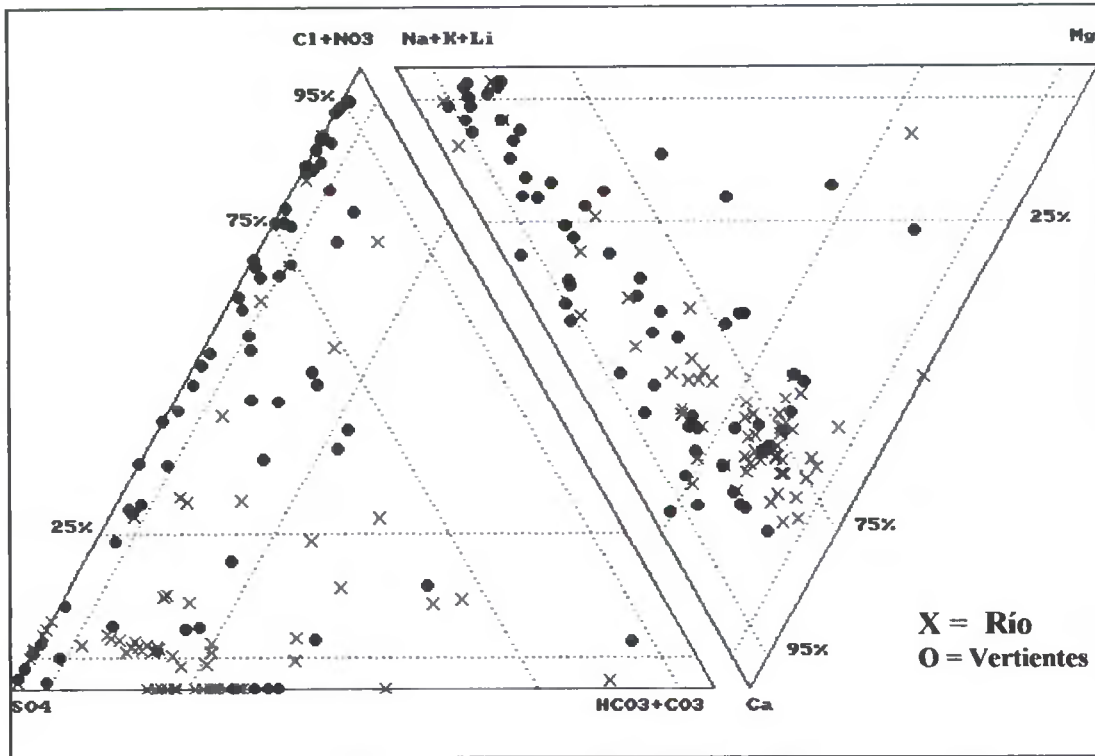
En la tabla N°5 se pueden ver los tipos químicos que se presentan en las muestras de la III región:

Tabla N° 5. TIPO QUIMICO. SUPERFICIAL

Fuente	Tipo químico	N° de muestras
Vertientes	Na/Cl	27
	Ca/SO ₄	19
	Ca/Cl	8
	Na/SO ₄	6
	Mg/SO ₄	2
	Na/HCO ₃	1
	Ca/HCO ₃	1
Ríos	Ca/SO ₄	52
	Na/Cl	6
	Mg/SO ₄	5
	Ca/HCO ₃	5
	Na/SO ₄	2
	Ca/Cl	1

Como se aprecia en la tabla, en las muestras de vertientes predominan las aguas de tipo sódicas-cloruradas y cálcicas-sulfatadas y cloruradas, las aguas de tipo sódicas-sulfatadas se presentan en menos muestras y el resto de los tipos químicos se presentan sólo en algunas muestras.

**Fig. N° 10. TIPO QUÍMICO
AGUAS SUPERFICIALES**



En las muestras de río predomina las aguas de tipo cálcicas-sulfatadas y las aguas sódicas-cloruradas, al revés que en las muestras de vertientes.

6.3.2. Aguas subterráneas

Las muestras de aguas subterráneas se distribuyen principalmente entre el río Copiapó y algunos salares de la Cordillera de los Andes. En la figura N°11, en el triángulo de aniones, se aprecia claramente que la mayoría de las muestras se agrupan hacia SO4 extendiéndose algunas hacia Cl. Ninguna muestra se acerca a HCO3. Claramente los componentes predominantes son en su mayoría el SO4 y el Cl.

En el triángulo de cationes se aprecia que la mayoría de las muestras se agrupan hacia Ca, otro resto hacia Na y un grupo pequeño a Mg. Es decir, los componentes predominantes son el Ca y en menor grado el Na.

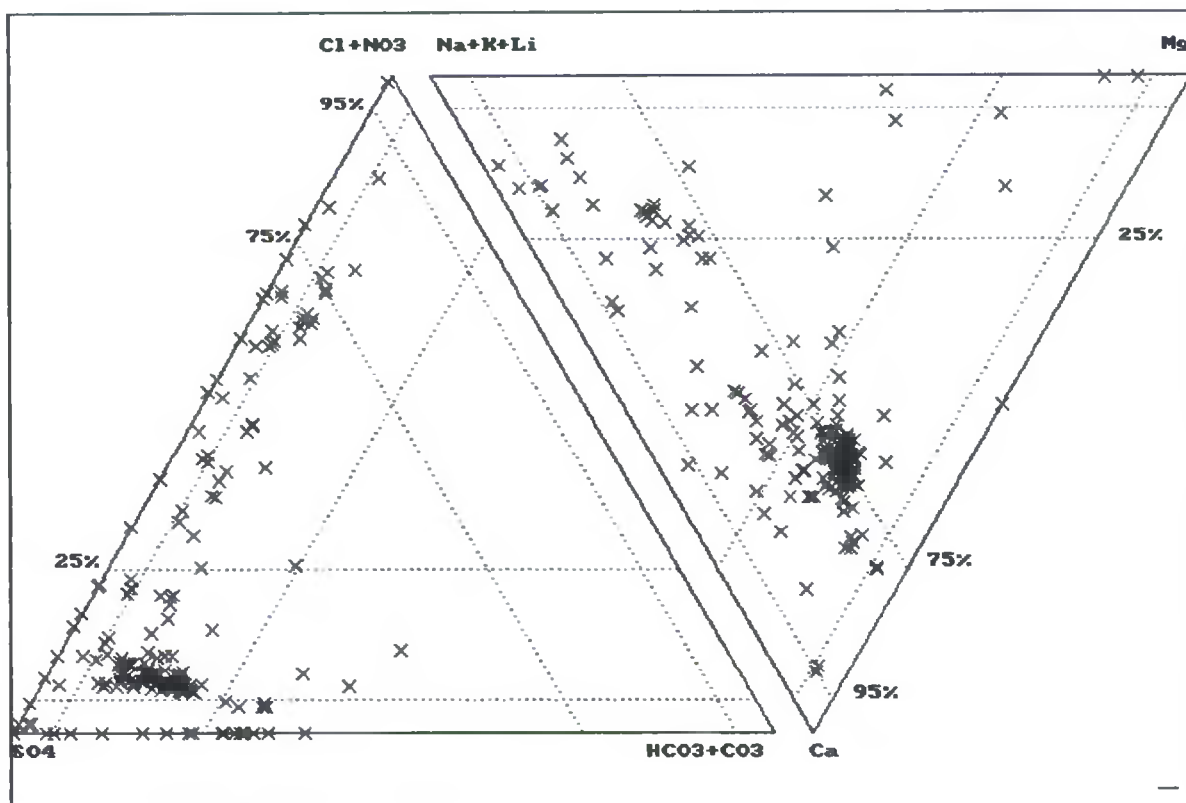
En la tabla N°6 se pueden ver los tipos químicos presentes en las muestras de pozos:

Tabla N°6. TIPO QUÍMICO. POZO

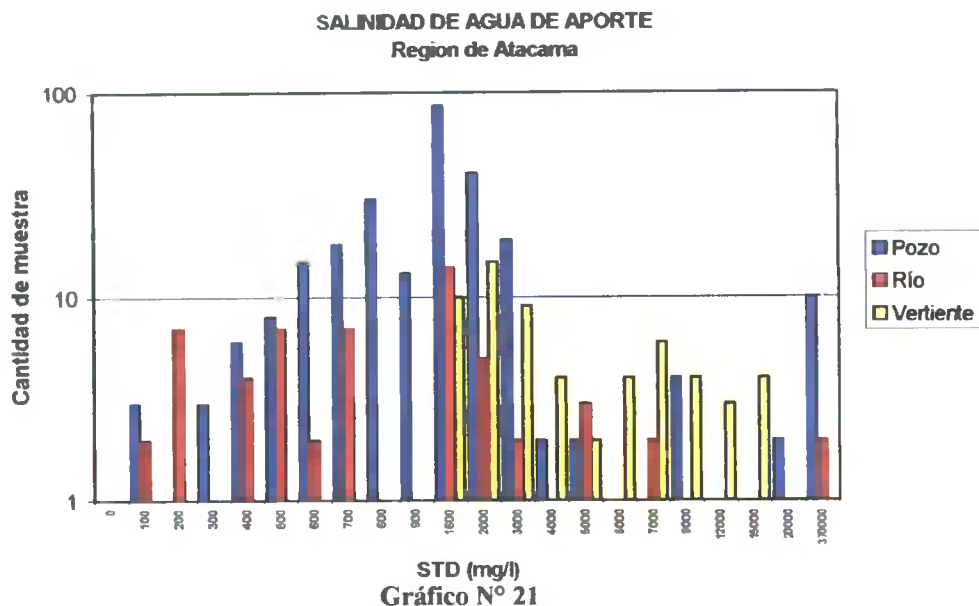
Fuente	Tipo químico	N° de muestras
Pozo	Ca/SO4	150
	Na/Cl	24
	Ca/Cl	9
	Mg/SO4	7
	Na/SO4	5
	Na/HCO3	1
	Mg/Cl	1

En la tabla anterior se aprecia que predomina el tipo de agua cálcica-sulfatada. Un segundo tipo químico predominante es el tipo sódico-clorurado. El resto de los tipos químicos tienen baja ocurrencia.

Fig. N° 11. TIPOS QUÍMICO AGUAS SUBTERRANEAS



Los STD que se presentan en esta región varían entre 100 y 370000 mg/l, al igual que en la Segunda Región los STD son elevados. Como se observa en el gráfico N° 21, entre los rangos 1000 y 4000 mg/l se concentran la mayoría de las muestras, es decir, que del total de muestras de STD la mayoría de ellas se ubican entre éstos valores. Las muestras de vertientes se presentan sobre los 1000 mg/l de STD y la mayor frecuencia de muestras de éstas se encuentran entre los rangos 1000 y 3000 mg/l de STD. En las muestras de ríos el mayor número se da entre los rangos 600 y 3000 mg/l de STD.

