



MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS
DIRECCION GENERAL DE AGUAS



UNIVERSIDAD CATOLICA DEL NORTE



Institut de recherche
pour le développement
INSTITUT DE RECHERCHE
POUR LE DÉVELOPPEMENT
(ex ORSTOM)

CONVENIO DE COOPERACION DGA – UCN – IRD

**GEOQUIMICA DE AGUAS
EN CUENCAS CERRADAS:
I, II Y III REGIONES - CHILE**

**VOLUMEN I I
ESTUDIO DE CUENCAS DE LA I REGION**

REALIZADO POR:

**François Risacher
Hugo Alonso
Carlos Salazar**

S.I.T. N° 51

Santiago, Enero de 1999

INDICE

PRIMERA REGION

Lagunas Cotacotani	1 - 11	[COT]
Lago Chungará	13 - 25	[CHR]
Río Lauca	27 - 35	[LAA]
Salar de Surire	37 - 55	[SUR]
Salar de Pintados	57 - 83	[PIN]
Laguna Lagunilla	85 - 93	[LGU]
Salar del Huasco	95 - 109	[HCO]
Salar de Coposa	111 - 127	[COP]
Salar de Michincha	129 - 141	[MIC]

Cada estudio de cuenca está presentado de manera independiente. Los estudios están organizados de la siguiente manera :

1. El **texto** que describe e interpreta la geoquímica de aguas de la cuenca, del salar o de la laguna

2. A continuación del texto siguen varios **anexos**:

- el mapa de la cuenca con la ubicación de los puntos de muestreo.
- la lista de los puntos de muestreo con las coordenadas UTM y el tipo de muestra.
- el cuadro de análisis.
- los diagramas circulares que representan gráficamente la composición química de las aguas de aporte (en meq/l).
- los diagramas de barras que muestran gráficamente la calidad de las aguas de aporte en función de las normas de potabilidad y de riego. En caso de pocas muestras, los diagramas de barras están agrupados con los circulares.
- el mapa geológico con las vías evolutivas de las aguas de aporte.

Los métodos de representación y de interpretación están descritos detalladamente en la parte **SINTEISIS** del estudio.

El informe completo está disponible en CD-ROM.

Advertencia:

Las figuras de este trabajo que se refieren o relacionen con los límites y fronteras de Chile, no comprometen, en modo alguno, al Estado de Chile, de acuerdo con el Art. 2º letra g) del D.F.L. Nº 83, del Ministerio de Relaciones Exteriores.

LAGUNAS COTACOTANI

Introducción

Las lagunas Cotacotani se encuentran en la Cordillera de los Andes de la Primera Región cerca de la frontera con Bolivia. La cuenca colinda con la del lago Chungará y la del río Lauca. Las principales características morfológicas y climatológicas del sistema lagunar son:

- altura: 4495 m
- superficie de la cuenca: 119 km²
- superficie de las lagunas: 6 km²
- precipitaciones: 379 mm/año
- evaporación potencial: 1070 mm/año
- temperatura media: 1,9°C

Los estudios anteriores que pudimos consultar son los de Niemeyer (1964), Mladinic et al. (1984 y 1985) y de Quintana et al. (1989). En condiciones climáticas normales, el sistema consiste en una laguna central con muchas islas e islotes rodeada por numerosas lagunitas aisladas. Cuando la visitamos, durante un periodo de sequía, la cota del espejo de agua había bajado de tal forma que la laguna central se había dividido en varias lagunas independientes. Hay consenso entre los autores para estimar la superficie de las lagunas en unos 6 km². Según Niemeyer, la alimentación superficial proviene sobre todo del río Benedicto Morales al norte (COT-5) y de la vertiente El Encuentro al este (COT-6). Además existen vertientes de menor caudal (COT-1). Niemeyer da un caudal promedio de 100 l/s para el río Benedicto Morales y de 20 l/s para el vertiente El Encuentro. Las lagunas Cotacotani tienen un exutorio hacia la cuenca de río Lauca. A través del río Desaguadero descarga hacia los bofedales de Parinacota, a un nivel 150 m más bajo, desde donde se origina el río Lauca. Según Niemeyer el caudal promedio de este desaguadero, que constituye la naciente del río Lauca, es de 260 l/s.

Aguas de aporte.

Según los diagramas circulares, las aguas de aporte son bicarbonatadas con proporción variable de Na, Ca y Mg. La clasificación por vía evolutiva muestra dos tipos de aguas. Las aguas del río Benedicto Morales (COT-5) y de la vertiente El Encuentro (COT-6) pertenecen a la vía alcalina sulfatada, mientras que la del manantial COT-1 es de la vía alcalina carbonatada. No se nota una correlación entre las formaciones geológicas y las vías evolutivas; así las aguas COT-1 y de la vertiente El Encuentro, que salen de la misma formación, tienen diferente vía evolutiva. Sin embargo, de manera muy general, no hay discrepancia entre la geología predominantemente volcánica de la cuenca y la composición alcalina de los aportes. Los valores analíticos del río Benedicto Morales (COT-5) y de la vertiente El Encuentro (COT-6) provienen de datos inéditos de la Dirección General de Aguas (1986).

<u>APORTES</u>	<u>SALINIDAD</u> mg/l	<u>TIPO QUIMICO</u>		<u>VIA EVOLUTIVA</u>
		Cationes	Aniones	
COT-5	176.8	Na-Ca-Mg	/ HCO ₃ -SO ₄ - (Cl)	SO ₄ (D)
COT-1	305	Mg-Na- (Ca)	/ HCO ₃ - (SO ₄) - (Cl)	CO ₃
COT-6	484.9	Mg-Na- (Ca)	/ HCO ₃ -SO ₄ - (Cl)	SO ₄ (A)
<u>LAGUNAS</u>				
COT-2	720.1	Mg-Na- (Ca)	/ HCO ₃ -SO ₄ - (Cl)	SO ₄
COT-3	750.4	Mg-Na-Ca	/ HCO ₃ -SO ₄ - (Cl)	SO ₄
COT-4	2001.8	Mg-Na- (Ca)	/ SO ₄ -HCO ₃ - (Cl)	SO ₄

Tabla 1 : Composición de aguas de las lagunas Cotacotani

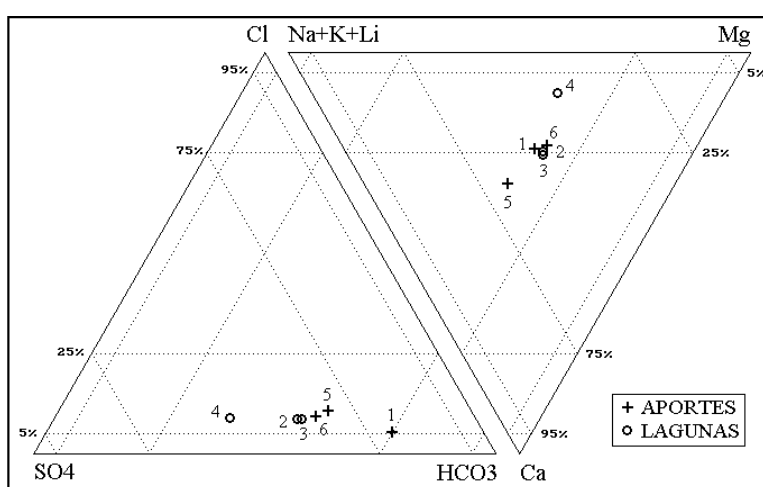


Fig.1 : Composición de aguas de Cotacotani

Agua de las lagunas

De todos los lagos y lagunas estudiadas en las tres primeras Regiones de Chile, las lagunas Cotacotani son las menos salinas. Eso es debido a que no se trata de una cuenca cerrada. Tenemos tres análisis de aguas de las lagunas, donde COT-2 y COT-3 corresponden a la laguna principal y tienen composiciones muy similares y COT-4 que proviene de una laguna aislada más concentrada. La composición de esta última corresponde a la laguna central concentrada 3 veces por evaporación. El orden de concentraciones (en meq/l) de las aguas de las lagunas es:

- aniones: HCO₃ > SO₄ > Cl > NO₃
- cationes: Mg > Na > Ca > K

Según este orden, las aguas de las lagunas son del tipo Mg / HCO₃, sin clara relación con las vías evolutivas sulfatada (Na / SO₄) y carbonatada (Na / CO₃) de las aguas de aporte. Sin embargo, este orden no refleja la vía evolutiva a la que pertenecen las aguas de las lagunas. El cálculo del estado de saturación de estas aguas con respecto a minerales muestra que las aguas COT-2 y COT-3 son 25 veces sobresaturadas en calcita (CaCO₃) y 7 veces en magnesita (MgCO₃), y el agua más salada COT-4 es 33 veces sobresaturada en calcita y 29 veces en magnesita. Tales valores, extremadamente altos, indican que algo está inhibiendo la precipitación de los carbonatos, probablemente el fosfato detectado en concentraciones apreciables (1,15 mg/l PO₄)

por Mladinic et al. (1984 y 1985). Si se concentrara más el agua de las lagunas, terminaría por precipitar la calcita y alguna sal de magnesio. Se puede observar que la concentración de Ca en la laguna salada COT-4 es parecida a la laguna principal, a pesar de ser la laguna salada casi tres veces más concentrada.

El agua de las lagunas está muy lejos del equilibrio termodinámico. No se puede utilizarla tal como es para los modelos de simulación que se basan en el equilibrio termodinámico. Por eso, hemos calculado cual sería la composición del agua si precipitaría la calcita y la magnesita hasta llegar al equilibrio con la solución. La alcalinidad bajaría de 5,67 a 2,82 meq/l, el pH de 9,23 a 8,77, el calcio de 53,7 a 10,3 mg/l, el magnesio de 53,7 a 46,4 mg/l y la salinidad total de 750 a 550 mg/l. En este caso el orden de concentración de los componentes cambia a:

- aniones: $SO_4 > HCO_3 > Cl > NO_3$
- cationes: $Mg > Na > Ca > K > Li$

Aparece una composición al equilibrio de tipo Mg-Na / SO_4 . Sin embargo, si se simula la evaporación de esta agua, rápidamente precipitan sales de magnesio (carbonatos y silicatos), lo que reduce la concentración de Mg muy por debajo de la del Na. La salmuera resultante es del tipo Na / SO_4 -Cl. El agua de las lagunas Cotacotani pertenece entonces a la misma vía evolutiva sulfatada (Na / SO_4 -Cl) que la del río Benedicto Morales y de la vertiente El Encuentro.

Simulación de la evaporación de los aportes

En la tabla 1 se presenta las composiciones teóricas que se obtiene simulando la evaporación de cada aporte hasta llegar a la salinidad del agua del lago *al equilibrio con la calcita y la magnesita*, es decir después de haber removido las cantidades necesarias de Ca, Mg y alcalinidad. Cada una de las composiciones así calculada (COT-1e, 5e, 6e) corresponde a la que se obtendría si el aporte considerado fuese el único al lago y si no ocurriese ninguna sobresaturación en las aguas que se evaporan. Se nota que la composición del lago al equilibrio (Lago(eq)) es bastante parecida a la del agua evaporada de la vertiente El Encuentro (6e), con excepción del boro y de la sílice.

<u>COT</u>	<u>1e</u>	<u>5e</u>	<u>6e</u>	<u>Lago(eq)</u>	<u>lago</u>
pH	8,87	8,79	8,78	8,77	9,23
alc	3,50	3,01	2,97	2,82	5,67
Cl	24,5	38,6	33,9	32,1	32,1
SO₄	135	150	168	192	192
B	0,501	3,80	1,42	0,602	0,602
Si	34,5	31,2	31,2	14,4	14,4
Na	99,0	76,9	71,5	70,2	70,2
K	19,6	11,9	13,3	11,8	11,8
Ca	5,65	9,12	9,39	10,3	53,7
Mg	23,3	37,8	42,6	46,4	53,7
STD	550	550	550	550	550

Tabla 2 : Comparación de las aguas de aporte evaporadas con las aguas de las lagunas Cotacotani

ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

Eso sugiere que lo esencial de los aportes proviene de la vertiente El Encuentro, o de aguas subterráneas de misma composición. La influencia del río Benedicto Morales o de la vertiente COT-1 parece secundaria.

El componente que más diferencia muestra es la sílice, ya que hay 2 veces menos en el lago que lo que prevé la evolución normal de las aguas de aporte por evaporación. El consumo de sílice por las diatomeas es el mecanismo más probable para reducir la concentración de este componente. El boro presenta una concentración bien inferior en el lago a la prevista por el modelo de simulación. Este componente es comúnmente removido por adsorción sobre arcillas (ilita).

Balance hídrico de las lagunas

Tratándose de una cuenca abierta, no se puede discriminar las pérdidas por el exutorio y por las infiltraciones. La fórmula que expresa las infiltraciones de un lago en cuenca cerrada se aplica tal como cual, pero el resultado representa la suma de los volúmenes de agua eliminados a la vez por el desagadero y por las infiltraciones.

El único componente conservativo que podemos utilizar es el cloruro. Lamentablemente, la concentración de litio en las aguas de aporte está demasiado cerca del límite de detección analítico. La concentración promedio en cloruro de los aportes es la de la vertiente El Encuentro.

Los valores que utilizaremos para establecer el balance hídrico de la laguna son:

- evaporación potencial: $H_e = 1,07 \text{ m/año}$
- precipitaciones: $H_p = 0,379 \text{ m/año}$
- superficie del lago: $S = 6 \times 10^6 \text{ m}^2$
- concentración Cl en los aportes $C_{ap} = 20,9 \text{ mg/l}$
- concentración Cl en el lago $C_L = 32,1 \text{ mg/l}$

Se obtiene así el volumen de aportes superficiales y subterráneos:

$$V_{ap} = S(H_e - H_p) / (1 - C_{ap}/C_L) = 11,9 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año} = 377 \text{ l/s}$$

y el volumen de las pérdidas:

$$V_{ex} = S(H_e - H_p) / (C_L/C_{ap} - 1) = 7,7 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año} = 245 \text{ l/s}$$

Niemeyer (1964) indica un gasto del desagadero de 260 l/s, bien parecido a nuestra estimación de las pérdidas. Eso sugiere que las infiltraciones por el fondo de las lagunas no deben ser muy importantes. La superficie de la cuenca de drenaje es de 113 km². El volumen de agua que cae en la cuenca es aproximadamente de:

$$V_{cuenca} = 113 \times 10^6 \times 0,379 = 42,8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año} = 1358 \text{ l/s}$$

El coeficiente de escurrimiento es de: $V_{ap} / V_{cuenca} = 0,28$

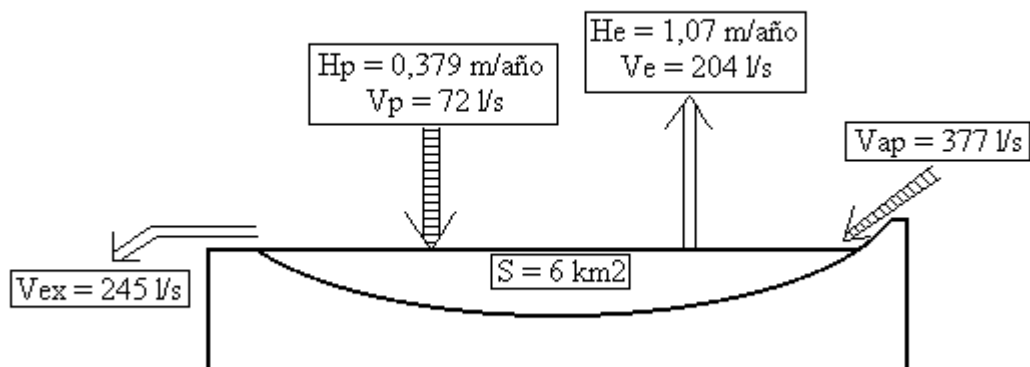


Fig.2 : Balance hídrico de las Lagunas Cotacotani

Calidad de agua

Según datos del año 1986, El río Benedicto Morales tiene un contenido en arsénico demasiado elevado para el consumo humano (0,09 mg/l) y está al límite en boro y arsénico para el riego. El manantial El Encuentro también está al límite de salinidad para el consumo humano y en ligero exceso de boro para riego. La vertiente COT-1 tiene todos sus componentes en concentraciones aptas para esos usos. El agua de las lagunas es de calidad aceptable para el riego y con un leve exceso de salinidad para el consumo humano. El agua salobre COT-4, que corresponde al agua de la laguna evaporada, no es apta tanto para el consumo humano como para el riego.

Conclusiones

Las lagunas Cotacotani son alimentadas por aguas de composición muy parecida a la de la vertiente El Encuentro ubicada justo al pie del volcán Paríncota. Puesto que los caudales observados en esta vertiente son débiles, se puede asumir que lo esencial de la alimentación de estas lagunas se hace por vía subterránea. Los caudales superficiales fueron estimados en 120 l/s (Niemeyer, 1964) mientras que el balance hídrico indica un volumen total de aportes de 377 l/s. Se deduce de eso que los aportes subterráneos constituyen el 68% de la alimentación de las lagunas. Los aportes principales, así como el agua de las lagunas, pertenecen a la vía alcalina sulfatada (Na / SO₄-Cl), en buen acuerdo general con la geología de la cuenca de drenaje.

Referencias y estudios anteriores

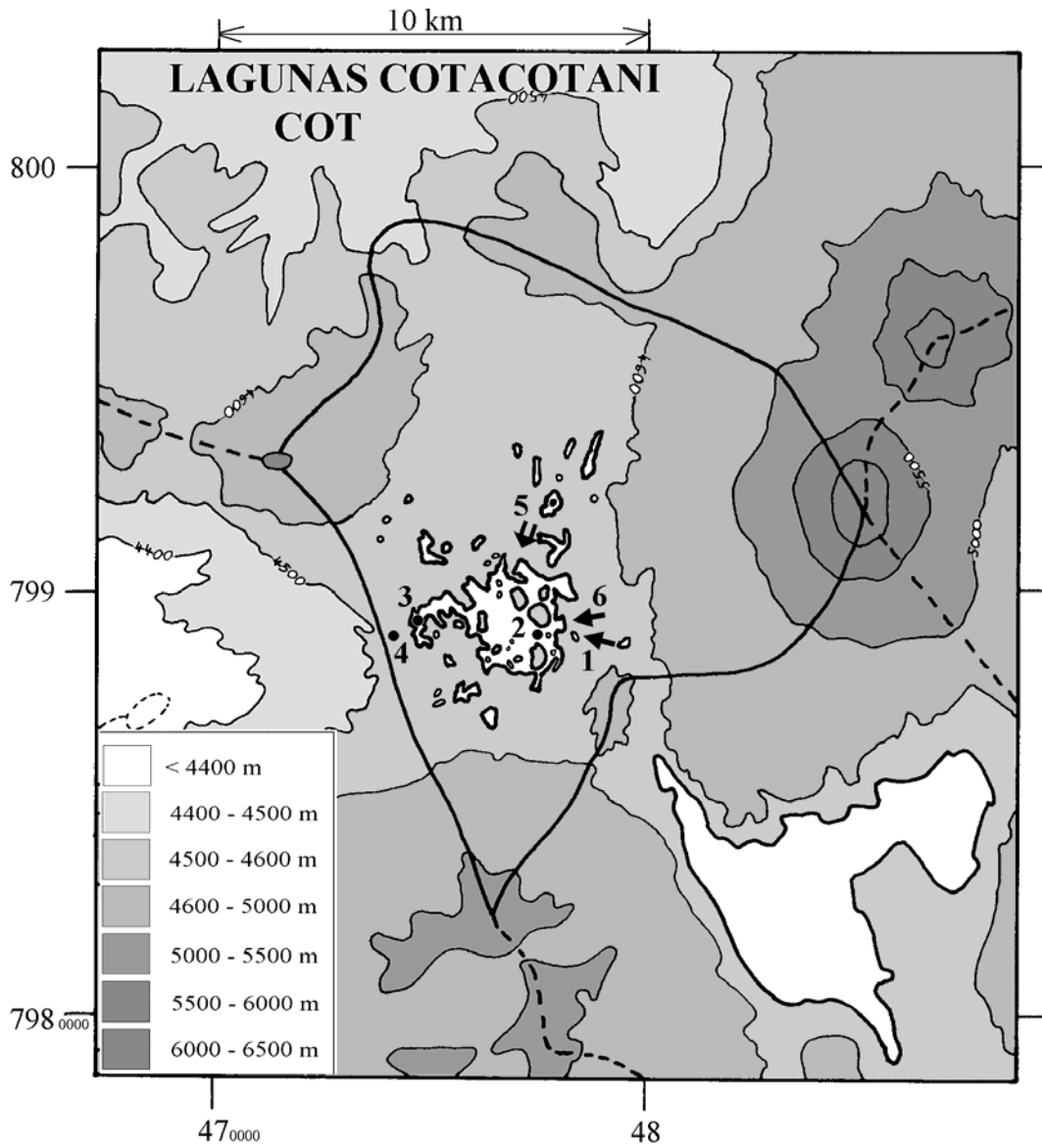
Mladinic, P.A.; Quintana, E.H.; Hrepic, N.V. 1984. Parámetros físicos y químicos de las aguas de los lagos Chungará y Cotacotani, I Región (Chile). IDESIA (Chile), vol.8, 5-17.