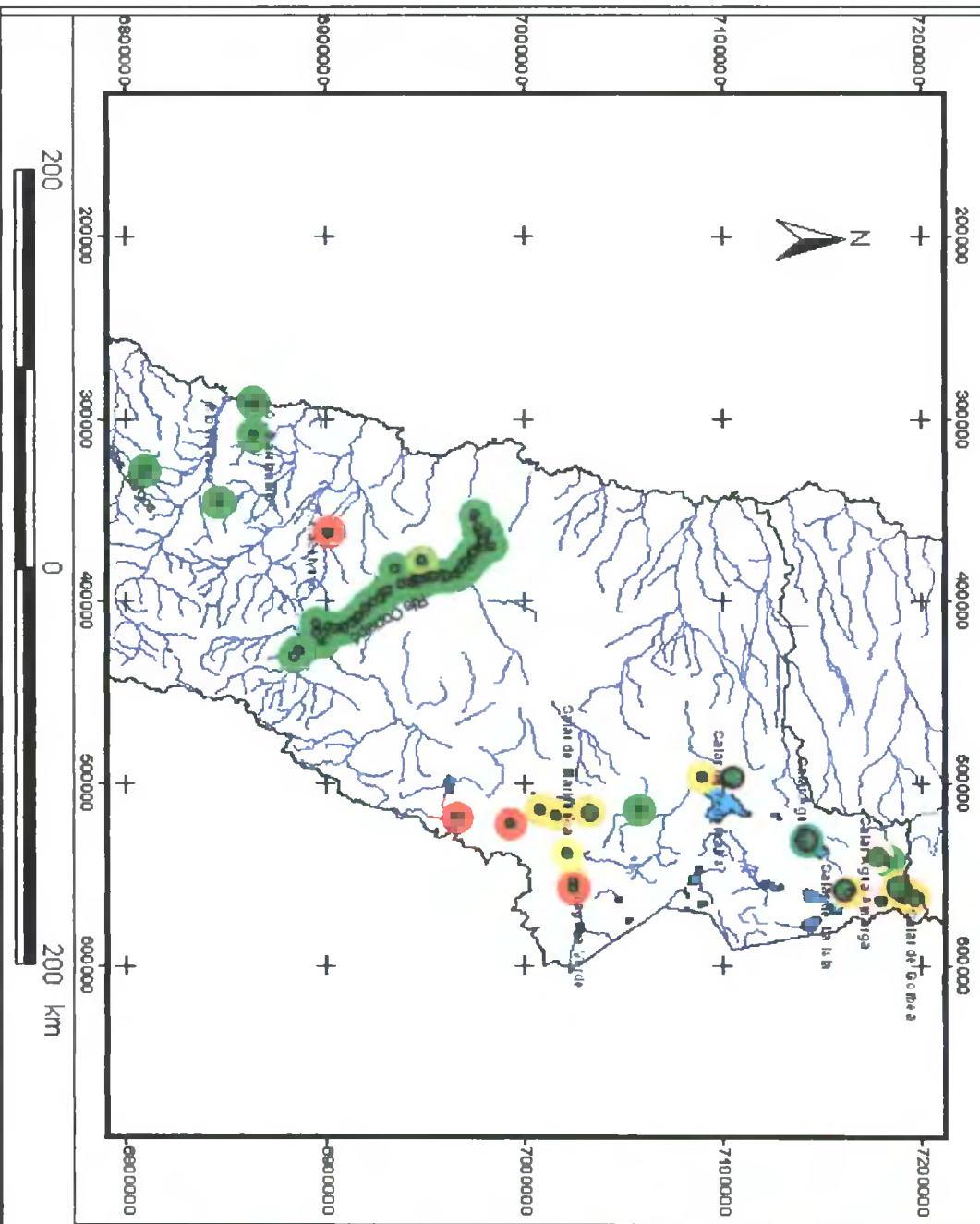


En los Mapas N° 23, 24, 25 se pueden apreciar los tipos químicos de las muestras. En el mapa N°23 se observa que el tipo químico predominante son las aguas cálcicas-sulfatadas.; éstas se distribuyen principalmente en el río Copiapó y en la Quebrada Carrizalillo. Con respecto a los STD se puede decir que se presentan valores relativamente bajos, principalmente en la zona del río Copiapó (110 a 12000 mg/l de STD), a diferencia de los valores que se presentan en la zona de los salares (hasta 300000 mg/l de STD). Otro tipo químico predominante que se observa son las aguas sódica-cloruradas las cuales presentan valores más altos de STD (entre 12000 y 200000 mg/l de STD).

En las muestras de río se da la misma situación anterior; el tipo químico predominante son las aguas cálcicas-sulfatadas, las cuales se localizan a lo largo del río Copiapó. También el segundo tipo predominante son las aguas sódicas-cloruradas, distribuidas en la zona de los salares. Los STD que se dan en las muestras de ríos son más bajos (sólo hasta 70000 mg/l de STD) que en las muestras de pozos. En la zona del río Copiapó los STD varían entre 100 y 2000 mg/l. Los valores más altos se encuentran en la zona de los salares principalmente en el salar Agua Amarga.

En las muestras de vertientes los tipos predominantes son las aguas sódico-cloruradas las cuales se encuentran distribuidas entre el área del Salar de la Isla, Salar de Pedernales y Salar de Maricunga. Otro tipo químico predominante son las aguas cálcicas-sulfatadas, estas se distribuyen entre Salar de Pedernales, Salar de Maricunga, Laguna del Negro Francisco y algunas en el río Copiapó. Con respecto a los STD, se aprecia que los valores son relativamente bajos en comparación a las muestras de pozos (400 a 70000 mg/l de STD), las muestras que presentan los valores más altos se encuentran en la zona del Salar Pedernales y de La Isla (hasta 70000 mg/l de STD). Por otro lado, los valores más bajos de STD se encuentran en la zona del Salar de Maricunga y la Laguna del Negro Francisco (hasta 12000 mg/l de STD).

DISTRIBUCION CONTENIDO STD Y TIPO QUIMICO MUESTRAS DE POZO III Región Atacama



SIMBOLOGIA

Tipo Químico

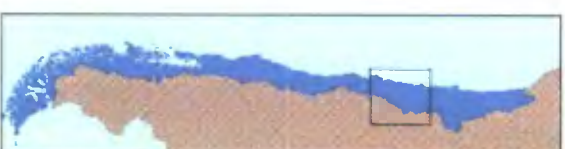
- Na/SO₄
- Na/HCO₃
- Na/Cl
- Mg/Cl
- Mg/SO₄
- Mg/HCO₃
- Ca/SO₄
- Ca/HCO₃
- Ca/Cl

Total Sólidos Disueltos (mg/l)