Mladinic, P.A.; Quintana, E.H.; Hrepic, N.V. 1985. Condiciones físicas y químicas de las aguas de los lagos Chungará y Cotacotani, I Región. Universidad de Tarapacá, Departamento de Química, Informe final, 45p.

Niemeyer, H. 1964. Ampliación de los recursos del río Lauca. Revista Chilena de Ingeniería, nº 303, 2-11

Quintana, E.H.; Mladinic, P.A.; Hrepic, N.V. 1989. Red nacional mínima de control de lagos, Primera Región. Estudio de los lagos Chungará y Cotacotani. Universidad de Tarapacá, Departamento de Química, Dirección General de Aguas y Corporación Nacional Forestal, Informe final, 51p.

➔ MANANTIAL FLUYENTE	➔ RIO, RIACHUELO	○ POZO
➤ MANANTIAL DIFUSO	• LAGUNA, POZA	□ CALICATA, DREN, CAPTACION



**LAGUNAS COTACOTANI
COT**

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE	METROS	
COT-1	29/05/96	12 ^H 40	479008	7988912	4550	Manantial corriente
COT-2	29/05/96	13 ^H 25	477640	7989060	4495	Laguna
COT-3	29/05/96	16 ^H 05	474503	7989097	4495	Laguna (bocatoma)
COT-4	29/05/96	16 ^H 50	473881	7988953	4495	Laguna
COT-5	06/08/86	16 ^H 45	478333	7991526	4560	Río Benedicto Morales
COT-6	06/08/86	14 ^H 05	478565	7988858	4530	Manantial El Encuentro

NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
COT-1	315	7,6	5,6	1,000	6,26	2,61	5,96	0,011	0,0015	33,0	0,701	0,122	37,8	0,0055	24,2	4,77	0,083	16,5	17,1
COT-2	885	14,2	11,4	1,000	8,59	5,20	29,7	0,026	0,0049	182	nd	0,597	17,4	0,0296	66,5	11,6	0,16	48,9	51,3
COT-3	891	6,3	9,5	1,000	9,23	5,67	32,1	0,013	0,0042	192	0,012	0,602	14,4	0,0338	70,2	11,8	0,17	53,7	53,7
COT-4	2330	7,7	na	1,002	9,21	11,2	90,5	0,106	0,0062	750	1,85	1,59	2,21	0,0384	224	42,6	0,56	59,3	191
COT-5	217	10	na	1,000	8,90	1,36	8,88	na	na	34,6	na	0,876	8,12	0,0899	17,5	2,74	na	15,2	8,75
COT-6	566	8,5	na	1,000	8,60	3,59	20,9	na	na	104	na	0,876	25,7	0,0067	44,2	8,21	na	30,9	35,5

T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l.

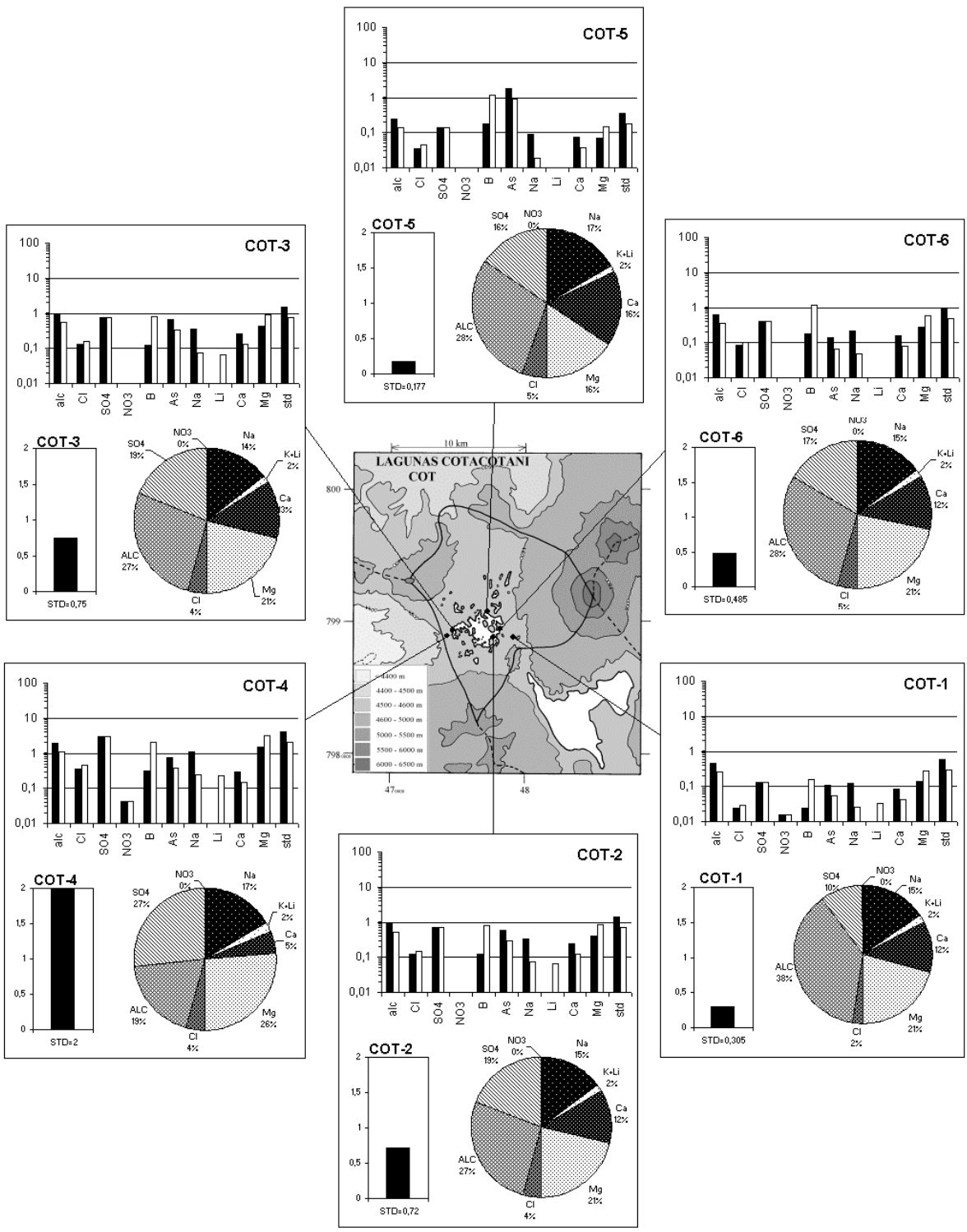
CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF. %	NUMERO	δ ¹⁸ O	δ ² H
COT-1	299,4	159	0,0	170	3,414	3,477	1,8	COT-1	-15,13	-111
COT-2	720,1	290	12,1	1,2	9,870	9,838	0,3			
COT-3	750,4	264	37,9	0,31	10,48	10,57	0,9			
COT-4	2002	479	97,8	0,53	29,64	29,40	0,8			
COT-5	176,8	73,8	3,18	0,18	2,310	2,330	0,9			
COT-6	484,9	204	6,12	0,97	6,590	6,340	3,9			

Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.

S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l)

DIF.% = diferencia en%



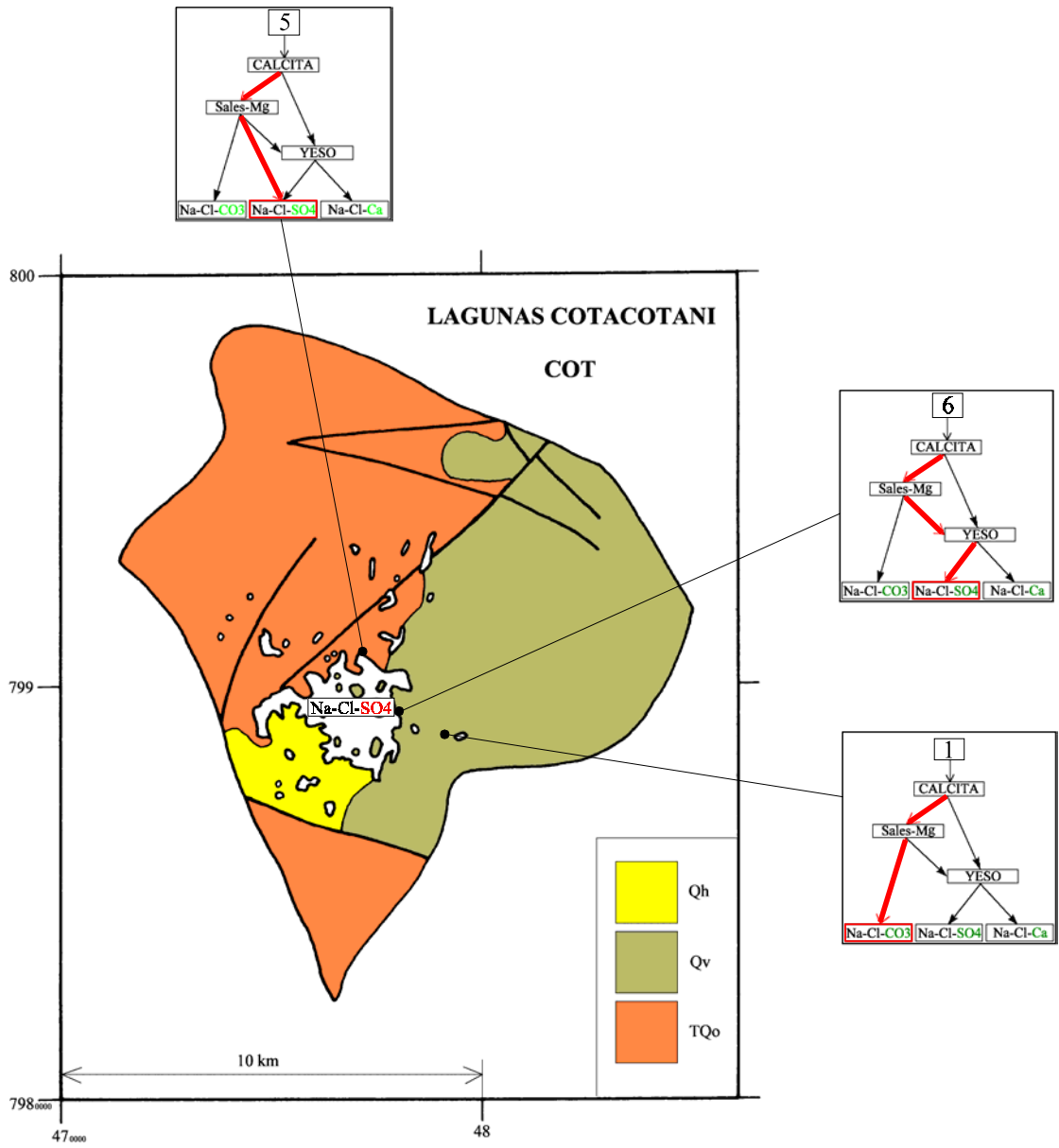
MAPA GEOLOGICO Y VIAS EVOLUTIVAS

COT

Qh : *Cuaternario*. Fm. Huaylas. Conglomerados, areniscas, lutitas y tobas ignimbríticas.

Qv : *Cuaternario*. Rocas volcánicas, lavas y piroclastos traquiandesíticos. Incluye azufferas.

TQo : *Plioceno - Pleistoceno*. Formación Oxaya. Tobas ignimbríticas y sedimentos clásticos continentales. También dolomitas y diatomitas.



LAGO CHUNGARA

Introducción

El lago Chungará se encuentra en la Cordillera de los Andes de la Primera Región cerca de la frontera con Bolivia. Sus principales características morfométricas y climatológicas son:

- altura: 4530 m
- superficie de la cuenca: 273 km²
- superficie de la laguna: 22,5 km²
- precipitaciones: 338 mm/año
- evaporación potencial: 1230 mm/año
- temperatura media: 1,9°C

Hemos consultados los estudios anteriores de Niemeyer (1964), Mladinic et al. (1984 y 1985) y de Quintana et al. (1989). Estos autores dan valores discrepantes de superficie desde 19 a 24,3 km². Según el mapa topográfico al 1/250.000 (el único del que disponemos) la superficie es de 22,5 km², valor intermedio que utilizaremos. Su profundidad máxima es de 30 - 35 m y el volumen de agua almacenada de 426 millones de m³. El más importante aporte superficial es el río Chungará con un caudal en estiaje de 300 l/s y 460 l/s en época de lluvias.

Aguas de aporte

Las composiciones de aguas del Lago Chungará están presentadas en la figura 1 y en la tabla 1. Hay dos tipos bien distintos de aguas de aporte:

- el río Chungará (CHR-2) con agua medianamente salina (229 mg/l STD) y concentraciones (en meq/l) casi iguales en SO₄ (22%) y alcalinidad (23%).
- las vertientes occidentales (CHR-3, 4, 6, 8) con aguas de muy baja salinidad (30 - 50 mg/l STD), alcalinidad elevada (32 - 42 %) y bajo SO₄ (7 - 17 %).

<u>APORTES</u>	<u>SALINIDAD</u> mg/l	<u>TIPO QUÍMICO</u>		<u>VIA EVOLUTIVA</u>
		Cationes	Aniones	
CHR-3	47.4	Na-Ca- (Mg)	/ HCO ₃ -SO ₄	
CHR-4	62.1	Na-Ca- (Mg)	/ HCO ₃ - (SO ₄) - (Cl)	CO ₃
CHR-6	64.7	Na-Ca- (Mg)	/ HCO ₃ - (SO ₄) - (Cl)	CO ₃
CHR-8	69.7	Na-Ca-Mg	/ HCO ₃ - (SO ₄)	CO ₃
CHR-2	229	Mg-Ca-Na	/ SO ₄ -HCO ₃	SO ₄ (A)
<u>LAGUNA</u>				
CHR-5	229	Mg-Ca-Na	/ HCO ₃ -SO ₄	SO ₄
CHR-7	1230	Mg-Na- (Ca)	/ HCO ₃ -SO ₄ - (Cl)	SO ₄
CHR-1	1633	Mg-Na- (Ca)	/ SO ₄ -HCO ₃ - (Cl)	SO ₄

Tabla 1 : Salinidades, tipos químicos y vías evolutivas de aguas del Lago Chungará.
CO₃ = vía carbonatada; SO₄ (A) = vía sulfatada alcalina.

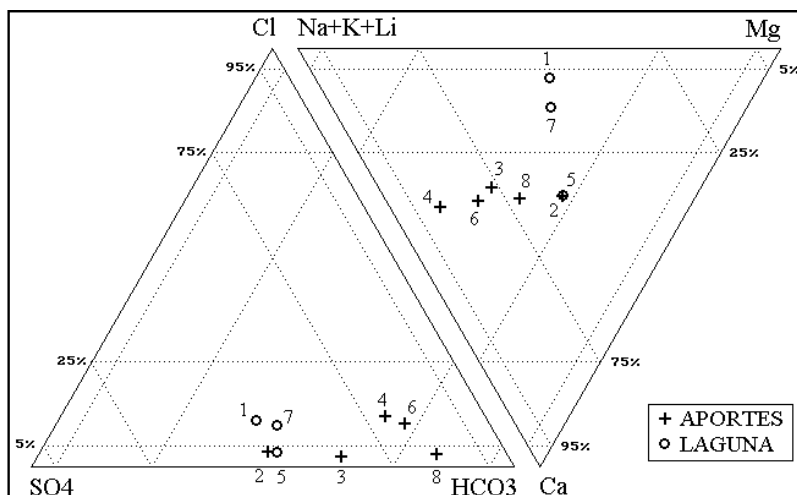


Fig.1: Composición de aguas y salmueras del Lago Chungará

El agua del río Chungará evoluciona por evaporación hacia una salmuera sulfatada (Na / SO₄-Cl), mientras que todas las aguas de las vertientes occidentales se concentran por evaporación hacia salmueras carbonatadas (Na / CO₃-Cl). Las aguas que siguen la vía alcalina carbonatada (CHR-3, 4, 6, 8) están asociadas a la Formación Oxaya (Plioceno - Pleistoceno) constituida de tobas ignimbríticas. No parece que estas aguas tengan contacto con los sedimentos clásticos continentales descritos en esta formación, lo que produciría aguas más concentradas y de vía evolutiva neutra. El río Chungará, más concentrado y con más sulfatos, parece estar relacionado con las rocas volcánicas cuaternarias más ricas en azufre, según el mapa geológico.

Agua del lago

El quimismo del lago Chungará ha sido descrito con mucho detalle por Mladinic et al. (1984 y 1985) y de Quintana et al. (1989). Es un lago de composición bastante homogénea. Su salinidad de 1,2 g/l es muy baja por estar en una zona árida. De todos los lagos y lagunas sin exutorio que hemos estudiado en el norte chileno, es el de menor salinidad. El orden de concentraciones es (en meq/l; ver diagrama circular):

- aniones: HCO₃ > SO₄ > Cl > NO₃
- cationes: Mg > Na > Ca > K > Li

Según este orden, las aguas del lago son del tipo Mg / HCO₃, sin clara relación con las vías evolutivas carbonatada (Na / CO₃) y sulfatada (Na / SO₄) de las aguas de aporte. Sin embargo, este orden es algo engañoso. Hemos calculado el estado de saturación del agua del lago con respecto a unos 80 minerales. El agua del lago está 22 veces sobresaturada con respecto a la calcita (CaCO₃) y 11 veces con respecto a la magnesita (MgCO₃). El agua más concentrada de una poza de evaporación a la orilla norte del lago (CHR-1) está 44 veces sobresaturada en calcita y 53 veces en magnesita. Tales valores, extremadamente altos, son poco comunes. Algo inhibe la precipitación de la calcita en el lago, probablemente el fosfato detectado por Mladinic et al. (1984) en concentraciones apreciables (2,62 mg/l PO₄). Si se concentrara más el agua del lago, terminaría por precipitar la calcita o la aragonita y algún sal de magnesio. Ya se puede notar que entre el agua del lago (CHR-7) y el agua más concentrada de la poza de evaporación (CHR-1),

hay una reducción de la proporción de alcalinidad y Ca. El agua del lago Chungará está muy lejos del equilibrio termodinámico. No se puede utilizarla tal como es para los modelos de simulación que se basan en el equilibrio termodinámico. Por eso, hemos calculado cual sería la composición del agua si precipitaría la calcita y la magnesita hasta llegar al equilibrio con la solución. La alcalinidad bajaría de 7,98 a 2,64 meq/l, el pH de 9,07 a 8,65, el calcio de 50,1 a 13,8 mg/l, el magnesio de 97,9 a 50,5 mg/l y la salinidad total de 1230 a 840 mg/l. En este caso el orden de concentración de los componentes cambia a:

- aniones: $\text{SO}_4 > \text{HCO}_3 > \text{Cl} > \text{NO}_3$
- cationes: $\text{Na} > \text{Mg} > \text{K} > \text{Ca} > \text{Li}$

Aparece la vía evolutiva sulfatada (Na / SO_4) que efectivamente tiene que seguir el agua del lago si se concentra por evaporación. El agua del lago Chungará pertenece entonces a la misma vía evolutiva alcalina sulfatada que la del río Chungará.

Simulación de la evaporación de los aportes

En la tabla 1 se presenta las composiciones teóricas que se obtiene simulando la evaporación de cada aporte hasta llegar a la salinidad del agua del lago *al equilibrio con la calcita y la magnesita*, es decir después de haber removido las cantidades necesarias de Ca, Mg y alcalinidad. Cada una de las composiciones así calculada (CHR-2e, 3e, 4e, 6e, 8e) corresponde a la que se obtendría si el aporte considerado fuese el único al lago y si no ocurriese ninguna sobresaturación en las aguas que se evaporan. Se nota que la composición del lago al equilibrio (Lago(eq)) es intermedia entre la del río Chungará evaporado (CHR-2e) y las de los aportes diluidos (CHR-3e, 4e, 6e, 8e), con excepción de la sílice.