- 110 - 12847
- 12847 - 50618
- 50618 - 196672
- 196672 - 334882

- Ríos y Quebradas
- Lagunas y Salares
- Límite Regional

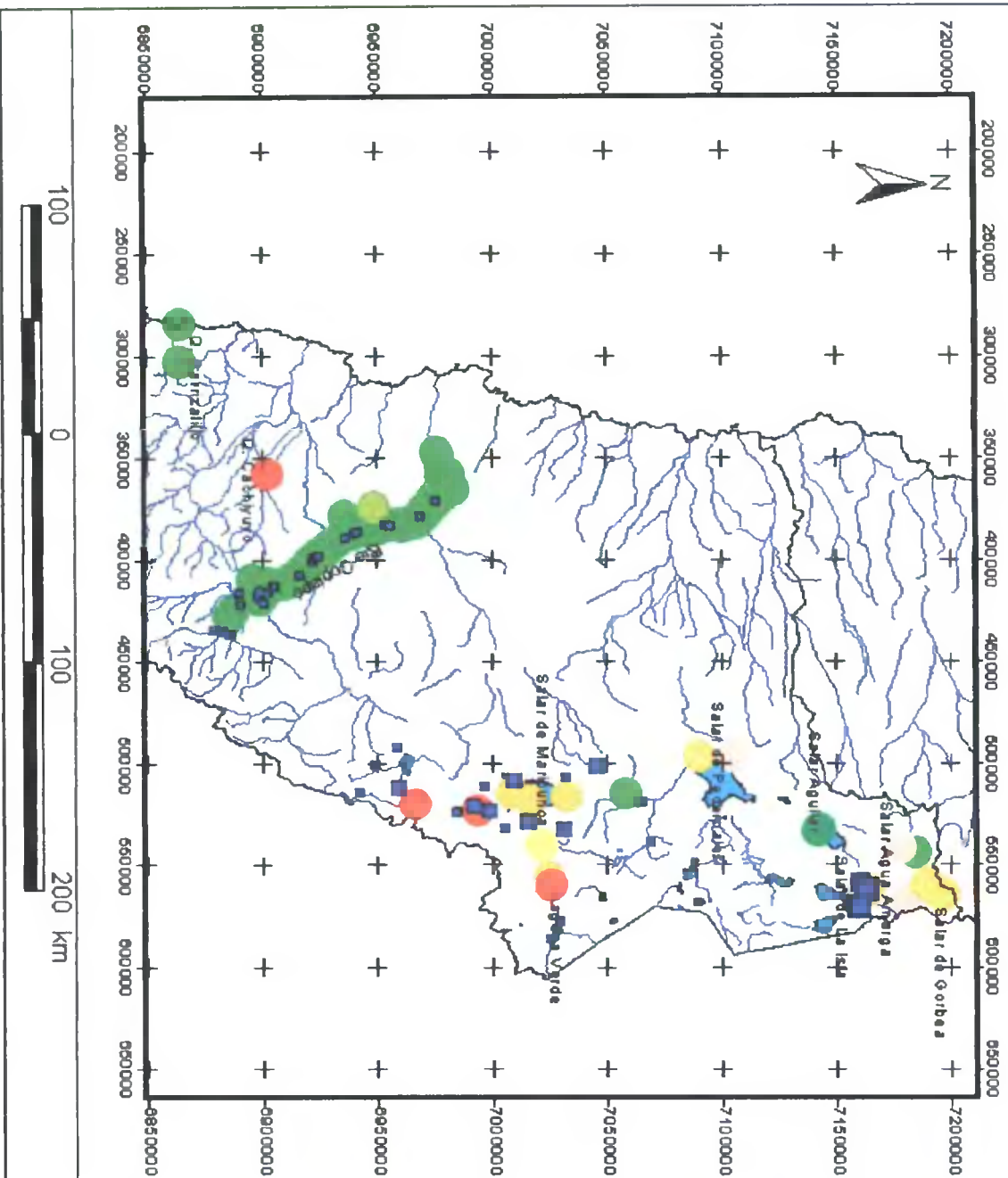
Región Atacama



Fuente Datos: DGA
Año: 2004

Mapa Nº 23

DISTRIBUCION CONTENIDO STD Y TIPO QUIMICO MUESTRAS DE RIO III Región Atacama



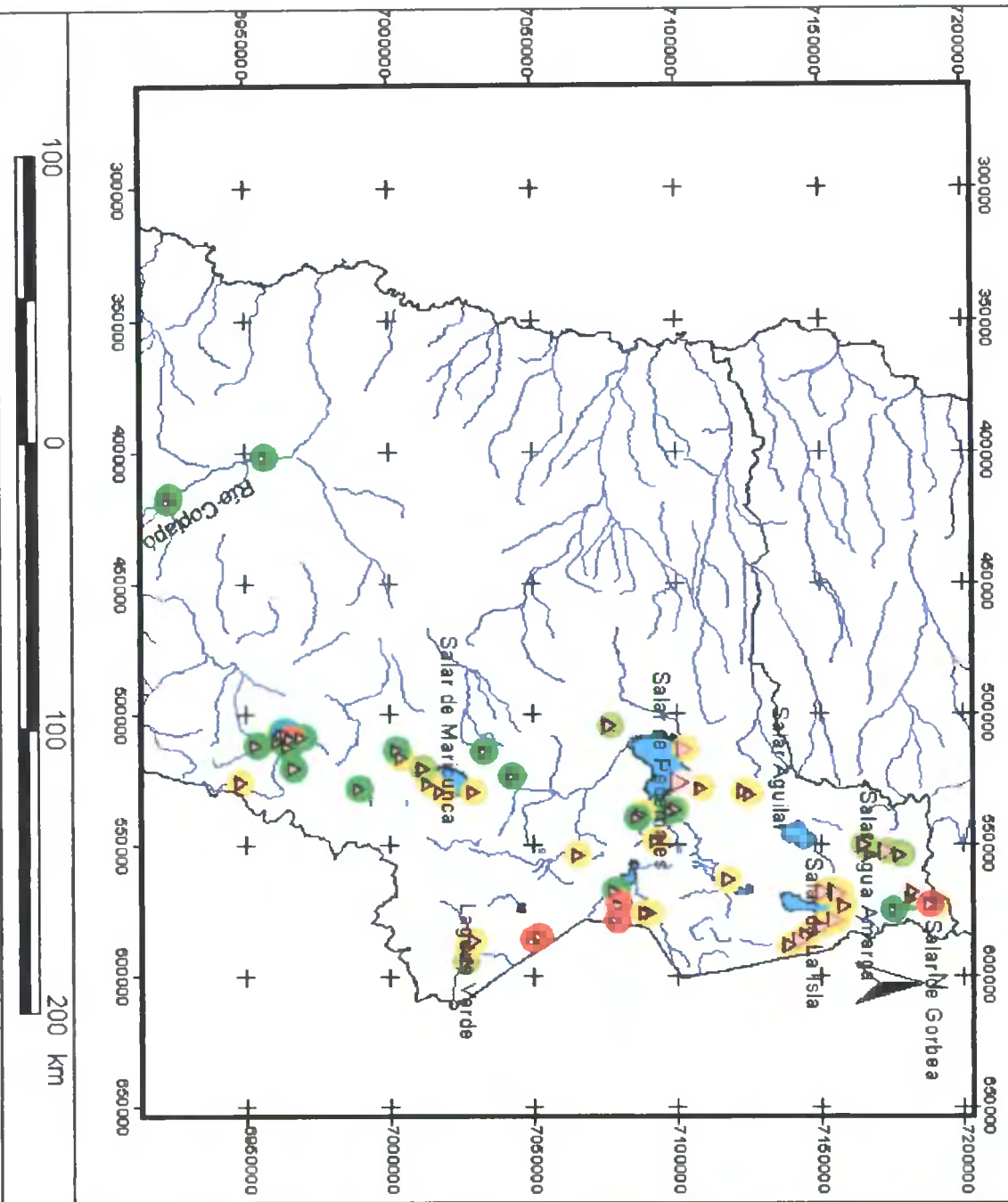
Mapa Nº 24

SIMBOLOGIA	Región Atacama
Tipo Químico Na/SO ₄ Na/HCO ₃ Na/Cl Mg/Cl Mg/SO ₄ Ca/SO ₄ Ca/Cl	

<p>Total Solidos Disueltos (mg/l)</p> <ul style="list-style-type: none"> 149 - 2608 2608 - 10641 10641 - 26729 26729 - 76030 <p> Ríos y Quebradas Lagunas y Salares Límite Regional </p>	
---	--

Fuente Datos: DGA
Año: 2004

DISTRIBUCION CONTENIDO STD Y TIPO QUIMICO MUESTRAS DE VERTIENTE III Región Atacama



SIMBOLOGIA

Tipo Químico

- Na/SO₄
- Na/HCO₃
- Na/Cl
- Mg/SO₄
- Ca/SO₄
- Ca/HCO₃
- Ca/Cl

Región Atacama



Total Sólidos Disueltos (mg/l)

- ▲ 419 - 4639
 - ▲ 4639 - 12436
 - ▲ 12436 - 31046
 - ▲ 31046 - 79743
- ~ Ríos y Quebradas
 - Lagunas y Salares
 - Limite Regional

Fuente Datos: DGA
Año: 2004

Mapa N° 25

6.4. Cuarta Región de Coquimbo

La región de Coquimbo es la región en la que se recolectó menor información. Las muestras recopiladas pertenecen a la Quebrada de los Choros. De un total de 19 datos recopilados, 6 poseen un error de balance mayor al 10% y todos corresponden a muestras de pozos.