CHR	2e	3e	4e	6e	8e	PROM	Lago(eq)	lago
pH	8,63	8,85	8,97	8,98	9,07	8,71	8,65	9,07
alc	2,09	3,56	4,49	4,72	5,74	2,47	2,64	7,98
Cl	23,2	15,2	61,2	72,1	25,8	32,3	61,8	61,8
SO₄	438	318	166	170	174	382	370	370
B	0,692	4,78	2,82	2,72	4,22	1,68	0,902	0,902
Si	36,7	37,4	37,4	38,0	38,4	36,6	1,18	1,18
Na	102	164	98,7	132	166	120	146	146
K	24,7	45,6	171	130	79,8	56,0	33,7	33,7
Ca	19,6	6,65	3,65	3,42	2,40	13,4	13,8	50,1
Mg	70,6	24,3	13,7	12,9	8,7	48,8	55,5	97,9
STD	840	840	840	840	840	840	840	1230

Tabla 2 : Comparación de las aguas de aporte evaporadas con las aguas del Lago Chungará
ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

Se buscó una composición promedia ponderada de los aportes cuya evaporación se acercara lo más posible a la composición del lago al equilibrio. Puesto que hay dos tipos bien distintos de aportes, se estableció primero el promedio de los 4 aportes muy diluidos (CHR-3, 4, 6, 8) que evolucionan hacia la vía carbonatada. Después se calculó un promedio ponderado entre esta composición y la del río Chungará (CHR-2) que evoluciona hacia la vía sulfatada. Se probó

varias ponderaciones. La composición promedia ponderada cuya evaporación produce una solución que más se acerca a la composición del lago al equilibrio, especialmente para el sistema carbonatado (pH, alc, Ca, Mg), corresponde a 25% de CHR-2 y 75% del promedio de los cuatro aportes muy diluidos CHR-3, 4, 6, 8. La composición de esta solución evaporada se llama PROM en la tabla 1.

Sin embargo, varios componentes de esta solución teórica PROM presentan concentraciones discrepantes con las del lago al equilibrio con la calcita y la magnesita (Lagos(eq)). Antes de discutir los posibles mecanismos responsables de estas diferencias, cabe recalcar que no tenemos la composición de todos los aportes, en particular los subterráneos y los que ocurren en época de lluvia. Además, no hemos ponderado individualmente cada uno de los aportes muy diluidos (CHR-3, 4, 6, 8). Partes de las discrepancias pueden provenir de estas aproximaciones.

El componente que más diferencia muestra es la sílice. Hay 30 veces menos sílice en el lago que lo que preve la evolución normal de las aguas de aporte por evaporación. El agua del lago está muy subsaturada con respecto a la sílice amorfa y a los silicatos de magnesio, los dos minerales que controlan la concentración de la sílice en este tipo de agua. El consumo de sílice por las diatomeas es el mecanismo más probable para reducir tanto la concentración de este componente. El potasio y el boro presentan concentraciones inferiores de 40 - 45% en el lago a las previstas por el modelo de simulación. Estos dos componentes son, por lo común, removidos por adsorción sobre vidrio volcánico para el potasio y sobre arcillas (ilita) para el boro. El cloruro y el sodio presentan una tendencia inversa pues están más concentrados en el lago que en la solución calculada. La diferencia en miliequivalentes (o milimoles) es del mismo orden para los dos elementos (1,2 meq), lo que sugiere un aporte adicional de cloruro de sodio en el lago como sales recicladas. En época seca, las napas alrededor del lago se evaporan por capilaridad a través de los suelos depositando las sales más solubles (especialmente NaCl) en superficie. En época de lluvia este cloruro de sodio es rápidamente lixiviado y aportado al lago aumentando así su concentración en Na y Cl.

Este estudio sugiere que 25% de los aportes al lago Chungara provienen del río Chungará, o de aguas subterráneas similares, mientras que 75% corresponden a aguas muy diluidas de su orilla occidental, o aguas subterráneas parecidas.

Balance hídrico del lago

El único componente conservativo que podemos utilizar es el cloruro. Lastimosamente, la concentración de litio en las aguas de aporte está por debajo o muy cerca del límite de detección analítico.

La concentración de Cl es muy homogénea en todo el lago. Mladinic et al. (1984, 1985) dan un valor promedio de 66,0 mg/l (15 análisis de octubre 1982 hasta abril 1984), mientras que Quintana et al. (1989) establecen un promedio de 57,4 mg/l (4 análisis de setiembre 1986 hasta octubre 1987). Esta diferencia refleja una variación de volumen del lago de 15% lo que corresponde a una variación de un metro del nivel del agua (valores establecidos a partir del mapa batimétrico de Villwock et al., 1985). El promedio de los dos valores es de 61,7 mg/l. Nosotros hemos encontrado 61,8 mg/l en una sola muestra. Eso parece indicar que nuestro muestreo se realizó en condiciones climáticas e hidrológicas promedias, lo que da alguna confiabilidad para utilizar nuestros datos puntuales.

El principal problema consiste en establecer la concentración promedio en cloruro de los aportes. La concentración promedio y ponderada que hemos utilizado para las simulaciones de evaporación (1,57 mg/l) no es suficiente para dar cuenta de la concentración de Cl en el lago. La lixiviación de sales reciclados aporta un notable suplemento de Cl al lago. Se puede calcular la concentración promedio en Cl que tienen efectivamente todos los aportes, incluyendo las aguas de lixiviación de sales recicladas. Una concentración de 3 mg/l Cl en las aguas de aporte es suficiente para obtener por evaporación una concentración de 61,8 mg/l Cl en el lago. Los valores que utilizaremos para establecer el balance hídrico de la laguna son:

- evaporación potencial: $H_e = 1,23 \text{ m/año}$
- precipitaciones: $H_p = 0,338 \text{ m/año}$
- superficie del lago: $S = 22,5 \times 10^6 \text{ m}^2$
- concentración Cl en los aportes $C_{ap} = 3 \text{ mg/l}$
- concentración Cl en el lago $C_L = 61,8 \text{ mg/l}$

Se obtiene así el volumen de aportes superficiales y subterráneos:

$$V_{ap} = S(H_e - H_p) / (1 - C_{ap}/C_L) = 21,1 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año} = 669 \text{ l/s}$$

el volumen de las infiltraciones:

$$V_i = S(H_e - H_p) / (C_L/C_{ap} - 1) = 1,0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año} = 32 \text{ l/s}$$

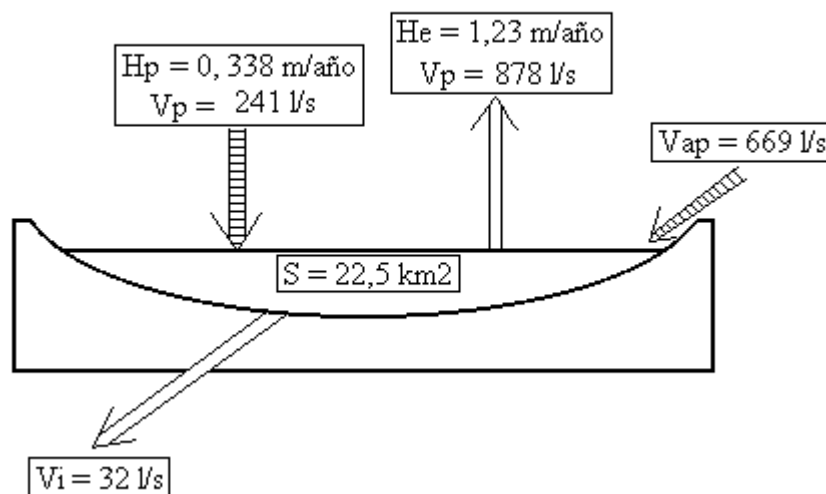


Fig.2 : Balance hídrico del lago Chungará

Como la superficie de la cuenca de drenaje es de 250 km^2 , el volumen de agua que cae en la cuenca es aproximadamente de:

$$V_{cuenca} = 250 \times 10^6 \times 0,338 = 84,5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año}.$$

El coeficiente de escurrimiento es de:

$$V_{ap} / V_{cuenca} = 0,25$$

Según Niemeyer (1964) el río Chungará (CHR-2 y CHR-5) aporta el 80% del agua superficial con un caudal promedio de 300 l/s en época seca y 410 l/s en época de lluvia. Eso corresponde aproximadamente a un promedio anual de 340 l/s. Las vertientes de la orilla occidental aportan

los 20% restante o sea 85 l/s. El caudal superficial total asciende entonces, según este autor, a 425 l/s. Los aportes subterráneos serían entonces de $669 - 425 = 244$ l/s. Hay una discrepancia entre la repartición de los aportes superficiales medidos por Niemeyer y la repartición estimada por nosotros: 75% para las aguas muy diluidas de vía evolutiva carbonatada y 25% para las aguas más concentradas de vía evolutiva sulfatada. Sin embargo, nuestra repartición se refiere a *tipos químicos* de aguas superficiales y subterráneas y la de Niemeyer a *caudales* de aportes superficiales. El río Chungará puede coleccionar a su desembocadura aguas diluidas de tipo carbonatado que se mezclan con las aguas sulfatadas. Además, no sabemos de que tipo son las aguas de aportes subterráneos. La anomalía señalada sugiere que podrían ser del tipo diluido / carbonatado. Si así fuera, la discrepancia estaría bien aminorada.

Calidad de agua

Todas las aguas de aporte (río Chungará y vertientes) son de muy buena calidad tanto para el consumo humano como para el riego. El agua del lago tiene un exceso de HCO_3 , SO_4 y de salinidad total para el consumo humano y un cierto exceso de SO_4 , B y Mg para el riego. Una mezcla con aguas más diluidas bajaría fácilmente la concentración de los componentes en exceso.

Conclusiones

El lago Chungará recibe dos tipos de agua de aporte: 75% de aguas muy diluidas de vía evolutiva alcalina carbonatada y 25% más concentradas y de vía evolutiva alcalina sulfatada. La mezcla de los tipos de aguas produce una solución de vía evolutiva alcalina sulfatada. A pesar de representar solamente la cuarta parte de la alimentación, dominan las aguas de aporte sulfatadas por ser netamente más concentradas que las aguas diluidas carbonatadas. Las aguas del lago están extremadamente sobresaturadas en carbonatos de calcio y magnesio, lo que se debe probablemente a la presencia de fosfatos. Esta sobresaturación hace que las aguas del lago Chungará son de tipo Mg / HCO_3 - SO_4 . Sin embargo, si se evaporaran más, el Ca y Mg serían removidos y la solución evolucionaría hacia salmueras de tipo Na / SO_4 . Por eso se puede clasificar las aguas del lago en la vía evolutiva alcalina sulfatada. El balance hídrico da un volumen de aporte superficiales y subterráneos de 669 l/s y un volumen de infiltraciones de 32 l/s o sea el 5% de los aportes.

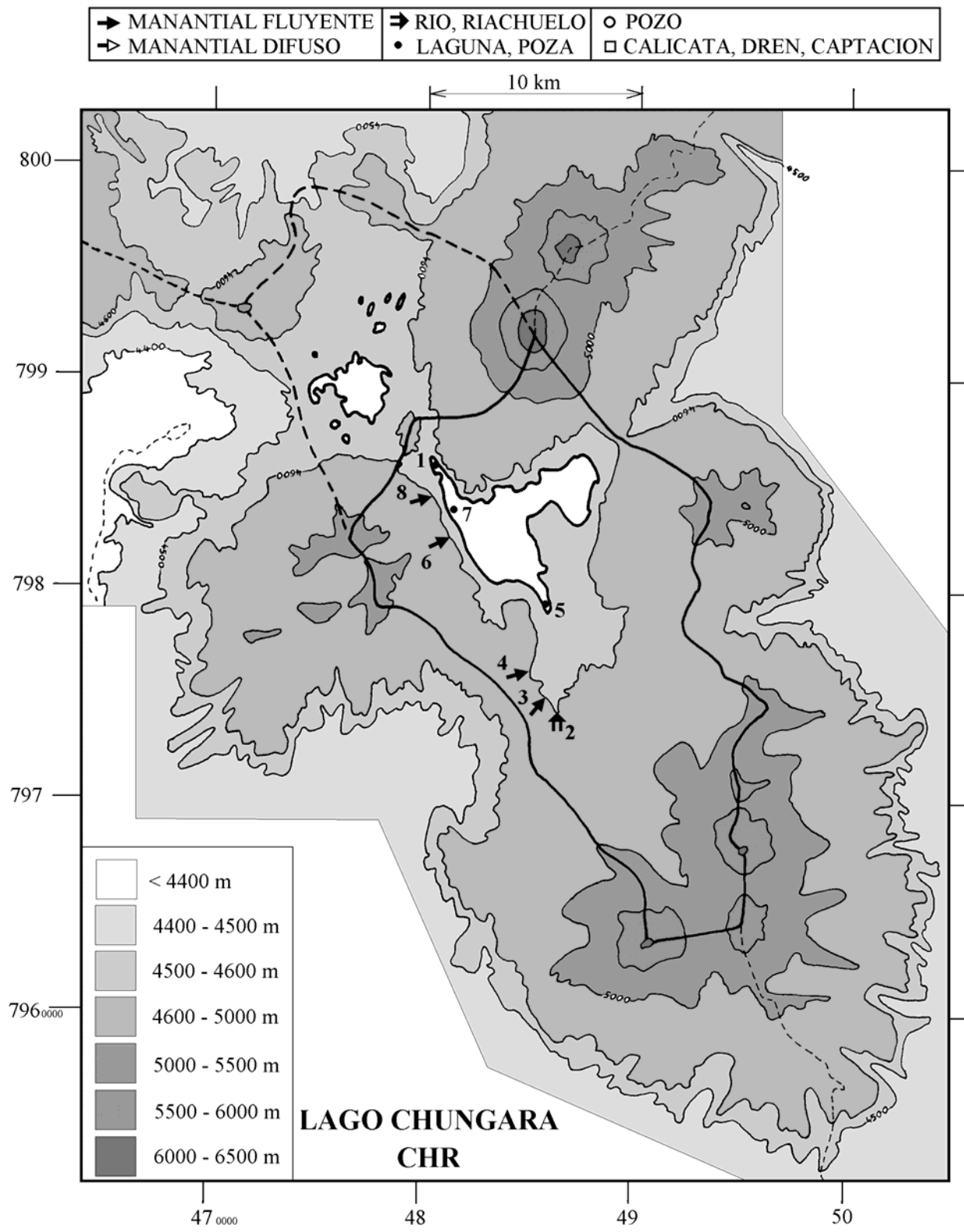
Referencias y estudios anteriores

Mladinic, P.A.; Quintana, E.H.; Hrepic, N.V. 1984. Parámetros físicos y químicos de las aguas de los lagos Chungará y Cotacotani, I Región (Chile). IDESIA (Chile), vol.8, 5-17.

Mladinic, P.A.; Quintana, E.H.; Hrepic, N.V. 1985. Condiciones físicas y químicas de las aguas de los lagos Chungará y Cotacotani, I Región. Universidad de Tarapacá, Departamento de Química, Informe final, 45p.

Niemeyer, H. 1964. Ampliación de los recursos del río Lauca. Revista Chilena de Ingeniería, n° 303, 2-11

Quintana, E.H.; Mladinic, P.A.; Hrepic, N.V. 1989. Red nacional mínima de control de lagos, Primera Región. Estudio de los lagos Chungará y Cotacotani. Universidad de Tarapacá, Departamento de Química, Dirección General de Aguas y Corporación Nacional Forestal, Informe final, 51p.



LAGO CHUNGARA
CHR

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
CHR-1	29/05/96	15 ^H 32	480240	7986163	4530	Lago (extremo NNW)
CHR-2	30/05/96	12 ^H 00	486548	7974343	4600	Río Chungará en bofedal
CHR-3	30/05/96	12 ^H 37	485852	7974908	4600	Manantial corriente
CHR-4	30/05/96	13 ^H 17	485169	7976043	4600	Manantial corriente
CHR-5	30/05/96	13 ^H 44	485900	7978952	4530	Laguna: desembocadura Río Chungará
CHR-6	30/05/96	15 ^H 10	481402	7982401	4600	Manantial corriente Mal Paso
CHR-7	30/05/96	15 ^H 35	481084	7984012	4530	Lago (estación bombeo)
CHR-8	30/05/96	16 ^H 05	480136	7984307	4630	Manantial corriente Ajata

NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
CHR-1	1950	9,2	11,0	1,002	9,87	10,2	96,2	0,046	0,0033	569	0,087	1,35	0,532	0,0337	226	51,2	0,42	36,2	148
CHR-2	229	8,5	9,0	1,000	7,75	1,23	3,23	0,007	0,0019	61,4	0,037	0,096	32,8	0,0094	14,2	3,44	0,021	18,3	11,7
CHR-3	29,0	5,8	6,5	1,000	6,48	0,199	0,249	0,004	0,0006	5,18	0,019	0,078	16,7	0,0005	2,78	0,743	0,0007	2,17	0,923
CHR-4	40,4	9,4	6,0	1,000	6,95	0,297	1,60	0,005	0,0020	4,32	0,50	0,074	20,6	0,0014	2,58	4,46	nd	3,33	0,559
CHR-5	227	6,4	11,9	1,000	9,24	1,30	3,09	0,007	0,0014	59,8	nd	0,108	31,4	0,0078	14,5	3,64	0,021	18,6	12,0
CHR-6	42,9	11,8	6,7	1,000	8,14	0,330	1,63	0,004	0,0013	3,84	nd	0,062	22,1	0,0016	2,99	2,93	nd	3,37	1,07
CHR-7	1300	7,7	6,3	1,001	9,07	7,98	61,8	0,018	0,0025	370	0,012	0,902	1,18	0,0297	146	33,7	0,27	50,1	97,9
CHR-8	48,0	8,3	6,5	1,000	7,80	0,462	0,568	0,001	0,0010	3,84	nd	0,093	19,2	0,0001	3,66	1,76	nd	4,09	1,92

T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l.

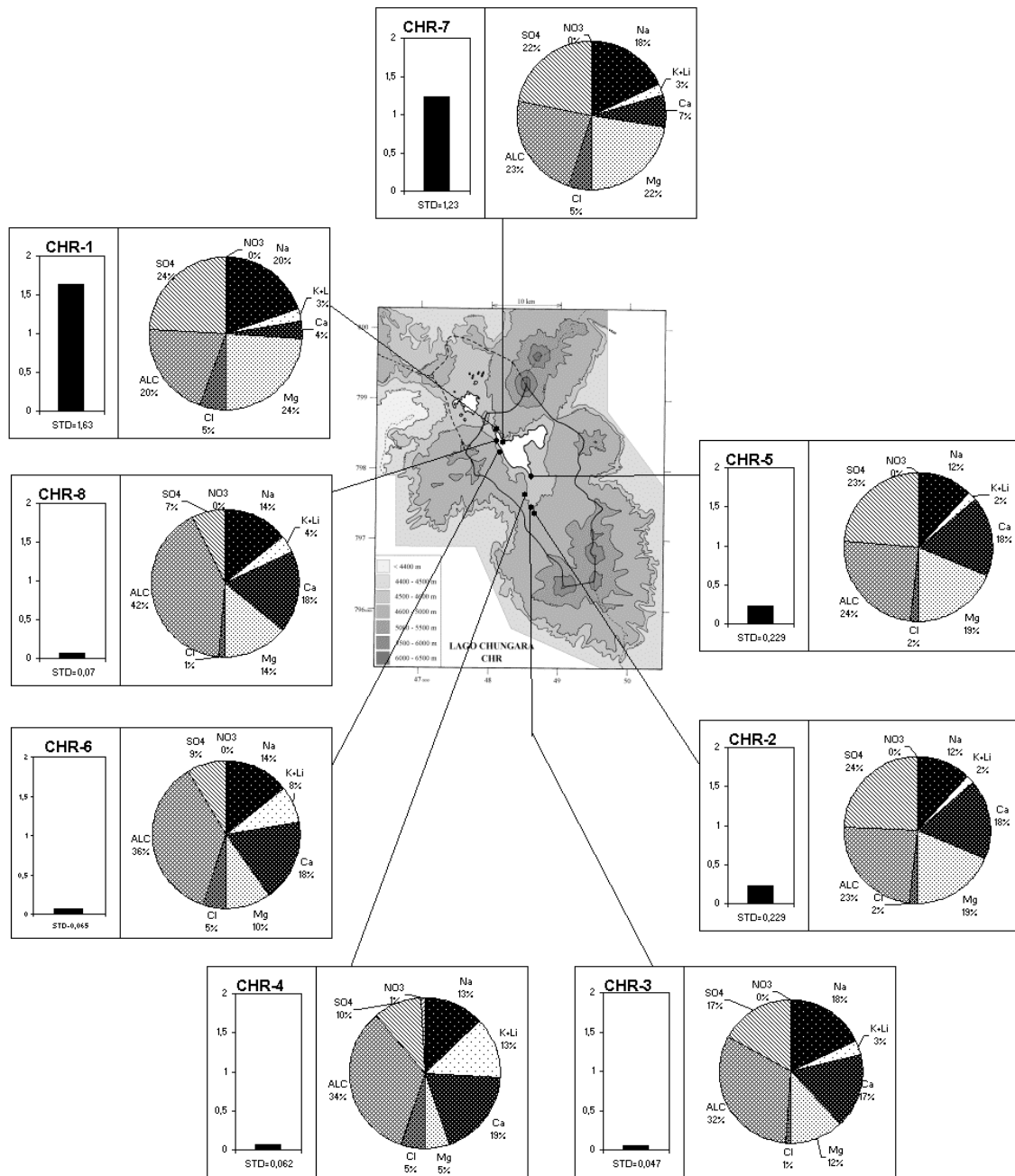
CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