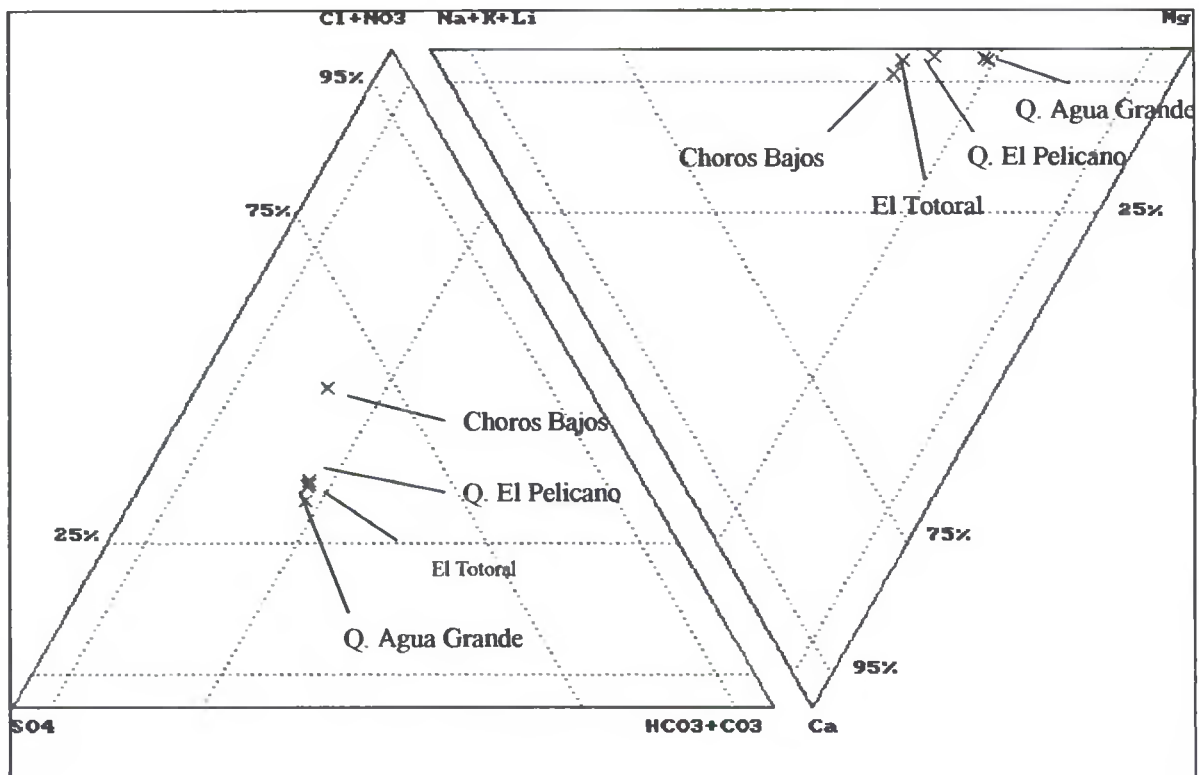
En la figura N°12, en el triángulo de aniones las muestras se desplazan hacia SO₄ y Cl el HCO₃ se presenta en menor grado. En el triángulo de los cationes el Mg y Na son los que se presentan en un mayor porcentaje. Los tipos químicos encontrados son los siguientes:

Tabla N°7. TIPO QUÍMICO. POZO

Fuente	Tipo químico	N° de muestras
Pozo	Mg/SO ₄	5
	Mg/Cl	1

Como se aprecia el tipo químico predominante en las muestras de pozos son las aguas magnésicas-sulfatada, las cuales corresponden a la Quebrada de los Choros. La otra muestra de pozo presenta agua tipo magnésica-clorurada la cual se encuentra localizada en Los Choros Bajo.

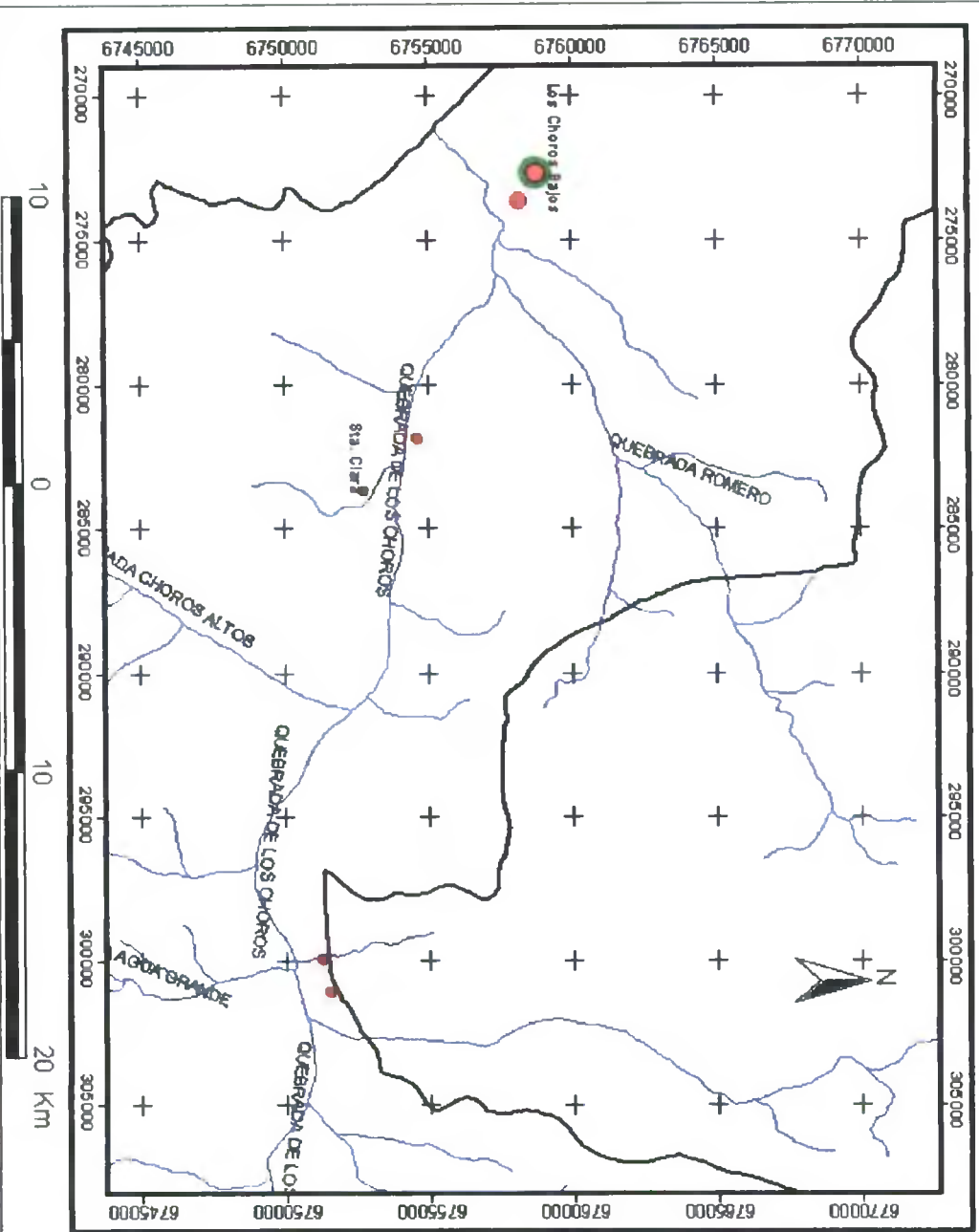
Fig. 12. TIPO QUÍMICO AGUAS SUBTERRANEAS