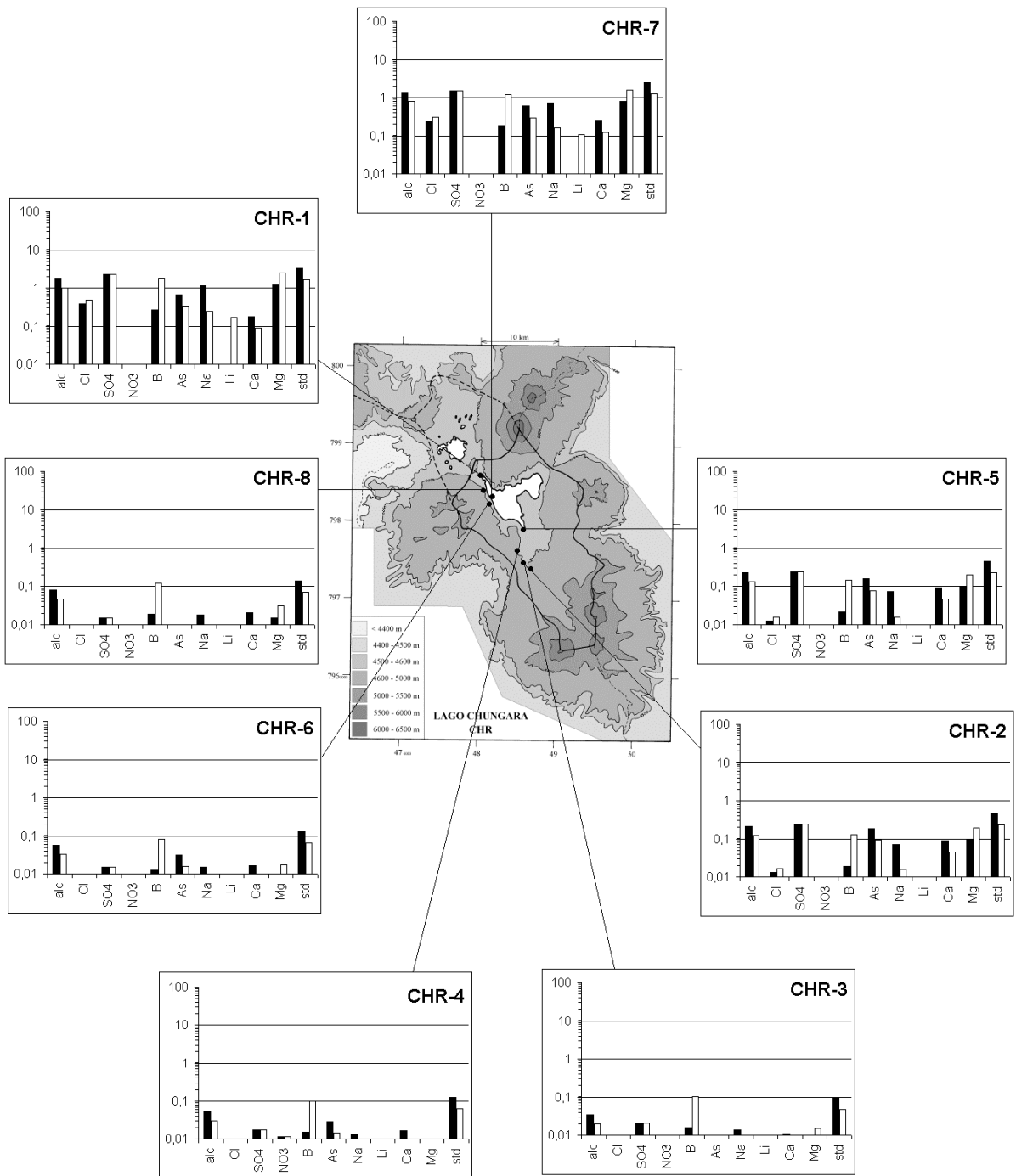
NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF. %	NUMERO	δ ¹⁸ O	δ ² H
CHR-1	1633	239	185	0,06	25,22	24,77	1,8	CHR-3	-13,92	-107
CHR-2	229,0	74,4	0,24	2,6	2,583	2,602	0,7	Análisis de oxígeno-18 y deuterio		
CHR-3	47,44	12,1	0,0	8,8	0,3241	0,3143	3,1			
CHR-4	62,14	18,1	0,0	4,1	0,4380	0,4400	0,5			
CHR-5	228,7	60,9	5,46	0,07	2,643	2,633	0,4			
CHR-6	64,71	19,3	0,12	0,27	0,4610	0,4560	1,1			
CHR-7	1230	390	46,3	0,62	17,79	17,42	2,1			
CHR-8	69,67	27,9	0,06	0,92	0,5660	0,5580	1,4			

Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.

S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l)

DIF.% = diferencia en %



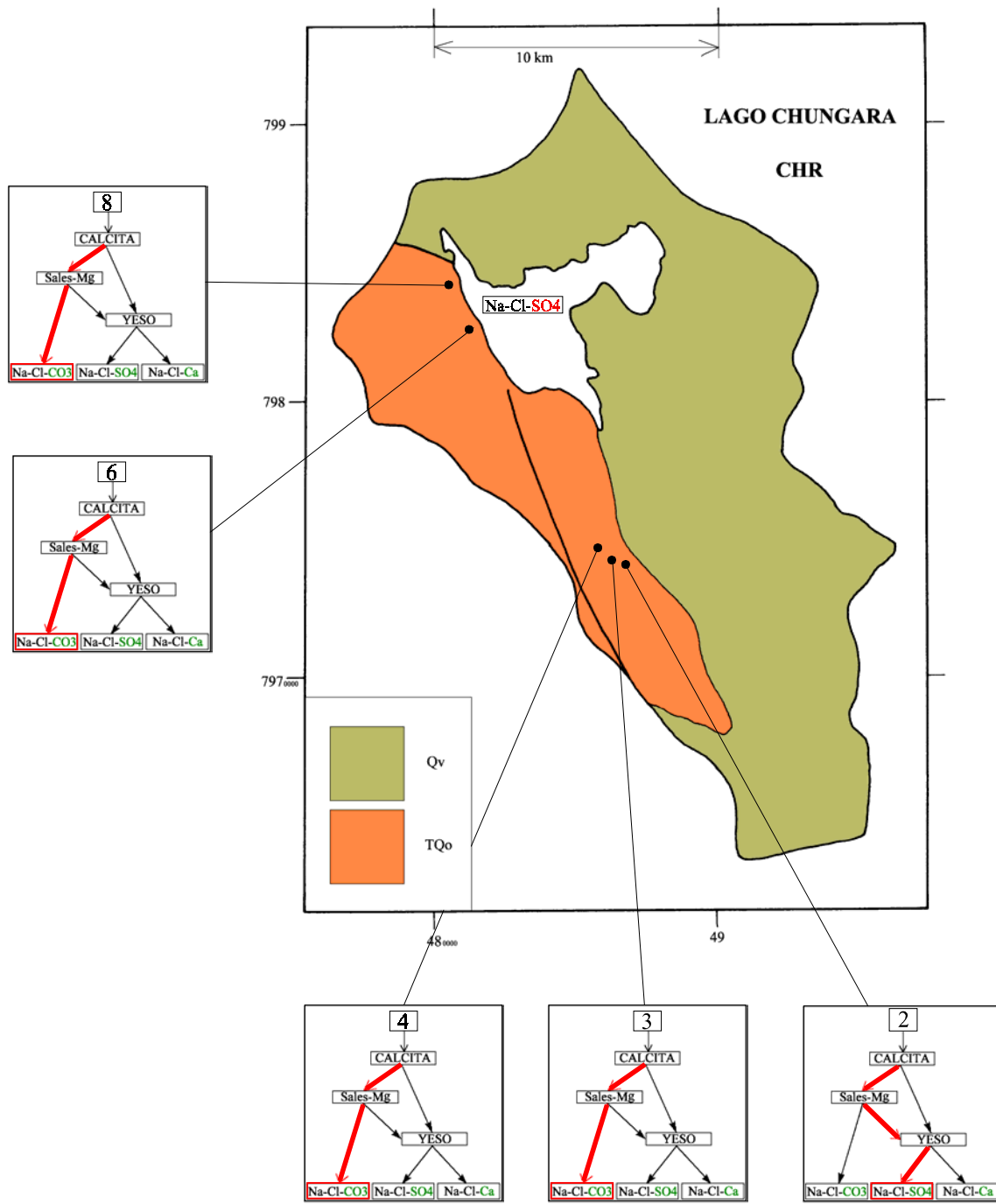


MAPA GEOLOGICO Y VIAS EVOLUTIVAS

CHR

Qv : *Cuaternario*. Rocas volcánicas, lavas y piroclastos traquiandesíticos. Incluye azufreras.

TQo : *Plioceno - Pleistoceno*. Formación Oxaya. Tobas ignimbríticas y sedimentos clásticos continentales. También dolomitas y diatomitas.



CUENCA DEL RIO LAUCA

Introducción

La hoya del río Lauca forma parte de la cuenca del salar de Coipasa en Bolivia, a la cual tributan también las hoyas chilenas de los ríos Isluga, Cariquima y Cancosa. Aunque no considerado inicialmente en el presente trabajo, se aprovechó la presencia en la zona para hacer un muestreo del río. El río Lauca nace en las ciénagas, o bofedal, de Parinacota, en las cuales desemboca el río Desaguadero, exutorio de las lagunas Cotacotani. A este bofedal confluyen además otras vertientes. En territorio chileno, el Lauca recibe varios afluentes, como el Guallatire y el Quiburcana. Este último drena la laguna y ciénaga de Paquisa.

No pretendemos hacer un estudio acabado de esta hoya, sino entregar algunas observaciones geoquímicas. Varios estudios más detallados han sido realizados. Uno de los primeros, que puso las bases de los trabajos ulteriores, es el de Niemeyer (1964). El río fue parcialmente desviado para uso en la central de Chapiquiña y para riego en Azapa. Varios pozos fueron perforados. Los caudales, río arriba a la salida de las ciénagas, varían de 300 a 1000 l/s. Las principales características morfométricas y climatológicas de la cuenca son:

- altura: 3900-4500 m
- superficie de la cuenca: 2374 km²
- precipitaciones: 394-345 mm/año
- evaporación potencial: 1140-1260 mm/año
- temperatura media: 4,2°C

Composición química

Las composiciones de aguas del río Lauca están presentadas en la figura 1 y en la tabla 1.

<u>APORTES</u>	<u>SALINIDAD</u> mg/l	<u>TIPO QUÍMICO</u>		<u>VIA EVOLUTIVA</u>
		Cationes	Aniones	
LAA-1	108	Na	/ HCO ₃ -SO ₄ - (Cl)	CO ₃
LAA-4	412	Na- (Ca) - (Mg)	/ HCO ₃ -SO ₄ -Cl	CO ₃
LAA-2	421	Na-Ca- (Mg)	/ SO ₄ -HCO ₃ - (Cl)	SO ₄ (A)
LAA-7	437	Ca-Mg- (Na)	/ SO ₄ - (HCO ₃)	SO ₄ (N)
LAA-8	470	Ca-Mg- (Na)	/ SO ₄ - (HCO ₃)	SO ₄ (N)
LAA-3	487	Mg-Ca- (Na)	/ SO ₄ -HCO ₃ - (Cl)	SO ₄ (A)
LAA-6	604	Na-Mg- (Ca)	/ HCO ₃ -SO ₄ - (Cl)	SO ₄ (A)
LAA-5	784	Mg-Na-Ca	/ HCO ₃ -SO ₄ - (Cl)	SO ₄ (A)

Tabla 1 : Salinidades, tipos químicos y vías evolutivas de aguas del río Lauca.
CO₃ = vía carbonatada ; SO₄ (N) = vía neutra sulfatada SO₄ (A) = vía alcalina sulfatada.

Hemos analizado 4 muestras de agua de ríos, dos de vertientes, una de pozo y una de laguna (Paquisa). La laguna no es más que la ampliación de un pequeño río: toda el agua que entra, sale por el exutorio. El agua más cercana a la naciente del río Lauca es una vertiente (LAA-5) cuya composición es muy parecida a las lagunas Cotacotani. Esta agua de tipo Mg / HCO_3 , que casi seguramente proviene de la cuenca de Cotacotani, constituye la primera alimentación del río. Es la más concentrada de todas las aguas que hemos encontrado en la cuenca. Después, progresivamente, otros aportes se mezclan río abajo con estas aguas cambiando su composición química y, en primer lugar, reduciendo su salinidad. Existen dos tipos de estas aguas diluidas que alimentan el río Lauca:

- aguas de tipo Na / HCO_3 (LAA-1, 4), que pertenecen a la vía evolutiva alcalina carbonatada
- aguas de tipo $Na-Ca / SO_4$ (LAA-2, 3, 7) que pertenecen a la vía alcalina sulfatada

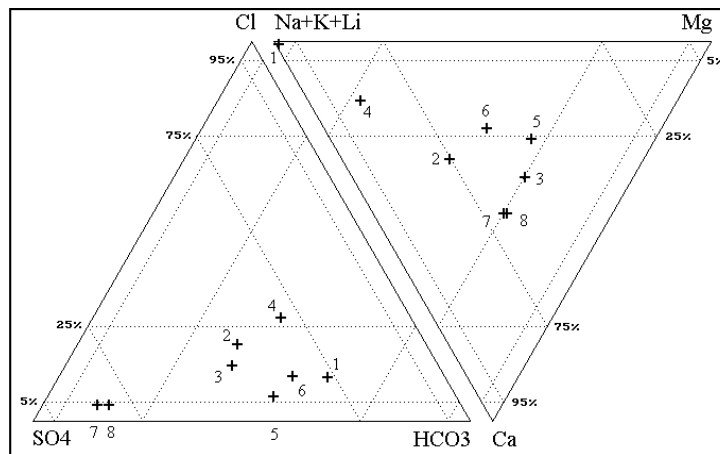


Fig.1: Composición de aguas del río Lauca

El agua que caracteriza más el primer tipo (LAA-1) proviene de un pozo surgente. Es una de las aguas más típicas de la vía alcalina carbonatada que hemos encontrado en las 52 cuencas estudiadas en el norte de Chile. El agua LAA-4 ya es una mezcla. Como ocurre generalmente, las aguas del tipo carbonatado son más diluidas que las del tipo sulfatado.

Relación con la geología

Se puede observar en el mapa geológico que las aguas de tipo Na / HCO_3 provienen de tobas ignimbríticas de la Formación Oxaya (TQo), mientras que las aguas de tipo $Na-Ca / SO_4$ drenan las traquitas y andesitas del Cuaternario (Qv). Esta misma diferenciación existe en aguas de la cuenca del lago Chungará. Las rocas volcánicas cuaternarias deben contener más azufre que las ignimbríticas de la Formación Oxaya. La oxidación del azufre acidifica las aguas de aporte, bajando su alcalinidad y aumentando su salinidad.

Calidad de agua

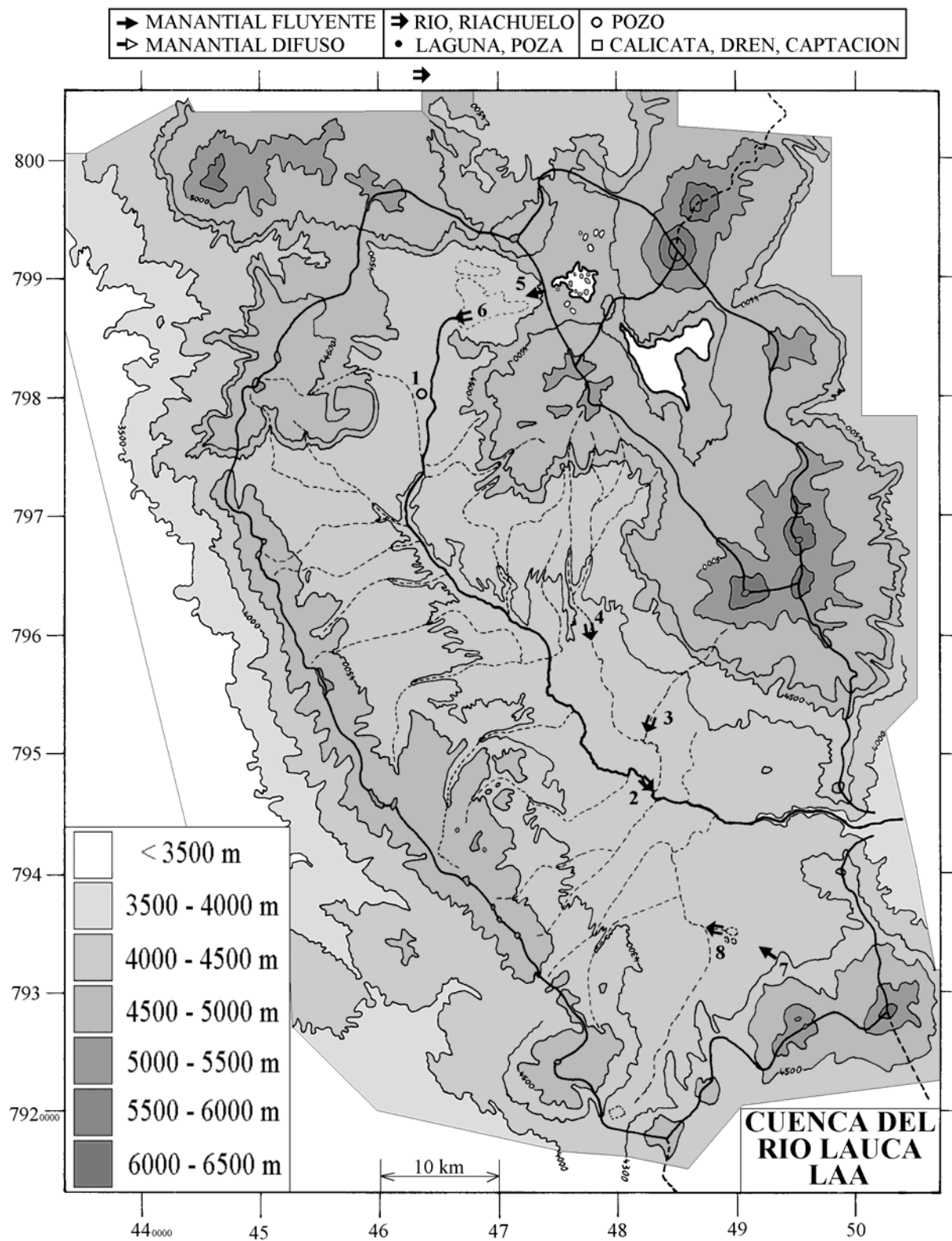
El agua de mejor calidad para cualquier uso es la del pozo surgente (LAA-1). En general, las demás aguas presentan concentraciones aceptables en componentes mayores, pero a menudo en exceso en arsénico y boro, limitantes para uso potable y riego respectivamente. Sorprende el contenido muy elevado en arsénico y boro del agua LAA-4, de tipo Na / HCO₃, la segunda más diluida siendo inepta tanto para el consumo humano como para el riego. El agua LAA-2 presenta el mismo problema. Un agua interesante es la de Paquiza (LAA-7) que tiene una calidad aceptable (casi al límite para arsénico) y un caudal importante que hemos estimado a unos 100 l/s. Esta vertiente alimenta la laguna Paquiza donde se evapora una parte del agua. Eso significa que la captación de esta vertiente afectaría la laguna Paquiza, pero no tanto al río Lauca mismo.

Conclusiones

La composición química de las aguas del río Lauca proviene de la mezcla de tres tipos de agua de aporte: el rebalse de las lagunas Cotacotani con aguas de salinidad relativamente elevada (800 mg/l) y de tipo Mg / HCO₃; aguas muy diluidas (100 mg) de tipo Na / HCO₃ que provienen de la lixiviación de las ignimbritas de la Formación Oxaya (Plioceno - Pleistoceno); y aguas de concentración intermedia (500 mg/l) de tipo Na-Ca / SO₄, que drenan las traquitas y andesitas del Cuaternario. La aptitud de uso de estas aguas es reducida por altos contenidos en arsénico y boro. Las mejores aguas parecen ser las napas subterráneas asociadas a la Formación Oxaya, tanto en la cuenca del río Lauca como en las cuencas vecinas.