En el mapa N° 26 se puede observar la distribución de las muestras trabajadas, las cuales están ubicadas a lo largo de la Quebrada los Choros. Los sólidos totales disueltos de las muestras no varían en gran medida (entre 730 y 1350 mg/l de STD), Los valores más bajos de STD se encuentran en el interior de la Quebrada Los Choros, y en la localidad de los Choros Bajo se encuentran los valores más altos.

Se pueden observar también los tipos químicos encontrados los cuales fueron mencionados anteriormente, en la muestra ubicada en los Choros bajos se encuentran aguas tipo magnésicas-cloruradas, el resto de las muestras son aguas tipo magnésicas- sulfatadas.

DISTRIBUCION CONTENIDO STD Y TIPO QUIMICO MUESTRAS DE POZOS IV Región de Coquimbo



Mapa N° 26

SIMBOLOGIA

Tipo químico

Mg/Cl

Mg/SO₄

Total Sólidos Disueltos (mg/l)

- 730 - 915
- 915 - 1116
- 1116 - 1356

Limite Regional

Ríos y Quebrada

Poblados

Región de Coquimbo



7.

CONCLUSIONES

De acuerdo a los datos recopilados entre las regiones primera y cuarta, se puede decir que la mayor cantidad de muestras encontradas se ubican en la Primera Región de Tarapacá a medida que se avanza hacia la cuarta región el número de muestras recopiladas disminuye.

En la Primera región las muestras se distribuyen casi en la totalidad de ella, concentrándose principalmente en la zona de la Pampa del Tamarugal y el Altiplano. Las muestras de pozos son las más abundantes junto con las muestras de ríos. En esta región se recopiló una gran cantidad de muestras de lluvia de la zona altiplánica lo que no sucedió en el resto de las regiones, a excepción de la Segunda Región.

En la Segunda Región las muestras se distribuyen principalmente en la zona del altiplano y en la parte alta del río Loa. También se encontraron muestras importantes en la Quebrada de Taltal. En esta región las muestras más abundantes son las de vertientes y ríos. También se encontraron varias muestras de lluvia y nieve.

En la Tercera Región la mayoría de las muestras se ubican en la zona de los salares de la Cordillera de los Andes y a lo largo del río Copiapó. Éste último posee una gran cantidad de muestras a lo largo de su recorrido lo cual es muy importante para estudios posteriores. El mayor número de muestras corresponde a las de pozo y las de río.

Por último, la cuarta región es en la que se encontró el menor número de muestras, en su mayoría muestras de pozos y distribuidas a lo largo de la Quebrada Los Choros.

Caracterización isotópica

En general, las muestras de isótopos recopiladas varían entre rangos similares (entre -3 ‰ y -15 ‰ de $\delta^{18}\text{O}$ y -10 ‰ y -110 ‰ de $\delta^2\text{H}$ en aguas superficiales y subterráneas).

En la Primera Región las muestras isotópicas de aguas superficiales se concentran específicamente entre los rangos -5 ‰ y -15 ‰ de $\delta^{18}\text{O}$ y -40 ‰ y -120 ‰ de $\delta^2\text{H}$ principalmente. En las aguas subterráneas las muestras se concentran entre -3 ‰ y -13 ‰ de $\delta^{18}\text{O}$ y -35 ‰ y -100 ‰ de $\delta^2\text{H}$. Las muestras de lluvia sin embargo, muestran rangos más amplios (entre -1 ‰ y -25 ‰ de $\delta^{18}\text{O}$ y -10 ‰ y -160 ‰ de $\delta^2\text{H}$) variando desde valores de oxígeno-18 muy pesados a valores muy livianos.

En la Segunda Región las muestras de aguas superficiales presentan valores isotópicos similares a los de la Primera Región (-3 ‰ y -12 ‰ de $\delta^{18}\text{O}$ y -29 ‰ y -91 ‰ de $\delta^2\text{H}$), en cambio en las muestras de aguas subterráneas no ocurre lo mismo. Los valores isotópicos varían entre -1 ‰ y -5 ‰ de $\delta^{18}\text{O}$ y -10 ‰ y -40 ‰ de $\delta^2\text{H}$; estas muestras poseen valores isotópicos más pesados que los de la Primera Región. Las muestras de lluvias presentan valores isotópicos que varían entre -2 ‰ y -18 ‰ de $\delta^{18}\text{O}$ y -20 ‰ y -130 ‰ de $\delta^2\text{H}$.

En la Tercera Región las muestras presentan valores isotópicos situados entre los rangos -3‰ y -12‰ de $\delta^{18}\text{O}$ y -30‰ y -90‰ de $\delta^2\text{H}$, muy similares a las muestras de aguas superficiales de la región anteriormente mencionada. En las muestras de aguas subterráneas los valores isotópicos varían entre -6‰ y -12‰ de $\delta^{18}\text{O}$ y -50‰ y -90‰ de $\delta^2\text{H}$ encontrándose entre los rangos de variación de las regiones anteriores.

En la cuarta región las escasas muestras recopiladas presentan valores isotópicos que se sitúan entre los rangos -5‰ y -8‰ de $\delta^{18}\text{O}$ y -20‰ y -65‰ de $\delta^2\text{H}$. Estos valores de oxígeno-18 se encuentran dentro de los rangos de valores de las muestras de las otras regiones.

Caracterización química

Para realizar la caracterización química se recopilaron un total de 3.145 muestras con datos químicos, de las cuales sólo 2.153 muestras poseían el error de balance menor a un 10%. Los valores más recurrentes de STD encontrados en las muestras varían entre 1 y 4000 mg/l, aunque los más altos encontrados en las muestras corresponden a 370.000 mg/l.

En la Primera Región se utilizaron 967 muestras, las cuales están distribuidas por casi toda la región, principalmente en la zona de la Pampa del Tamarugal y el Altiplano. Los tipos químicos más predominantes que se encontraron en las muestras en esta región son las aguas tipo cálcicas-sulfatadas, tanto en aguas superficiales como subterráneas. En las muestras de vertientes, ríos y pozos existen otros tipos químicos los cuales son cálcicas-carbonatadas, magnésicas- sulfatadas y sódicas sulfatadas respectivamente (Tabla N° 8).

Con respecto a los STD la mayoría de las muestras poseen valores que se concentraron entre los rangos 1-1000 mg/l. Las muestras de esta región son las que se concentraron entre los valores más bajos de STD.

En la Segunda Región se utilizaron 734 muestras las cuales se distribuyen principalmente en el altiplano. Existen algunas muestras en la parte alta del río Loa. Las muestras presentan principalmente aguas de tipo sódicas-cloruradas.

Con respecto a los STD la mayoría de las muestras se concentran entre los 1000 y 4000 mg/l de STD.

En la Tercera Región las muestras utilizadas fueron 444, las cuales se distribuyen principalmente en la zona de los salares y a lo largo del río Copiapó. Las muestras en general mostraron mayor tendencia a las aguas tipo sódicas-cloruradas (vertientes) y a las aguas tipo cálcica-sulfatadas (ríos y pozos). Los rangos en los cuales se concentraron los valores de STD fueron entre 1000-3000 mg/l.

En la cuarta región se utilizaron 6 muestras, las cuales se distribuyen a lo largo de la Quebrada de Los Choros. Las muestras presentaron en su mayoría aguas de tipo magnésicas-sulfatadas y los valores de STD varían entre los 700 y 1000 mg/l.

En general, los tipos químicos más recurrentes encontrados en las muestras fueron el Ca/SO₄ y Na/Cl y en menor cantidad el Mg/SO₄.

Tabla N° 8. RESUMEN TIPO QUÍMICO. REGIONES

REGION	TIPO MUESTRA	1° TIPO QUÍMICO	2° TIPO QUÍMICO	RANGO STD (mg/l)
I Región	Vertiente	Ca/SO ₄	Ca/HCO ₃	1-3000
	Río	Ca/SO ₄	Mg/SO ₄	
	Pozo	Ca/SO ₄	Na/SO ₄	
II Región	Vertiente	Na/Cl	Ca/SO ₄	1000-4000
	Río	Na/Cl	Ca/Cl	
	Pozo	Na/Cl	Na/SO ₄	
III Región	Vertiente	Na/Cl	Ca/SO ₄	1000-3000
	Río	Ca/SO ₄	Na/Cl	
	Pozo	Ca/SO ₄	Na/Cl	
IV Región	Pozo	Mg/SO ₄	Mg/Cl	700-1000

8. BIBLIOGRAFIA

- “Investigación Hidroquímica en el acuífero de Ojo de Cataluña. Repercusiones Hidrogeológicas.” Boletín N° 2 SEDECK. Sociedad Española de Espeleología y Ciencias del Karst, Adolfo E. Romero. et. Al¹, 2001.
- Evolución isotópica en ríos del norte de Chile, R. Aravena, O. Suzuki, 1999
- Modelo hidrogeológico y constitución química de la cuenca del río Loa, Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería, Departamento de Obras Hidráulicas, Tesis Humberto Peña Torrealba, 1970
- Análisis crítico de la red de medición de niveles de agua subterránea. II Región. Alamos y Peralta. Ingenieros consultores S.A., 1987.
- Análisis crítico de la red de medición de niveles de agua subterránea. III Región Alamos y Peralta Ingenieros consultores S.A., 1987
- Hidrogeoquímica del río Loa: un prototipo para el estudio de hoyas hidrográficas en el norte de Chile Universidad del Norte-Antofagasta, 1985.
- Exploración de agua subterránea en Salares: Punta Negra, Imilac y Hamburgo. Antofagasta, Minera UTA de Chile, 1984.
- Certificados de análisis de calidad de agua del río Loa y Salar de Ascotán. Geotecnia Consultores, 1998.
- Hidrografía de las zonas desérticas de Chile, 1972.
- Evolución de aguas en cuencas cerradas aplicación a los Salares de Ascotán y Carcote. Universidad Católica del Norte, 1976.
- Aprovechamiento de recursos hidráulicos en el Valle del Copiapó. Dirección de riego, 1969.
- Hidrogeología de la Quebrada de los Choros, CORFO, Depto. Recursos Hidráulicos, 1971.
- Expediente con análisis de calidad de agua: Quebrada los Choros, CORFO, Depto. Recursos Hidráulicos.
- Evaluación hidrogeológica acuífero sector norte salar de Atacama. Informe final. GP Consultores, 1999.

¹ Juan C. Baquero Ubeda, Jolanta Opolka-Gadek, Bogdan Gadek

- Modelo hidrogeológico de gestión del sistema hídrico del Salar del Huasco. Informe final. Compañía Minera RIOCHILEX S.A.
- Estudio hidrológico e hidrogeológico de los acuíferos de Rosario, intermedio y Aguas Blancas. Antofagasta, Atacama. Minerals Chile, S.C.M., 1999.
- Estudio de hidrológica isotópica en el área del Salar de Llamara, desierto de Atacama, Chile. H. Peña, R. Aravena, W. Rauert., 2002.
- Isotopic composition and origin of the precipitation in Northern Chile. H. Peña, R. Aravena, A. Grilli, 1999.
- Hydrogeochemistry and isotopes of ground and surface waters from two adjacent closed basins, 1990.
- Rapid development of an unusual peat- accumulating ecosystem in the Chilean altiplano, 2001.
- Variaciones temporales de parámetros físicos, químicos y biológicos de un lago de altura: el caso del lago Chungará. Universidad de Chile, Depto. de Ciencias ecológicas, 2003.
- Proyecto del tranque de relaves de la división Chuquicamata en el Salar de Talabre. CORFO, 2002.
- Geología de los depósitos salinos andinos, provincia de Antofagasta, Chile Universidad de Chile, 2003.
- Proyecto de lixiviación de óxidos de cobre y aumento de la capacidad de tratamiento de mineral sulfurado. Minera la Escondida, EIA, 1996.
- Ampliación de la capacidad de producción en Agua Verde-Taltal. ESSAN S.A. Anteproyecto, 1995.
- Isotope hydrology of groundwaters in the pampa del Tamarugal, Chile. O. Suzuki, C. Silva, P. Fritz, E. Salati.
- Estudio ambiental por extracción de aguas subterráneas en la cuenca del Salar de Ascotán. Codelco, 2000.
- Hidrología Isotópica y el recurso agua del sector Esmeralda-Pica-Matilla CCHEN, Nucleotecnica V.4 N° 8, 1985.
- Oxygen and sulfur Isotopic Composition in the Salar de Llamara Basin-Chile R. Aravena, P. Fritz, O. Suzuki, 1998.