Referencias y estudios anteriores

Niemeyer, H. 1964. Ampliación de los recursos del río Lauca. Revista Chilena de Ingeniería, n° 303, 2-11



**CUENCA RIO LAUCA
LAA**

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		METROS ALTURA	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
LAA-1	28/05/96	10 ^H 10	464168	7980123	4380	Napa (Pozo artesiano)
LAA-2	28/05/96	16 ^H 08	483159	7946196	4080	Río Lauca después Guayatiri
LAA-3	28/05/96	16 ^H 43	482420	7951661	4210	Río Guayatiri antes Lauca
LAA-4	28/05/96	17 ^H 12	477722	7960361	4260	Río Ancuta
LAA-5	29/05/96	17 ^H 08	473393	7988598	4495	Manantial corriente
LAA-6	30/05/96	16 ^H 40	466661	7986219	4390	Río Lauca (bocatoma)
LAA-7	12/08/95	17 ^H 25	492550	7933110	4190	Manantial corriente Paquisa
LAA-8	12/08/95	18 ^H 30	488871	7934490	4170	Río pantanoso ("Laguna") Paquisa

NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
LAA-1	95	21,5	4,6	1	8,26	0,549	3,59	0,023	0,0022	11,5	0,012	0,092	38,1	0,0174	18,3	3,13	0,028	0,168	0,08
LAA-2	560	12,6	6,5	1	9,03	2,07	40,5	0,086	0,0249	117	nd	1,36	29,1	0,202	53,4	6,80	0,12	35,4	17,0
LAA-3	618	11,8	6,7	1	8,54	2,53	34,2	0,068	0,0109	149	0,012	0,705	33,9	0,0142	32,7	6,65	0,042	46,5	31,1
LAA-4	564	9,6	7,3	1	9,28	2,43	54,0	0,108	0,0079	79,8	0,021	2,58	15,0	0,310	89,2	8,21	0,17	17,8	8,41
LAA-5	933	7,2	na	1	7,74	5,59	24,2	0,036	0,0060	215	0,021	0,524	13,9	0,0157	61,9	12,6	0,17	55,3	60,0
LAA-6	657	8,2	9,5	1	8,98	4,44	33,9	0,041	0,0069	137	0,012	1,15	15,7	0,133	69,5	10,3	0,15	38,7	37,9
LAA-7	541	14,4	5,6	1	7,12	0,758	8,73	0,025	na	239	nd	0,324	25,0	0,0652	30,8	5,08	0,037	54,1	21,7
LAA-8	625	10,1	7,6	1	9,56	1,01	9,51	0,030	na	253	nd	0,400	21,6	0,0547	34,0	4,85	0,035	60,6	24,5

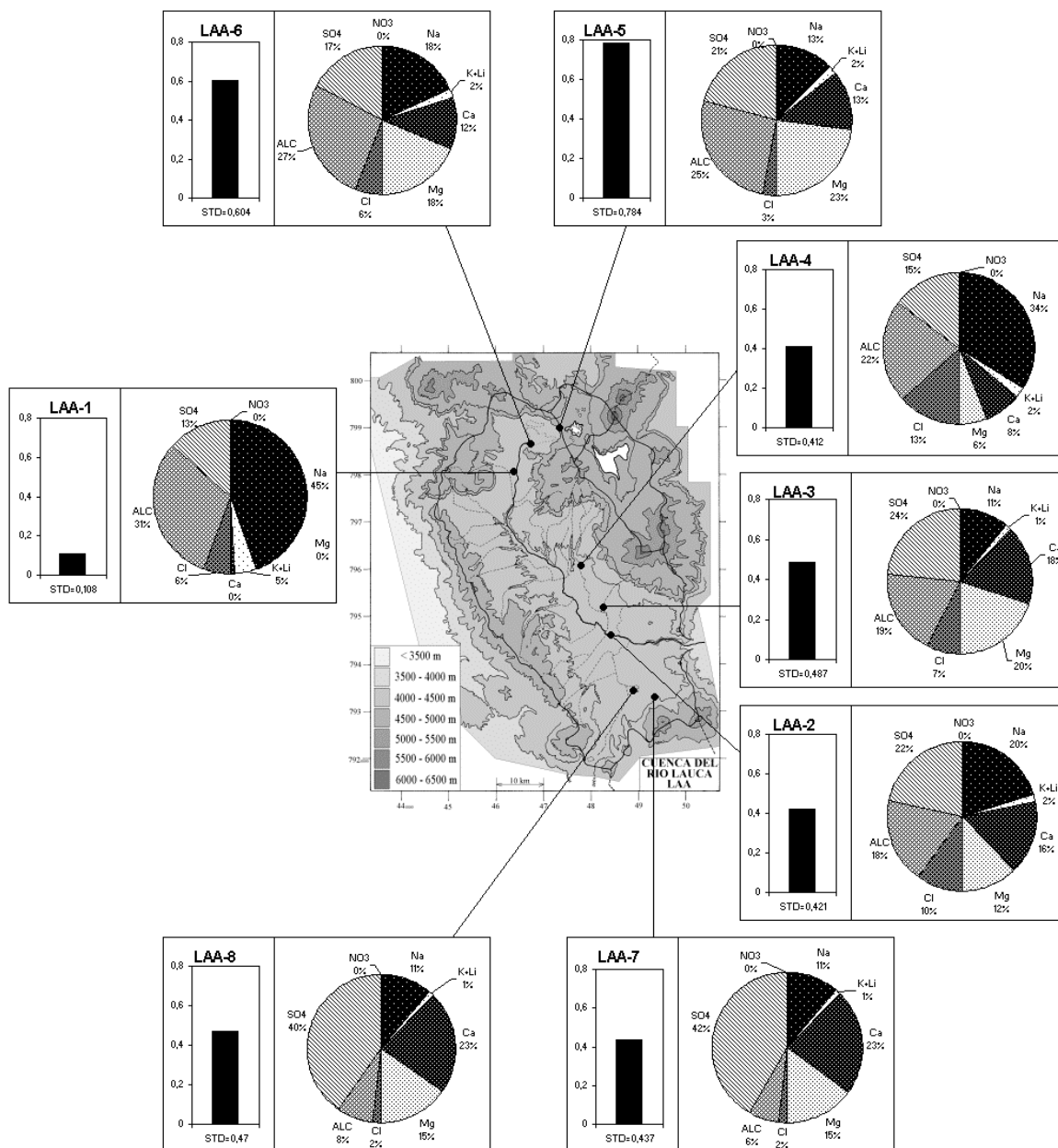
T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l.
 CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

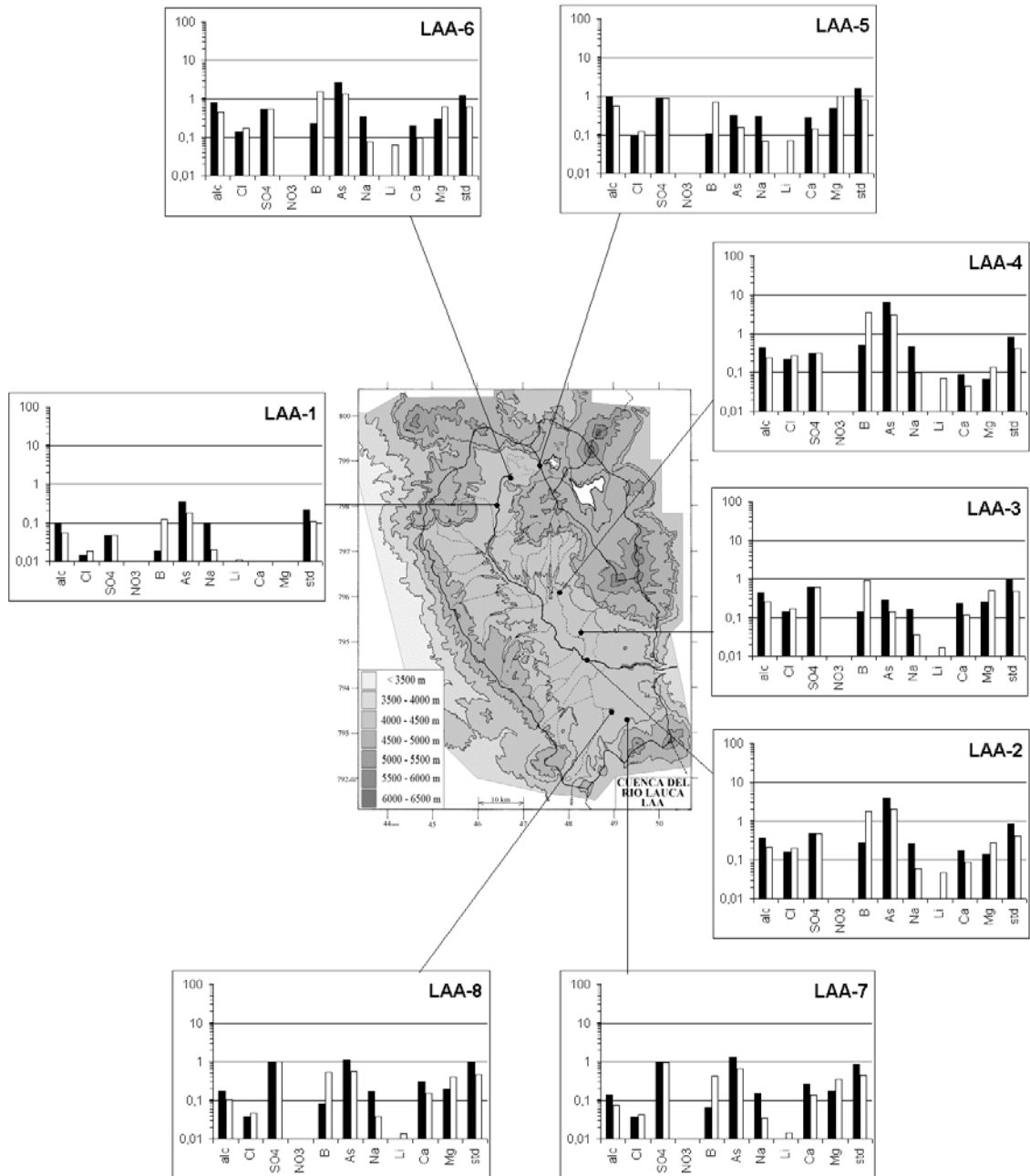
NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF. %
LAA-1	108,2	30,7	0,24	0,27	0,895	0,8902	0,5
LAA-2	421,4	101	8,16	0,16	5,677	5,650	0,5
LAA-3	486,5	142	4,44	0,70	6,476	6,594	1,8
LAA-4	412,3	113	11,7	0,11	5,695	5,612	1,5
LAA-5	783,8	337	1,74	12	10,74	10,75	0,2
LAA-6	604,2	231	17,3	0,44	8,355	8,256	1,2
LAA-7	436,7	46,1	0,06	5,7	5,959	5,984	0,4
LAA-8	470,3	29,8	9,12	0,02	6,649	6,558	1,4

NUMERO	δ ¹⁸ O	δ ² H
LAA-1	-13,67	-108
LAA-7	-15,34	-104

Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.
 S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l)

Análisis de oxígeno-18
 y deuterio





MAPA GEOLOGICO Y VIAS EVOLUTIVAS

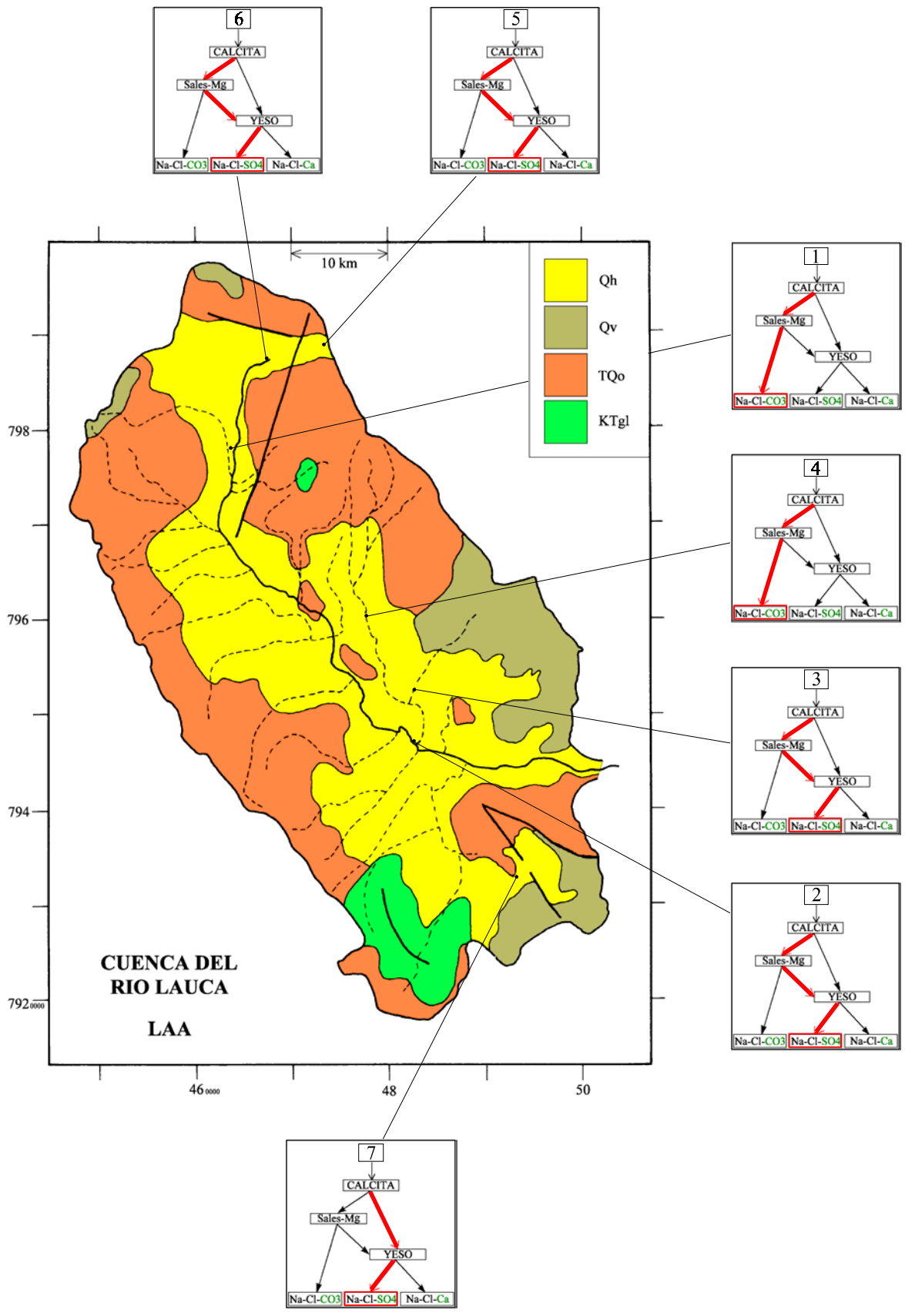
LAA

Qh : *Cuaternario*. Fm. Huaylas. Conglomerados, areniscas, lutitas y tobas ignimbríticas.

Qv : *Cuaternario*. Rocas volcánicas, lavas y piroclastos traquiandesíticos. Incluye azufreras.

TQo : *Plioceno - Pleistoceno*. Formación Oxaya. Tobas ignimbríticas y sedimentos clásticos continentales. También dolomitas y diatomitas.

KTgl : *Cretácico - Terciario*. Grupo Lupica. Brechas, tobas, lavas y sedimentos lacustres.



SALAR DE SURIRE

Introducción

El salar de Surire se encuentra en la Cordillera de los Andes de la Primera Región cerca de la frontera con Bolivia. Sus principales características morfométricas y meteorológicas son:

- altura: 4260 m
- superficie de la cuenca : 574 km²
- superficie del salar: 144 km²
- superficie de las lagunas : 5 - 14 km²
- precipitaciones: 250 mm/año
- evaporación potencial: 1280 mm/año.
- temperatura media : 2,7 °C

El 90% de la superficie del salar está constituido de limos arcillosos salinos húmedos, muy resbalosos. Las lagunas, poco profundas, tienen una extensión variable dependiente de la época del año. Es una boratera donde se explota la ulexita ($\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$) que forma lentes y capas muy cerca de la superficie. En el sector occidental del salar, en la boratera, la napa subterránea se encuentra a unos 50 cm de profundidad (análisis SUR-23). La geología del salar ha sido estudiada por Salas (1975). La evaporación y el balance hídrico del salar fueron estimados por Grilli y Vidal (1986).

Aportes de agua

Las composiciones de aguas del salar de Surire están presentadas en la figura 1 y en la tabla 1.

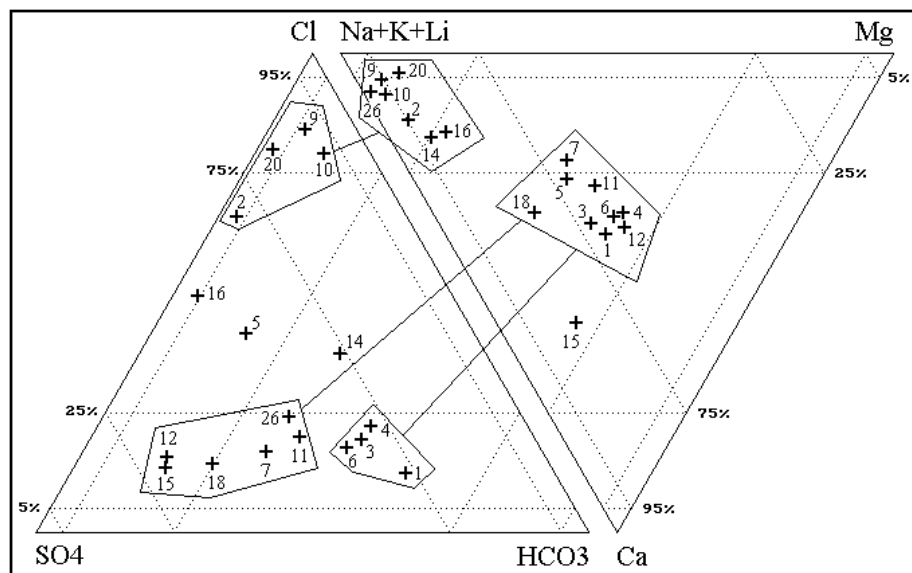


Fig.1: Composición de aguas y salmueras del salar de Surire.

El salar de Surire está rodeado de numerosos manantiales. Hemos muestreado y analizados 17 aguas de aporte: 11 vertientes fluyentes, 5 vertientes difusas y un riachuelo. Hay una vertiente que surge a dentro del salar mismo (SUR-20). Es el aporte más concentrado puesto que sus aguas atraviesan sedimentos salinos y napas de salmueras. Tres vertientes tienen fuerte influencia termal ($t > 30\text{ }^{\circ}\text{C}$: SUR-2, 9, 20) y cinco tienen influencia termal menor ($10 < t < 30\text{ }^{\circ}\text{C}$: SUR-6, 7, 12, 14, 15).

<u>APORTES</u>	<u>SALINIDAD</u> mg/l	<u>TIPO QUÍMICO</u>		<u>VIA EVOLUTIVA</u>
		Cationes	Aniones	
SUR-26	108	Na- (Ca)	/ SO4-HCO3- (Cl)	CO3
SUR-1	122	Ca-Na-Mg	/ HCO3-SO4- (Cl)	SO4 (A)
SUR-14	140	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl-HCO3-SO4	CO3
SUR-18	234	Na-Ca- (Mg)	/ SO4- (HCO3) - (Cl)	SO4 (N)
SUR-7	322	Na-Mg- (Ca)	/ SO4-HCO3- (Cl)	SO4 (A)
SUR-15	327	Ca-Na- (Mg)	/ SO4- (HCO3) - (Cl)	SO4 (N)
SUR-11	347	Na-Mg-Ca	/ SO4-HCO3- (Cl)	SO4 (A)
SUR-6	362	Ca-Na-Mg	/ HCO3-SO4- (Cl)	SO4 (A)
SUR-4	567	Mg-Ca-Na	/ HCO3-SO4- (Cl)	SO4 (A)
SUR-12	577	Ca-Mg-Na	/ SO4- (HCO3) - (Cl)	SO4 (N)
SUR-16	869	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl-SO4	SO4 (N)
SUR-5	1092	Na-Mg-Ca	/ Cl-SO4- (HCO3)	SO4 (N)
SUR-3	1302	Na-Ca-Mg	/ HCO3-SO4- (Cl)	SO4 (A)
SUR-10	1970	Na- (Ca)	/ Cl- (HCO3) - (SO4)	SO4 (D)
SUR-9	3002	Na- (Ca)	/ Cl- (SO4) - (HCO3)	SO4 (A)
SUR-2	4821	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl-SO4	SO4 (N)
SUR-20	17728	Na- (Mg)	/ Cl- (SO4)	SO4 (N)
<u>LAGUNAS</u>				
SUR-8	2006	Na- (Mg) - (Ca)	/ Cl-SO4- (HCO3)	SO4
SUR-25	7306	Na- (Mg)	/ Cl- (SO4)	SO4
SUR-22	11906	Na-Ca	/ SO4-Cl- (HCO3)	SO4
SUR-19	33527	Na	/ Cl- (SO4)	SO4
SUR-17	53850	Na- (Mg)	/ Cl-SO4	SO4
SUR-21	72925	Na- (Mg)	/ Cl- (SO4)	SO4
SUR-13	80994	Na- (Mg)	/ Cl- (SO4)	SO4
SUR-24	162044	Na	/ Cl- (SO4)	SO4
SUR-23	285000	Na- (Mg)	/ Cl- (SO4)	SO4

Tabla 1 : Salinidades, tipos químicos y vías evolutivas de aguas del salar de Surire.
 CO_3 = vía carbonatada; SO_4 (D) = vía sulfatada directa (sin pasar por el yeso)
 SO_4 (A) = vía alcalina sulfatada; SO_4 (N) = vía neutra sulfatada.

La composición química de los aportes presenta una variabilidad sorprendente. Los diagramas circulares muestran aguas con los siguientes cationes y aniones dominantes: Na / Cl, Na / SO_4 , Ca / HCO_3 , Ca / SO_4 , Mg / HCO_3 . Además, la salinidad de los aportes es muy variable: desde 122 mg/l hasta 17 000 mg/l. En los diagramas triangulares aparecen tres familias de aguas. Un primer grupo tiene sus puntos representativos cerca de los vértices Na y Cl (SUR-2, 9, 10, 20). En el diagrama de cationes, se observa un grupo ubicado casi al centro del triángulo. Son aguas de tipo catiónico Na-Ca-Mg. Los puntos correspondientes en el triángulo de aniones se dividen en dos grupos: uno más cerca del vértice HCO_3 (SUR-1, 3, 4, 6) y el otro más cerca del vértice SO_4

(SUR-7, 11, 12, 18). El grupo cerca del vértice HCO_3 corresponde a aguas globalmente de tipo Na-Ca-Mg / HCO_3 , y el grupo cerca del vértice SO_4 representa aguas de composición global Na-Ca-Mg / SO_4 . Hay una transición continua entre estos dos tipos de aguas. Al contrario, se observa una clara discontinuidad entre estas aguas carbonatadas - sulfatadas y las cloruradas del grupo Na / Cl. Existe un cuarto tipo de aguas de aporte. Las aguas de las vertientes del noroeste de la cuenca (SUR-14 y 26) son del tipo promedio Na / Cl- HCO_3 - SO_4 . Incluyendo SUR-1, que se encuentra también al oeste de la cuenca, estas aguas son los aportes más diluidos del salar. Las demás aguas que no entran en esta clasificación son muy probablemente mezclas de aguas de diversos grupos. Las aguas del grupo Na / Cl tienen las salinidades más altas: desde 1,97 g/l hasta 17,7 g/l. Se encuentran en el sector este - sureste del salar. Tres de ellas son altamente termales, y una (SUR-10) no tiene ninguna influencia termal. Las aguas del tipo Na-Ca-Mg / HCO_3 provienen del sur y suroeste de la cuenca, y las del tipo Na-Ca-Mg / SO_4 drenan el norte de la cuenca. Las aguas medianamente termales no pertenecen a ningún grupo en particular.

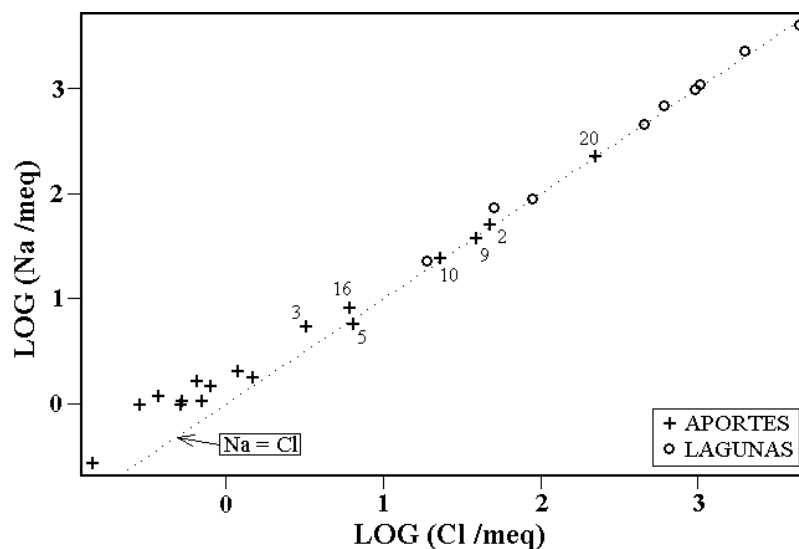


Fig. 2 : Relación entre Na y Cl en aguas y salmueras del salar de Surire.

La figura 2 presenta la relación entre Cl y Na de todas las aguas del salar: aportes y lagunas. Se observa que los puntos representativos de todas las lagunas y de los aportes más concentrados, de tipo Na-Cl, se distribuyen sobre la recta de equimolaridad $\text{Cl} = \text{Na}$. Las aguas de aporte más diluidas, de tipo Na-Ca-Mg / HCO_3 , Na-Ca-Mg / SO_4 y Na-Cl / HCO_3 - SO_4 , tienen sus puntos alejados de esta recta. Esta tendencia a igualarse las concentraciones de Cl y Na sugiere que la alta salinidad de los aportes de tipo Na / Cl se debe a una disolución de halita o cloruro de sodio (NaCl).

Datos isotópicos

En la figura 3 está representada la relación entre $\delta^{18}\text{O} \text{ ‰}$ y $\delta^2\text{H} \text{ ‰}$ de las aguas de aporte (falta SUR-26).

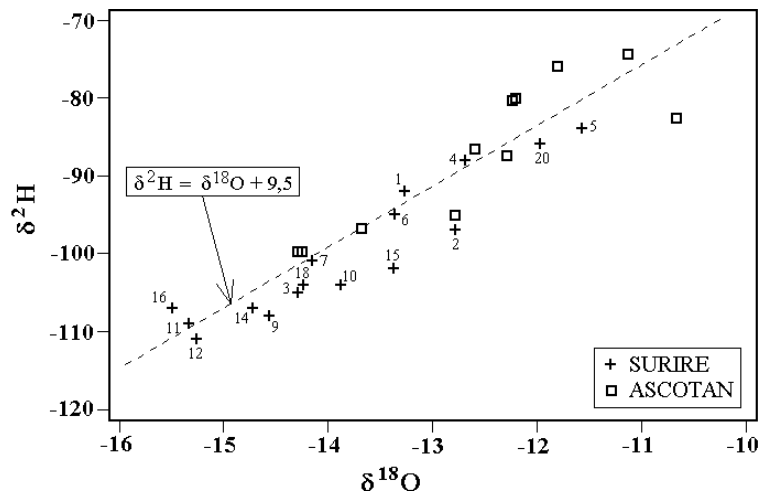


Fig. 3 : Relación entre $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ en aguas de aporte de los salares de Surire y Ascotan

La recta meteórica local utilizada es la de FRITZ et al. (1979):

$$\delta^2\text{H} = 7,8 \delta^{18}\text{O} + 9,5$$

Los cuadrillos representan composiciones de aguas de lluvia y nieves en la cuenca del salar de Ascotán, la zona más cercana donde hemos encontrado datos isotópicos sobre precipitaciones en la alta cordillera (Mardones, 1997). Eso nos permite observar la distribución de los puntos representativos de las precipitaciones en la cordillera. Se puede observar primero que las aguas de aporte se reparten muy cerca de la recta meteórica. No se alejan mucho más que las aguas de precipitaciones de Ascotán. Las tres aguas del norte de la cuenca (SUR-11, 12 y 16), que son del tipo Na-Ca-Mg / SO_4 , tienen casi la misma composición isotópica. Por otra parte, las aguas más saladas son las que más se alejan de la recta meteórica, con excepción del agua diluida SUR-15 (STD = 327 mg/l). Esas son las únicas relaciones que hemos notado en el diagrama. La clasificación química, la ubicación geográfica y la temperatura no se reflejan en la composición isotópica. Si asumimos que las aguas de aporte son simplemente aguas de precipitación que se han cargado de sales disueltas sin modificación notable de su composición isotópica, podemos determinar la temperatura de estas precipitaciones con la relación (Yurtsever, 1975):

$$\delta^{18}\text{O} = 0,521 \times T (\text{°C}) - 14,96$$

Las temperaturas se escalonarían entre -1°C y $6,5\text{°C}$ con un valor medio de $2,75\text{°C}$. Hay que comparar este valor con la temperatura promedio anual en el salar de Surire: $2,7\text{°C}$ (estación Chilcaya). El mismo proceso puede observarse con las precipitaciones en el salar de Ascotán, pero con temperaturas más elevadas (El salar de Ascotán se encuentra 500m más bajo que el salar de Surire). Se puede entonces suponer que las aguas de aporte son aguas de precipitaciones que han caído en varias épocas del año con diferentes temperaturas y que no han sufrido importantes alteraciones durante su trayecto subterráneo. Las aguas de aporte más saladas se alejan un poco más de la recta meteórica, lo que puede indicar una leve evaporación o, hipótesis más probable, que disolvieron inclusiones de salmueras junto con el cloruro de sodio.

Calidad de agua

La calidad de las aguas de aporte del salar de Surire refleja su tipo químico. Las aguas del oeste de la cuenca, de tipo Na-Cl / HCO₃-SO₄, presentan la mejor calidad tanto para el consumo humano como para el riego. Las aguas del este de la cuenca, de tipo Na / Cl, son de pésima calidad. Las aguas del sur (tipo Na-Ca-Mg / HCO₃) y del norte (tipo Na-Ca-Mg / SO₄) de la cuenca presentan una calidad regular. En general son aceptables para los componentes mayores, pero a menudo tienen un exceso de arsénico y boro.

Evolución de aguas por evaporación

Las vías evolutivas que siguen las aguas de aporte al evaporarse están presentadas junto al mapa geológico. La relación entre las vías evolutivas y los tipos de agua de aporte esta sintetizada en el siguiente cuadro :

<u>TIPO DE AGUA</u>	<u>SECTOR</u>	<u>SALINIDAD</u>	<u>VIA EVOLUTIVA</u>
Na-Cl-HCO ₃ / SO ₄	oeste	muy diluida	alcalina carbonatada
Na-Ca-Mg / HCO ₃	sur	medianamente salina	alcalina sulfatada
Na-Ca-Mg / SO ₄	norte	medianamente salina	neutra sulfatada
Na / Cl	este/sureste	muy salina	alcalina / neutra sulfatada

Estas relaciones no son perfectas, pero corresponden a las principales tendencias que se observan. Las aguas muy diluidas que siguen la vía evolutiva alcalina carbonatada (Na / CO₃-Cl) drenan las tobas ignimbríticas de la Formación Oxaya. Esto se observa también en las cuencas del lago Chungará y del río Lauca. Las aguas, más concentradas, que salen de las rocas volcánicas cuaternarias (traquitas y andesitas con presencia de azufre) siguen las vías sulfatadas. Se aprecia también una correlación entre el tipo de agua y la vía evolutiva en el norte y en el sur de la cuenca. Al contrario, en el sector oriental, las aguas salinas de tipo Na / Cl, evolucionan de diversas maneras. Se observa tres vías evolutivas para cuatro aguas: neutra sulfatada para SUR-2 y SUR-20, alcalina sulfatada para SUR-9 y alcalina sulfatada directa (sin pasar por la etapa del yeso) para SUR-10. Hemos visto que estas aguas salinas han disuelto cloruro de sodio. La adición de NaCl en una agua diluida no cambia su vía evolutiva, pues esta depende de las respectivas proporciones entre Ca, Mg, HCO₃ y SO₄, que no son modificadas por un aumento de Na y Cl. La vía evolutiva de estas aguas salinas es simplemente la vía evolutiva del agua diluida inicial que ha disuelto el NaCl. La variedad de vías evolutivas de las aguas de aporte salinas refleja trayectos hidrogeológicos más largos, más profundos y de más duración en distintas formaciones geológicas, como lo sugieren el alto grado termal y las elevadas salinidades de estas aguas.

Química de las lagunas

Existe una laguna principal de extensión muy variable con la época. Pertenecen a ella las muestras SUR-25, 19, 24 y probablemente SUR-21. A lo largo de la orilla del salar hay varias lagunitas de salinidad variable. Todas estas lagunas son del tipo Na-Cl / SO₄. La laguna central, en su sector más concentrado (SUR-24) está saturada en calcita, yeso, magnesita, silicatos-Mg,

sílice amorfa y mirabilita (sulfato de sodio hidratado). La napa subterránea (SUR-23) es saturada con respecto a los mismos minerales, excepto la mirabilita, y además con respecto a la ulexita. Hemos simulado la evaporación de los aportes hasta llegar a la salinidad de cada una de las lagunas.

<u>LAGUNAS</u>	<u>MAS PARECIDOS</u>	<===	<u>APORTES</u>	<u>EVAPORADOS</u>	===>	<u>MAS DIFERENTES</u>
SUR-24	20e 2e 9e 16e 10e 3e 5e 4e 11e 7e 15e 18e 6e 12e 1e 14e 26e					
SUR-23	20e 9e 2e 10e 16e 3e 5e 11e 4e 15e 7e 18e 6e 12e 14e 26e 1e					
SUR-25	2e 9e 16e 3e 5e 4e 10e 11e 6e 7e 1e 18e 15e 14e 12e 26e					
SUR-22	2e 16e 15e 18e 5e 3e 12e 11e 4e 7e 6e 10e 1e 9e 14e 26e					
SUR-21	2e 20e 16e 9e 5e 3e 4e 10e 11e 15e 7e 6e 18e 1e 12e 14e 26e					
SUR-19	20e 2e 9e 16e 10e 5e 3e 4e 11e 15e 7e 6e 18e 1e 12e 14e 26e					
SUR-17	2e 16e 20e 9e 5e 3e 4e 11e 15e 7e 10e 6e 18e 1e 12e 14e 26e					
SUR-13	2e 20e 16e 9e 5e 3e 4e 10e 11e 15e 7e 6e 18e 1e 12e 14e 26e					
SUR-8	16e 3e 5e 10e 4e 11e 6e 7e 18e 1e 14e 15e 12e 26e					

Tabla 2. En **negrita**: aguas de aporte salinas de tipo Na-Cl del este / sur-este de la cuenca. En *cursivas*: aguas de aporte muy diluidas de tipo Na-Cl-HCO₃-SO₄ del oeste de la cuenca.

La tabla 2 muestra la escala de similitud entre las composiciones químicas obtenidas simulando la evaporación de los aportes y las composiciones reales de las lagunas (prueba chi-cuadrado modificada). La tabla 3, en anexo, detalla la composición química de los cuatro aportes evaporados que más se asemejan a la composición de cada laguna. La columna "desviación" indica el grado de conformidad (chi-cuadrado) de la solución calculada con la solución real. Las alcalinidades relativamente elevadas de las salmueras naturales se deben a los boratos, y no a los carbonatos. Los modelos de simulación no toman en cuenta los boratos en soluciones neutras por falta de datos termodinámicos. SUR-24 es la laguna central del salar y SUR-23 la napa subterránea. Se observa que las aguas de aporte cuya evaporación produce las salmueras mas parecidas a las del salar son las de tipo Na-Cl y provienen del este / sureste de la cuenca (SUR-2, 20, 9, 10). Las aguas que provienen del sector occidental (SUR-14, 26) producen, si se evaporan solas, salmueras de carbonato de sodio de muy alta alcalinidad y de muy bajo contenido en Ca y Mg. Su influencia en las salmueras del salar parece despreciable. El único otro aporte que parece tener alguna influencia es SUR-16 al norte de la cuenca.

La predominancia de los aportes de tipo Na / Cl por el lado oriental de la cuenca se refiere a las sales que entran en el salar, no a las aguas. Son aportes mucho más salinos (varios g/l) que los que vienen del norte, sur y oeste del salar. Por ejemplo, si entrara el mismo caudal por el lado occidental (promedio STD ~ 120 mg/l) que por el lado oriental (promedio STD ~ 6 g/l), las cantidades de sales aportadas por las aguas diluidas occidentales representarían solamente el 2% del total. Es normal que las lagunas del salar tengan una composición química casi totalmente controlada por los aportes salinos Na / Cl del este - sureste de la cuenca. Sin embargo, son estas vertientes las que alimentan la laguna principal del salar. El gradiente de salinidad aumenta del este al oeste de la laguna. Esto indica que los aportes de agua por el lado occidental de la cuenca no son importantes, lo que es reforzado por la ausencia de lagunas superficiales en la orilla occidental del salar.

Disponemos de análisis de las salmueras de dos lagunas de la orilla norte del salar (SUR-13 y 17) así como de las vertientes fluyentes (SUR-12 y 16) que entran en estas lagunas. La salmuera SUR-13 no tiene ninguna relación con el agua de la vertiente SUR-12 que parece alimentarla (Tabla 1). Al contrario, esta salmuera presenta la mejor correlación (Tabla 2), con las aguas de aporte evaporadas SUR-2e y SUR-20e, del este - sureste de la cuenca. La salmuera SUR-17 tiene igualmente una buena correlación con SUR-2e y SUR-20e, pero también con SUR-16e que entra en la laguna. Por su parte, SUR-13 podría estar alimentada por surgencias de tipo SUR-20. La muestra SUR-22 presenta también un problema ya que no se trata de una laguna superficial, sino de un "ojo". Su salinidad muy baja para estar en pleno salar (11,9 g/l) sugiere una alimentación subterránea por aguas relativamente diluidas. Se puede notar en la tabla 2 que es la solución que presenta de lejos las correlaciones más discrepantes con las aguas de aporte evaporadas (desviación mínima de 0,722 comparada con las otras lagunas: de 0,031 a 0,204). El componente que más discrepa es el boro que puede provenir de la redisolución de capas profundas de boratos. Estas observaciones sugieren que una parte de la alimentación del salar se hace por surgencias de soluciones Na / Cl (del tipo SUR-2 y SUR-20) a dentro del mismo salar . Por otra parte, no se puede estimar el caudal de las vertientes mediante el balance hídrico de las lagunas donde desembocan, puesto que estas vertientes no constituyen el mayor aporte a estas lagunas.

La salmuera subterránea corresponde al agua de la laguna central concentrada dos veces. Se observa una importante reducción (de 14 g/l) del contenido en SO_4 en la napa. Ningún agua de aporte evaporada presenta tan bajas concentraciones en SO_4 . Ocurre en los sedimentos del salar un proceso no previsto por los modelos, siendo el más probable que se trate de la reducción masiva del sulfato en sulfuros o azufre por acción de bacterias.

Conclusiones

El salar de Surire recibe aguas de composición y salinidad muy variada. Se puede distinguir cuatro tipos de aguas de aporte. Las aguas de mejor calidad son del tipo Na / Cl- HCO_3 - SO_4 y drenan las tobas ignimbríticas de la formación Oxaya al oeste de la cuenca. Evolucionan por evaporación hacia salmueras alcalinas carbonatadas inexistentes en el salar. Los aportes de sales disueltas por estas aguas son despreciable para la composición química de las lagunas y de la napa subterránea del salar. La ausencia de lagunas permanentes al oeste del salar sugiere que su caudal entrante por este sector también es mínimo. Al sur y al norte del salar entran aguas de aporte de tipo Na-Ca-Mg / HCO_3 y Na-Ca-Mg / SO_4 respectivamente. Su importancia para los aportes salinos e hídricos tampoco parecen ser relevante. Lo principal para ambos tipos de aportes parece ser soluciones salinas y termales, de tipo Na / Cl, que entran en el salar por el sector este / sureste y también por surgencias a dentro del mismo salar. La alta salinidad de estos aportes se debe a la disolución de antiguas evaporitas en las formaciones geológicas. El salar de Surire proviene de la removilización de un antiguo salar. Los aportes de sales productos de la alteración de rocas de la cuenca de drenaje son mínimos.

Referencias y estudios anteriores

Fritz, P.; Silva, C.; Suzuki, O.; Salati, E. 1979. Isotope Hydrology in Northern Chile. Isotope Hydrology 1978, IAEA-SM-228/26, vol.II, 525-544.