- Water chemistry and isotope study of streams and springs in northern Chile. R. Aravena, H. Peña, O. Suzuki, M. Magaritz, 1998.
- Evaluación de recursos hídricos en el sector de Pica, Hoya de la Pampa del Tamarugal, I Región C. Salazar, L. Rojas, A. Pollastri, 1998.
- Informes adicionales la Dirección General de Aguas, Quebrada de León y Pampa Llalqui. NAZCA, 2003.
- Estudio de impacto ambiental cuenca del salar de Ascotán, Sectores norte y sur. CODELCO, 1997.
- Programa de monitoreo terrestre Compañía contractual minera Candelaria. Informe anual. Cia. Minera Candelaria, 2000.
- Hidrogeología sector Piedra Pómez, Cia. Minera Casale, 1999.
- Estudio de impacto ambiental; proyecto El Abra, Cia. Minera El Abra, 2001.
- Estudio de impacto ambiental: proyecto extracción de aguas subterráneas en la cuenca del salar de Ollague- II región. Codelco, 2001.
- Evaluación hidrogeológica del Salar de Atacama. Cia. Minera Riochilex S.A., 2000.
- Proyecto minera Leonor. Cia. Minera Leonor, 1990.
- Características geoquímicas y pauta de evolución de las salmueras superficiales del Salar de Llamara, Chile Universidad de Zaragoza, de Antofagasta y Católica del Norte, 2000.
- Redes de vigilancia de calidad de aguas terrestres. Estadística hidroquímica nacional Etapa I. Ayala, Cabrera y asociados Ltda., 1994.
- Hidroquímica: Conceptos Fundamentales. Dpto. de Geología- Universidad de Salamanca (España). <http://web.usal.es/javisan/hidro>, F. Javier Sánchez San Ramón, 2002.
- Geoquímica de aguas en cuencas cerradas: I, II, III Regiones- Chile Universidad Católica del Norte. Volúmenes I, II, III, IV, Francois Risacher, 1999.
- Estudio hidrogeológico del valle del río Copiapó, segmento embalse Lautaro-Piedra Colgada, Región de Atacama. Sernageomin, Igor Aguirre A., 1999.
- Análisis de requerimientos hídricos de Vegas y Bofedales, I y II Región. Informe Final. Departamento de Estudios y Planificación. Dirección General de Aguas. Ministerio de Obras Públicas, 2000.

- Química del agua. Madris-Mayo, José G. Catalán L, 1981.
- Técnicas isotópicas en estudios hidrogeológicos aplicación a la cuenca Chacabuco – Polpaico. Profesor guía: Guillermo Cabrera F., Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Ingeniería Civil, Centro de Recursos Hidráulicos. Santiago, Chile : Universidad de Chile, Santiago, Chile : Universidad de Chile, Orphanópoulos S, Damaris, 1982.
- Informe preliminar del Salar de Punta Negra. CORFO, 1978.
- Análisis de isótopos estables, en las aguas del río Copiapó y sus afluentes. Igor Aguirre, 1997.
- Oxygen and hydrogen in the porphyry Koper deposits at el Salvador. Chile Revista Economic Geology, 1976.
- Geoquímica del Salar de Atacama. Parte 1. Origen, composición y balance salino Revista Geológica de Chile. V23 N° 2, 1996.
- Mapeo Químico e investigación de la calidad de las aguas superficiales y subterráneas del valle del Copiapó, III Región. Universidad de Atacama, 1992.
- Informe prospección preliminar Salar de Llamara y Bellavista. CORFO, 1981.
- Proyecto ambiental geológico minero: Isotope hydrological study in the valley of Copiapó, 1998.
- Estudio físico-químico para la remoción de arsénico en el río Toconte. Universidad de Chile, 1966.
- Mineralogy and geochemistry of the salar grande salt rock (Primera Región, Tarapacá, Chile). Genetic implications. Universidad Barcelona-Católica del Norte, 1996.
- Central andean mantle-derived basalts and neogene mantle enrichment beneath the puna plateau. Universidad Ithaca, Universidad nacional de Jujuy, 1996.
- Isotopes and amphibole chemistry on hydrothermally altered granitoids in the north Chilean precordillera. Universidad Heidelberg, 1999.
- Lavas con bitumen en el cretácico inferior de Copiapó, región de Atacama Chile: petroquímica e importancia metalogénica. Revista geológica de Chile. <http://www.sernageomin.cl>, 1990
- Re- evaluation of mid-holocene deposits at quebrada Puripica, Northern Chile Universidad de Oxford. <http://www.sernageomin.cl>, 2003.

- Tapetes microbianos del salar de Lllamará, norte de Chile. Revista Chilena de Historia natural. <http://www.biologiachile.cl/sbch/rchn/>, 2003
- Isotope hydrology in Northern Chile: Salar de Pintados IAEA; Internacional Atomic Energy Agency. <http://www.iaea.org/>, 1978.
- Isotope hydrology in Northern Chile: Salar de Pedernales IAEA; Internacional Atomic Energy Agency. <http://www.iaea.org/>, 1978
- Isotope hydrology in Northern Chile: Salar de Surire IAEA; Internacional Atomic Energy Agency. <http://www.iaea.org/>, 1978
- Effects of postdepositional processes on snow composition of a subtropical Glacier (Cerro Tapado, Chilean Andes). Journal of geophysical Research, Vol. 106 N° d 23. <http://library.iem.ac.ru/j-geophys/jgr-toc.html>, 2001.
- Calidad del agua del río Cachapoal. CORFO, 1973.
- XXXIV Curso Internacional de Hidrología subterránea. Hidroquímica, Hidrología isotópica. Fundación Centro Internacional de Hidrología Subterránea. UPC-UNESCO, 2000.