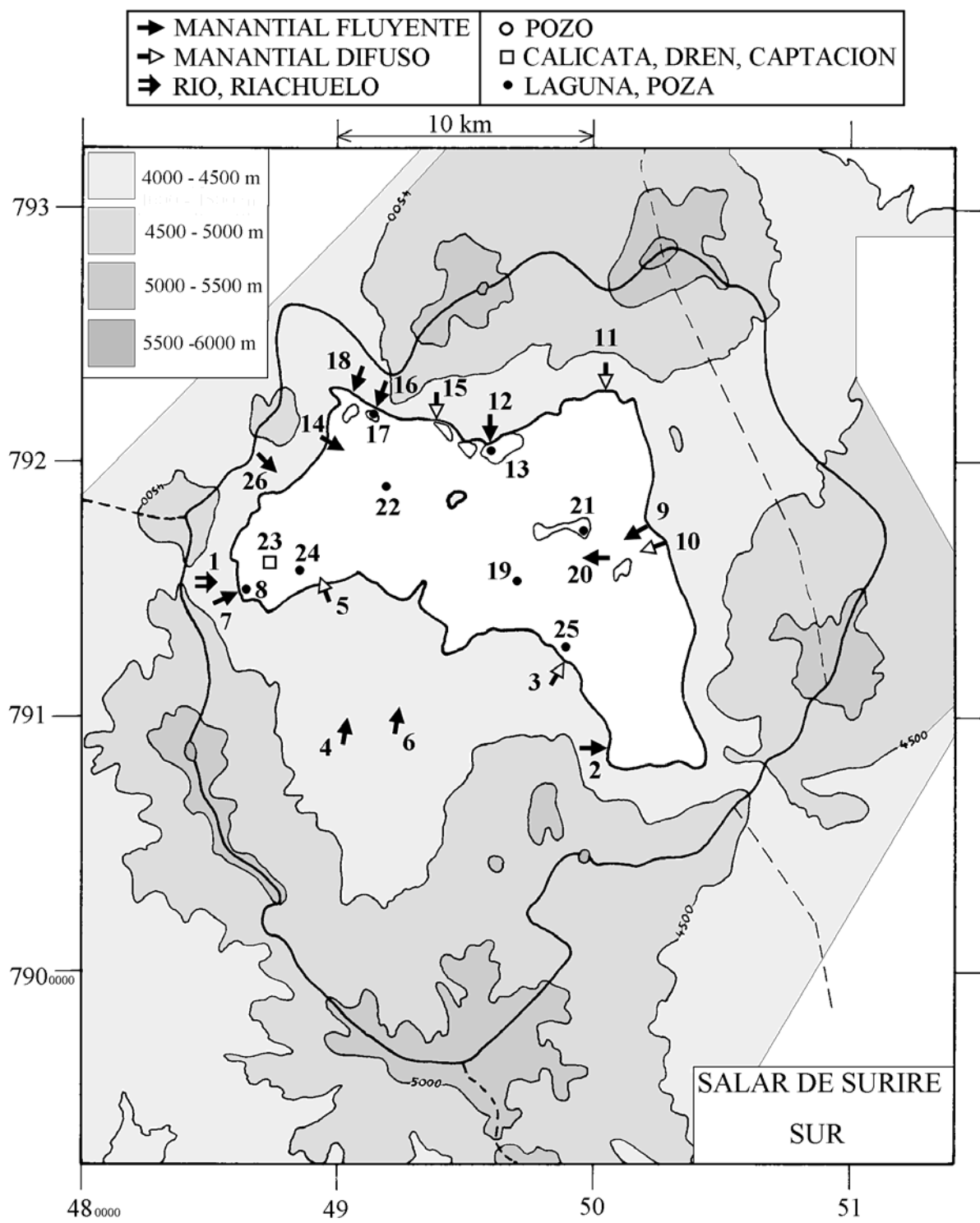
Salas, R. 1975. Estudio geológico del salar de Surire, Provincia de Arica, Chile. Instituto de Investigaciones Geológicas, Comisión Arica, Convenio IIG-JAA.

Vasquez, A. 1978. Calidad de agua, Primera Región. Laboratorio Hidrológico, Departamento Hidrología, Dirección General de Aguas, Informe inédito.

Yurtsever, Y. 1975. Worldwide survey of stable isotopes in precipitation. Rep. Sect. Isotope Hydrol., IAEA, 40p.

Tabla 3 : Comparación de las aguas de aporte evaporadas con las aguas del salar de Surire.
ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESVIO
SUR-24	7,84	21,1	69900	27600	623	44,0	51500	7040	264	786	1410	
SUR-20E	7,78	7,27	76100	21700	751	18,5	47900	7980	309	795	2800	0,124
SUR-2E	7,33	4,58	68700	27200	1240	18,0	46900	9230	275	719	1900	0,133
SUR-9E	7,86	6,84	83800	12700	654	16,5	52600	7200	269	313	1280	0,216
SUR-16E	7,81	8,88	65800	33800	793	17,9	42000	9900	333	641	4950	0,230
SUR-23	7,10	29,7	155000	11500	1300	30,8	93400	14100	530	850	2960	
SUR-20E	7,14	5,00	144000	27700	1240	10,7	84900	15100	584	649	5280	0,204
SUR-9E	7,20	4,09	148000	22500	983	8,53	92800	12700	476	551	2270	0,205
SUR-2E	6,47	3,11	139000	26500	2390	9,16	82100	18700	557	534	3850	0,254
SUR-10E	7,49	4,76	149000	21100	719	8,57	95600	13000	483	242	1010	0,418
SUR-25	8,82	5,07	3170	1030	61,6	27,6	2060	378	12,6	115	140	
SUR-2E	8,21	1,35	2630	1700	56,6	32,7	1870	353	10,5	261	72,8	0,137
SUR-9E	8,64	3,25	3610	548	44,7	33,1	2280	310	11,6	32,1	70,6	0,228
SUR-16E	8,21	1,13	2030	2540	27,6	32,8	1710	306	10,3	300	154	0,246
SUR-3E	8,48	2,34	1440	3190	39,3	33,2	1550	297	5,61	94,9	351	0,335
SUR-22	8,60	16,5	1800	4060	544	4,96	1710	310	7,98	1160	83,6	
SUR-2E	8,15	1,54	4310	2780	92,8	32,2	3060	579	17,2	415	119	0,722
SUR-16E	8,15	1,19	3330	4170	45,3	32,3	2810	502	16,9	479	252	0,805
SUR-15E	8,19	1,38	1650	6280	46,9	32,6	2160	360	6,76	461	628	0,838
SUR-18E	8,21	1,43	1160	6760	46,1	32,8	2290	374	5,25	439	524	0,866
SUR-21	8,69	12,7	34300	9550	386	31,4	22500	3500	139	790	899	
SUR-2E	8,06	7,15	29000	14000	622	26,0	20600	3900	116	785	803	0,050
SUR-20E	8,23	7,05	34000	9670	396	26,0	21400	3560	138	409	1250	0,055
SUR-16E	8,20	5,62	23100	22500	314	26,7	19400	3470	117	606	1750	0,141
SUR-9E	8,45	11,3	37000	5620	459	25,3	23400	3180	119	138	572	0,256
SUR-19	8,52	8,85	16300	3240	193	48,4	10400	1630	56,6	340	284	
SUR-20E	8,35	4,14	15600	4430	182	30,0	9830	1630	63,3	206	573	0,103
SUR-2E	8,10	3,21	12800	7120	275	29,9	9070	1720	51,1	736	354	0,159
SUR-9E	8,58	7,01	16900	2570	210	29,9	10700	1460	54,4	66,4	282	0,212
SUR-16E	8,19	2,55	10300	10700	140	30,3	8650	1550	51,9	577	776	0,285
SUR-17	8,60	10,6	21800	10600	259	23,3	15900	2670	84,0	714	532	
SUR-2E	8,09	5,30	21100	10700	455	27,9	15000	2840	84,5	769	585	0,036
SUR-16E	8,20	4,11	16900	16800	229	28,4	14200	2540	85,4	595	1280	0,106
SUR-20E	8,28	5,62	25100	7140	292	27,9	15800	2630	102	310	922	0,116
SUR-9E	8,51	9,24	27300	4140	338	27,4	17300	2350	87,7	103	432	0,321
SUR-13	8,25	12,4	36900	11900	443	28,3	25100	3870	135	846	982	
SUR-2E	7,98	6,79	32400	15500	673	25,2	23000	4350	130	783	897	0,031
SUR-20E	8,21	7,67	37800	10700	440	25,3	23800	3960	153	451	1390	0,053
SUR-16E	8,20	6,26	25700	24900	349	26,0	21600	3870	130	609	1940	0,125
SUR-9E	8,42	12,2	41100	6240	509	24,4	26000	3530	132	154	631	0,256
SUR-8	9,37	3,53	675	361	9,83	17,0	520	103	2,51	37,1	43,5	
SUR-16E	8,35	1,16	532	666	7,24	33,4	448	80,1	2,69	96,0	40,3	0,182
SUR-3E	8,63	2,34	367	811	9,99	33,8	394	75,6	1,43	27,9	108	0,267
SUR-5E	8,38	1,31	509	713	9,81	33,4	316	102	1,70	83,3	119	0,278
SUR-10E	8,62	2,29	918	130	14,2	33,4	598	79,9	2,96	22,0	15,7	0,280



**SALAR DE SURIRE
SUR**

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
SUR-1	10/08/95	16 ^H 40	485000	7915000	4350	Río refugio Conaf
SUR-2	11/08/95	09 ^H 25	500105	7909346	4262	Manantial termal corriente
SUR-3	11/08/95	10 ^H 20	498784	7912565	4260	Manantial difuso
SUR-4	11/08/95	11 ^H 00	490330	7909724	4350	Manantial corriente
SUR-5	11/08/95	12 ^H 00	489171	7915405	4260	Manantial difuso
SUR-6	11/08/95	16 ^H 50	492010	7910265	4390	Manantial corriente
SUR-7	11/08/95	18 ^H 15	486152	7914984	4262	Manantial corriente
SUR-8	11/08/95	18 ^H 40	486048	7915005	4260	Laguna
SUR-9	12/08/95	10 ^H 10	502041	7916971	4260	Manantial termal corriente
SUR-10	12/08/95	11 ^H 00	502523	7916544	4260	Manantial difuso
SUR-11	12/08/95	11 ^H 50	499930	7922859	4260	Manantial difuso
SUR-12	12/08/95	12 ^H 15	495783	7920871	4261	Manantial corriente
SUR-13	12/08/95	12 ^H 30	495783	7920850	4260	Laguna
SUR-14	12/08/95	14 ^H 30	489268	7920884	4260	Manantial corriente (Quiborax)
SUR-15	12/08/95	15 ^H 00	493692	7921907	4260	Manantial difuso
SUR-16	12/08/95	15 ^H 30	491459	7922105	4261	Manantial corriente
SUR-17	12/08/95	16 ^H 00	491459	7922090	4260	Laguna
SUR-18	12/08/95	16 ^H 30	490461	7922537	4261	Manantial corriente (Carabineros)
SUR-19	13/12/95	08 ^H 40	496907	7915132	4260	Laguna
SUR-20	13/12/95	09 ^H 15	500178	7916748	4260	Manantial termal centro salar
SUR-21	13/12/95	09 ^H 50	499702	7917391	4260	Laguna
SUR-22	13/12/95	10 ^H 15	491220	7918828	4260	Napa ("ojo" en el salar)
SUR-23	13/12/95	11 ^H 30	486848	7915992	4260	Napa (cateo)
SUR-24	13/12/95	12 ^H 00	487713	7915373	4260	Laguna
SUR-25	28/05/96	13 ^H 03	498973	7912998	4260	Poza de preconcentración
SUR-26	28/05/96	14 ^H 57	487100	7920037	4370	Manantial corriente

**SALAR DE SURIRE
SUR**

NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
SUR-1	111	5	7,0	1,000	8,20	0,695	5,01	0,015	0,0019	14,8	nd	0,216	17,2	0,0090	6,35	3,48	0,004	8,42	3,91
SUR-2	6850	49	1,3	1,004	6,09	2,61	1700	2,89	0,420	1080	0,025	35,9	60,5	0,749	1160	224	6,67	201	46,2
SUR-3	1370	3,8	5,4	1,000	6,95	8,42	116	0,232	0,0425	256	nd	3,16	38,6	0,145	125	23,9	0,451	119	55,6
SUR-4	648	6,9	7,5	1,000	7,74	3,36	52,9	0,093	0,0155	91,7	nd	1,21	40,3	0,122	41,4	12,9	0,146	44,9	28,2
SUR-5	1503	4,6	8,0	1,001	7,08	2,76	231	0,316	0,0255	311	nd	4,28	27,1	0,170	132	44,6	0,743	80,2	51,8
SUR-6	398	15,1	3,7	1,000	6,69	1,88	24,9	nd	0,0042	66,2	nd	0,605	36,7	0,0756	24,6	8,91	0,053	26,9	15,4
SUR-7	399	11,2	5,2	1,000	7,54	1,29	23,2	0,078	0,0114	93,1	nd	0,595	23,4	0,0082	37,7	6,76	0,083	17,1	13,8
SUR-8	3160	1,5	7,4	1,001	9,37	3,53	675	1,15	0,0817	361	nd	9,83	17,0	0,560	520	103	2,51	37,1	43,5
SUR-9	5080	31,2	1,7	1,002	6,06	3,17	1400	2,53	0,0505	209	nd	17,1	40,9	0,620	860	118	4,43	50,9	27,0
SUR-10	3280	3,9	2,6	1,002	7,00	3,69	824	1,49	0,0584	118	nd	13,0	31,1	1,06	552	72,7	2,70	52,1	14,3
SUR-11	417	5,3	3,7	1,000	6,82	1,52	28,2	0,063	0,0056	81,6	nd	0,659	30,5	0,0419	33,8	5,12	0,104	22,4	15,9
SUR-12	730	12,8	4,0	1,000	6,75	1,22	42,6	0,083	0,0034	252	nd	0,681	31,1	0,0449	47,2	7,04	0,146	54,1	29,9
SUR-13	91600	11,8	5,5	1,058	8,25	12,4	36900	54,4	0,365	11900	0,081	443	28,3	42,5	25100	3870	135	846	982
SUR-14	161	14,3	na	1,000	7,97	0,502	18,2	0,068	0,0096	17,4	nd	0,411	19,1	0,0060	22,5	3,01	0,014	5,01	1,31
SUR-15	426	12,8	3,9	1,000	6,84	0,659	18,7	0,046	0,0037	131	nd	0,530	25,8	0,0150	24,4	4,07	0,076	45,3	7,10
SUR-16	1320	6,4	3,8	1,001	6,95	0,585	217	0,37	0,0060	275	nd	2,98	24,6	0,210	186	33,0	1,11	41,7	16,6
SUR-17	60000	15,8	7,5	1,040	8,60	10,6	21800	30,0	0,250	10600	0,055	259	23,3	33,0	15900	2670	84,0	714	532
SUR-18	284,0	6,4	4,5	1,000	7,88	0,653	13,3	0,042	0,0127	76,3	nd	0,530	22,5	0,0157	27,1	4,30	0,060	18,0	6,03
SUR-19	48000	-1	4,7	1,024	8,52	8,85	16300	23,8	1,31	3240	0,045	193	48,4	16,0	10400	1630	56,6	340	284
SUR-20	24500	33,5	0,2	1,013	6,29	8,89	8020	13,3	0,180	2310	0,043	94,8	60,5	0,160	5200	852	33,0	242	299
SUR-21	85600	4	6,4	1,053	8,69	12,7	34300	54,4	0,901	9550	0,053	386	31,4	21,0	22500	3500	139	790	899
SUR-22	10900	3,8	6,5	1,010	8,60	16,5	1800	2,60	0,180	4060	nd	544	4,96	25,0	1710	310	7,98	1160	83,6
SUR-23	196000	5,5	na	1,200	7,10	29,7	155000	218	8,69	11500	0,59	1300	30,8	87,6	93400	14100	530	850	2960
SUR-24	144000	11,9	na	1,117	7,84	21,1	69900	101	1,80	27600	0,39	623	44,0	57,0	51500	7040	264	786	1410
SUR-25	14000	8,8	10,2	1,006	8,82	5,07	3170	5,29	0,340	1030	0,49	61,6	27,6	4,30	2060	378	12,6	115	140
SUR-26	135	8,8	4,4	1,000	8,18	0,402	10,2	0,047	0,0048	24,0	nd	0,412	21,6	0,0043	22,6	2,78	0,006	1,88	0,231

T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l.

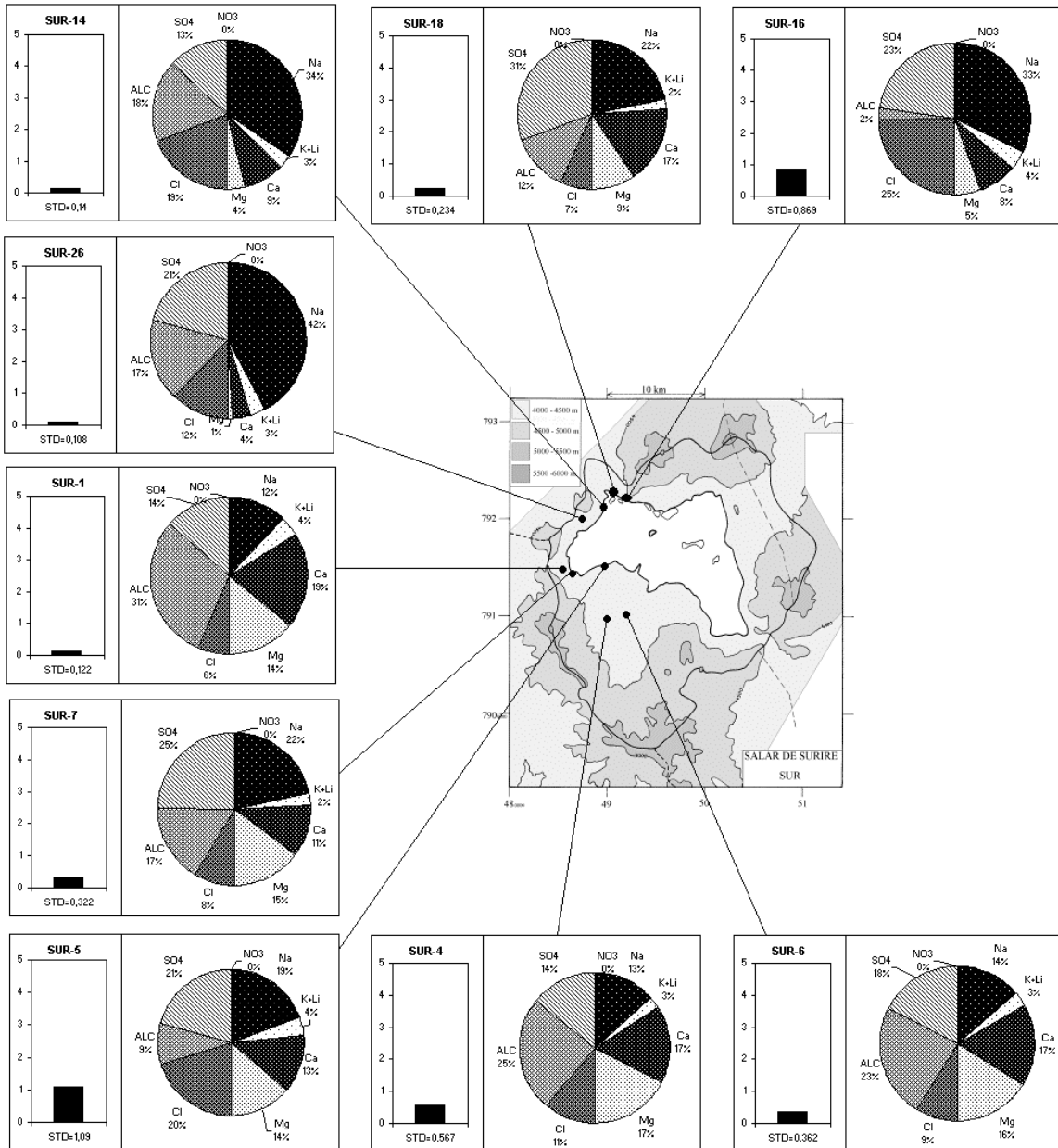
CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

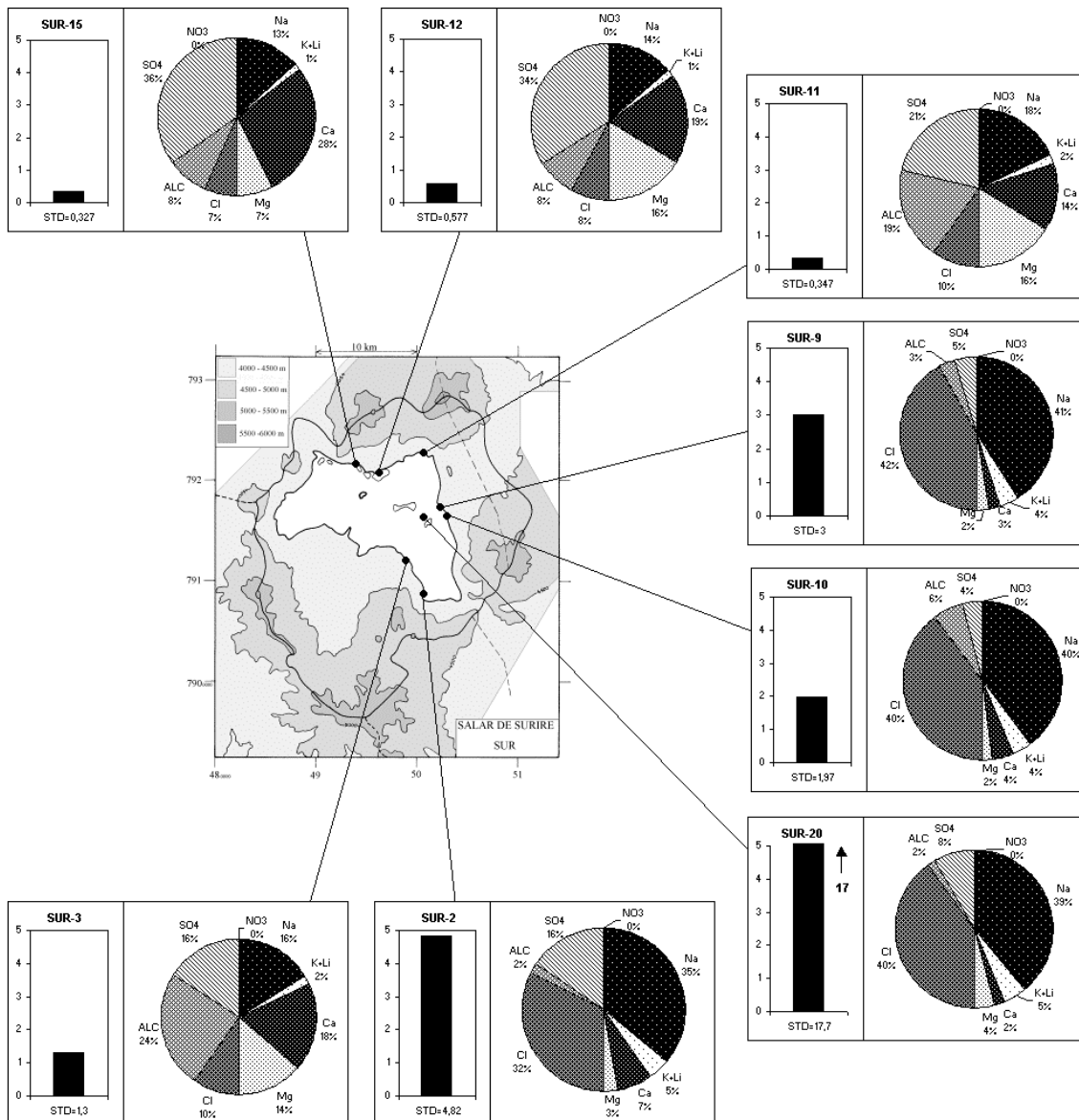
**SALAR DE SURIRE
SUR**

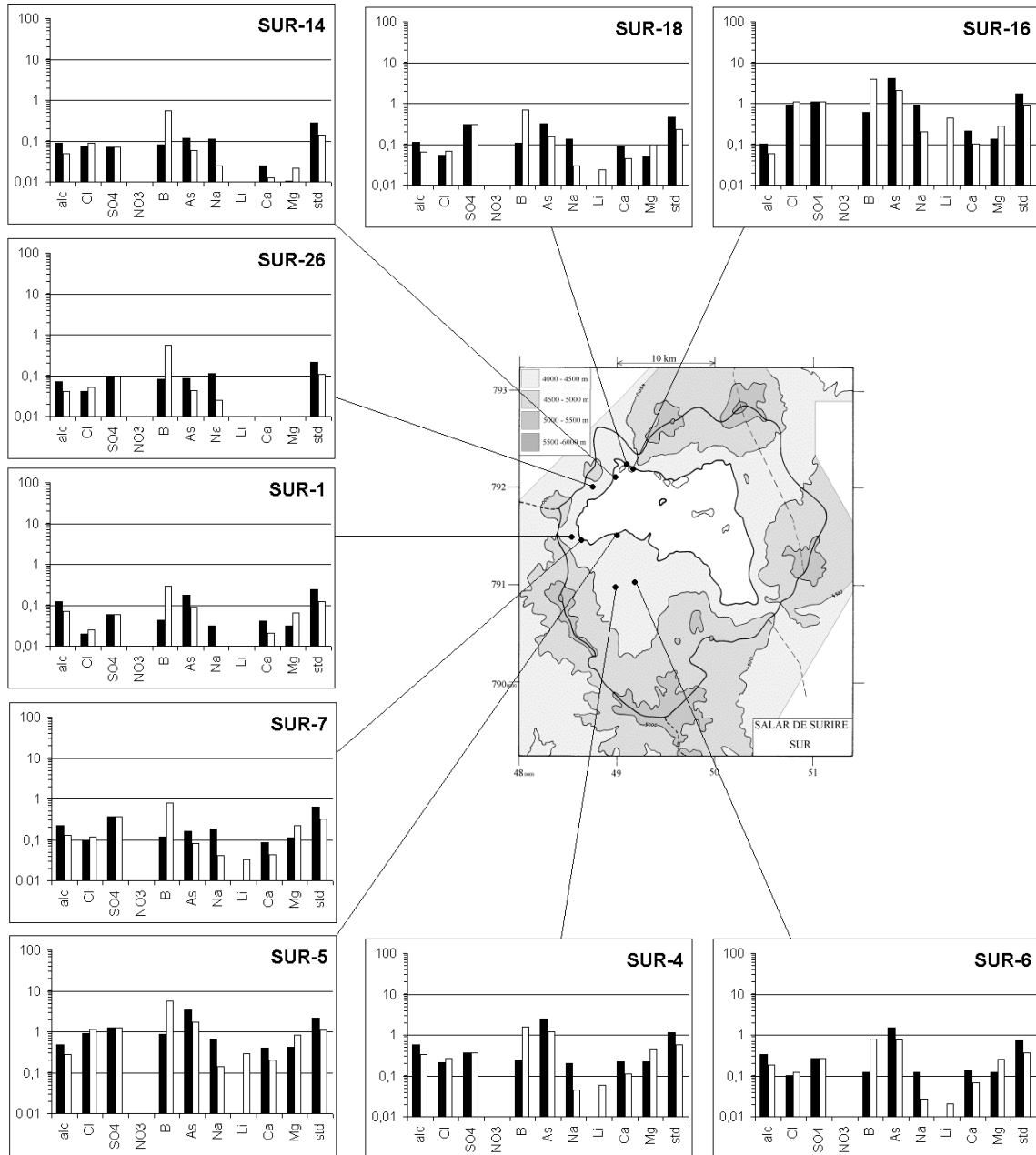
NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF. %	NUMERO	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
SUR-1	121,6	41,5	0,24	0,57	1,108	1,144	3,2	SUR-1	-13,26	-92
SUR-2	4821	159	0,06	140	71,01	72,91	2,6	SUR-2	-12,78	-97
SUR-3	1302	512	0,48	120	16,60	17,03	2,6	SUR-3	-14,29	-105
SUR-4	566,9	203	0,84	7,0	6,710	6,760	0,7	SUR-4	-12,68	-88
SUR-5	1092	168	0,18	28	15,23	15,76	3,4	SUR-5	-11,57	-84
SUR-6	362,3	115	0,06	40	3,916	3,961	1,2	SUR-6	-13,36	-95
SUR-7	322,4	78,1	0,18	4,1	3,813	3,883	1,8	SUR-7	-14,15	-101
SUR-8	2006	141	21,1	0,13	31,03	30,05	3,2	SUR-8	na	na
SUR-9	3002	193	0,06	200	45,83	46,83	2,2	SUR-9	-14,56	-108
SUR-10	1970	224	0,12	44	30,03	29,35	2,3	SUR-10	-13,88	-104
SUR-11	347,4	92,7	0,06	30	4,042	4,013	0,7	SUR-11	-15,33	-109
SUR-12	576,7	74,4	0,06	22	7,411	7,680	3,6	SUR-12	-15,26	-111
SUR-13	80994	215	17,6	1,3	1331	1300	2,4	SUR-13	na	na
SUR-14	140,2	29,9	0,12	0,57	1,416	1,378	2,7	SUR-14	-14,72	-107
SUR-15	327,3	40,1	0	10	4,019	3,905	2,9	SUR-15	-13,37	-102
SUR-16	868,7	35,6	0	7,9	12,55	12,43	1,0	SUR-16	-15,49	-107
SUR-17	53850	125	17,8	0,32	852,8	844,6	1,0	SUR-17	na	na
SUR-18	233,7	39,2	0,12	1,1	2,691	2,618	2,7	SUR-18	-14,23	-104
SUR-19	33527	309	16,0	1,6	542,3	535,5	1,3	SUR-19	na	na
SUR-20	17728	540	0,36	270	289,2	283,1	2,1	SUR-20	-11,97	-86
SUR-21	72925	10,2	1,68	0,03	1202	1179	1,9	SUR-21	na	na
SUR-22	11906	297	26,2	1,3	148,3	151,7	2,3	SUR-22	na	na
SUR-23	285000	-	-	-	4784	4650	2,8	SUR-23	na	na
SUR-24	162044	-	-	-	2613	2567	1,8	SUR-24	na	na
SUR-25	7306	175	15,1	0,41	118,2	115,8	2,1	SUR-25	na	na
SUR-26	108,1	23,6	0,12	0,31	1,169	1,188	1,6	SUR-26	na	na

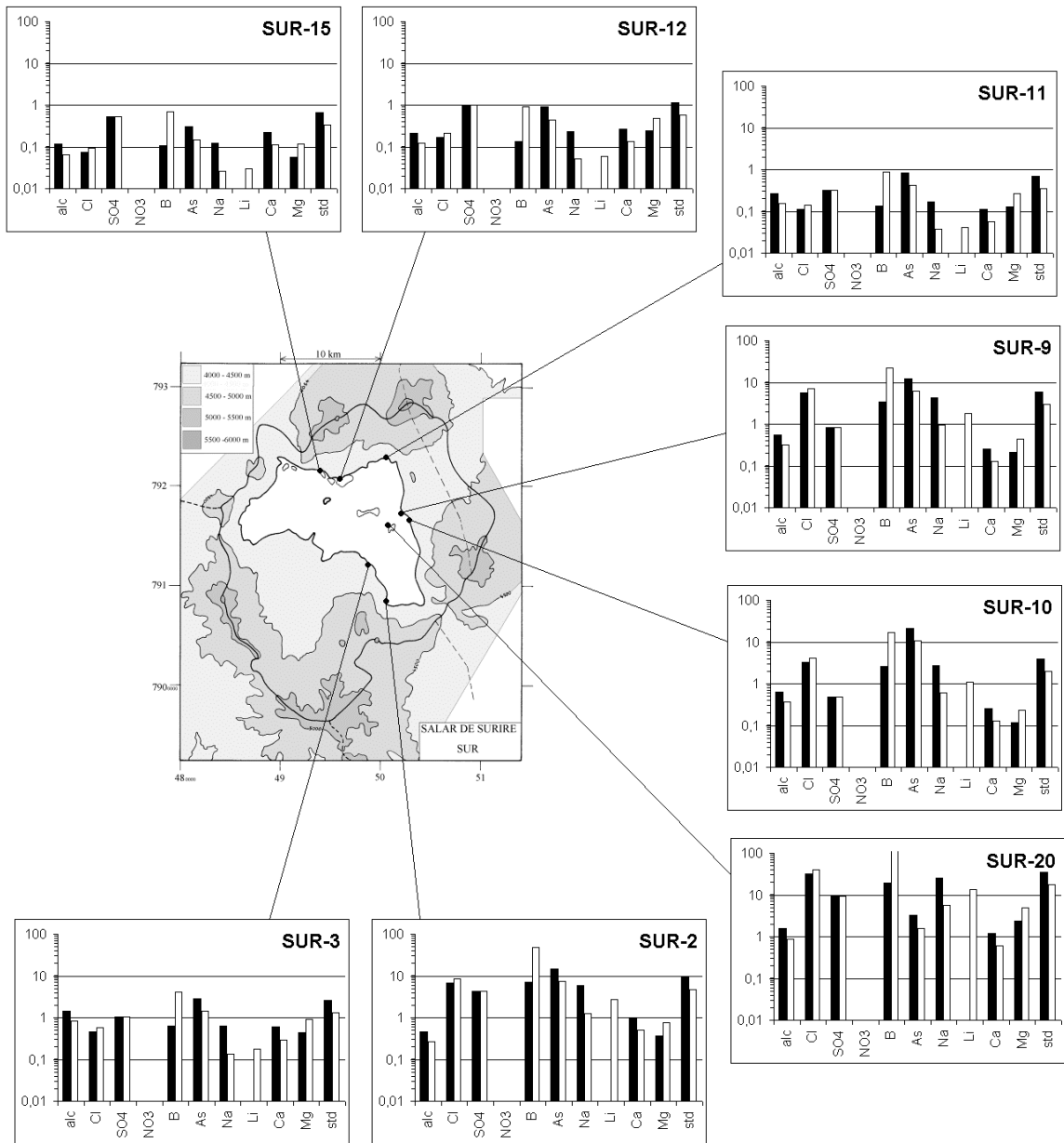
Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.
 S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l)
 DIF.% = diferencia en %

Análisis de oxígeno-18
 y deuterio









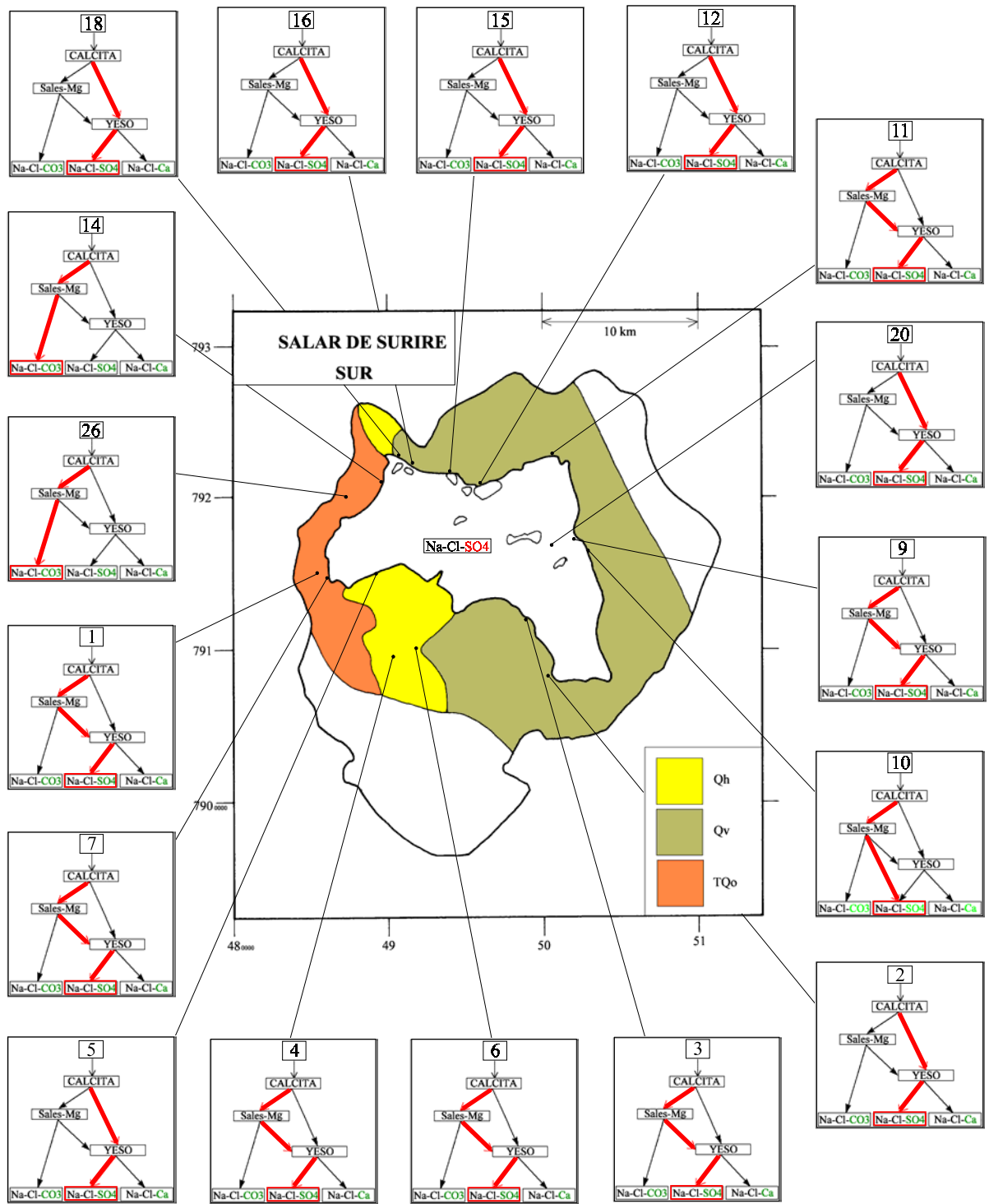
MAPA GEOLOGICO Y VIAS EVOLUTIVAS

SUR

Qh : *Cuaternario*. Fm. Huaylas. Conglomerados, areniscas, lutitas y tobas ignimbríticas.

Qv : *Cuaternario*. Rocas volcánicas, lavas y piroclastos traquiandesíticos. Incluye azufreras.

TQo : *Plioceno - Pleistoceno*. Formación Oxaya. Tobas ignimbríticas y sedimentos clásticos continentales.
También dolomitas y diatomitas.



SALAR DE PINTADOS

Introducción

La cuenca del salar de Pintados, en la Primera Región, es la más extensa que hemos estudiado después de la cuenca del salar de Atacama. Corresponde a una gran parte de la pampa del Tamarugal en el Valle Central, la que geológicamente corresponde a una cuenca tectónica rellena por materiales de erosión, limitada al este por la Cordillera de los Andes y al oeste por la Cordillera de la Costa. La quebrada de Soga parece marcar el límite norte de la cuenca. Al sur, no se distingue ningún límite claro. El salar de Bellavista no es más que la prolongación del salar de Pintados al sur. También hemos incorporado la sub-cuenca del salar de Sur Viejo en el estudio, puesto que los débiles relieves que la separan del salar de Pintados no parecen tener influencia sobre las napas profundas del sector. Finalmente hemos fijado de manera arbitraria el límite de la zona estudiada entre el salar de Sur Viejo y el salar de Llamara. En realidad es probable que la cuenca de Pintados no sea cerrada ya que conecta con Llamara que vierte sus salmueras en el río Loa principalmente a través de la quebrada Amarga. La planicie de la pampa del Tamarugal tiende a disminuir suavemente de norte a sur, aunque a la altura de Negreiros aparece un alto topográfico. La superficie freática se corresponde a la superficie topográfica. Las curvas de nivel freático cortan perpendicularmente los cauces de las quebradas anteriores indicando un efecto de recarga (Castillo, 1960 y 1966). Las variaciones climáticas desde la alta Cordillera hasta el Valle Central son drásticas. Sus principales características morfométricas y climatológicas son:

- altura: 980 m (salar) hasta 5500 m (Cordillera)
- superficie de la cuenca: 17 150 km²
- superficie del salar: 51 km²
- precipitaciones: 0,8 mm/año (pampa) hasta 150 mm/año (Cordillera)
- evaporación potencial: 2000 mm/año (pampa) - 1300 mm/año (Cordillera)
- temperatura media: 18,5°C (pampa) - 5°C (Cordillera)

El salar de Pintados es un salar fósil. Difiere notablemente de todos los demás salares estudiados. Las costras de sales superficiales (halita y yeso) parecen desconectadas de las napas profundas. Las salmueras más concentradas no se encuentran exactamente por debajo de las costras salinas, sino quedan restringidas al sur-oeste de la cuenca. En el Valle Central fueron explotados numerosos yacimientos salinos por nitratos y también yodo, los que en menor cantidad lo siguen hasta el presente.

Varios estudios hidrológicos fueron realizados en esta cuenca (Castillo, 1960 y 1966; IRH, 1983; Suzuki y Aravena, 1984; Fritz et al., 1979; Grilli et al., 1989; JICA, 1995). Hacia el este de la pampa del Tamarugal, se presentan varias quebradas labradas en el plano inclinado que desde la Cordillera de los Andes cae hacia esta pampa. La DGA proporciona para las pequeñas cuencas de estas quebradas, la escorrentía siguiente: Aroma (250 l/s), Tarapacá (390 l/s), Quipisca (110 l/s), Juan de Morales (100 l/s) y Chacarilla (130 l/s). Sin embargo, el enfoque hidrogeoquímico no ha sido muy desarrollado hasta hoy. En este estudio nos limitaremos a la gequímica de aguas sin pretender hacer una síntesis de todos los trabajos anteriores. Hay que recalcar que la cuenca de

Pintados es la más compleja y difícil de todas las que hemos estudiado. Primero su extensión es tal que la geología es muy variada. Los puntos de muestreo, en esta región muy árida, son escasos y se encuentran en su gran mayoría en zonas agrícolas o mineras. En el Valle Central los pozos son los únicos puntos de muestreo. Sin embargo, los pozos cementados o entubados con hierro contaminan la napa cuando no están en producción. Por otra parte, los agricultores usan desde hace muchos años grandes cantidades de abonos químicos, que también pueden contaminar la napa (acidificación, nitratos). Para dar una idea de la complejidad de los problemas geoquímicos que se presentan en esta cuenca, basta recordar que el origen de los nitratos y del yodo queda desconocido a pesar de numerosos estudios realizados desde hace más de un siglo.

Aportes de agua y aguas diluidas

Topamos con una primera dificultad: debemos considerar las aguas ligeramente salobres (1-3 g/l STD) de napas del Valle Central como aguas de aporte? Es obvio, en vista de la extrema aridez de esta zona, que estas aguas derivan (o han derivado) de aguas de la Cordillera. No son estrictamente aguas iniciales. Las napas salobres del Valle Central corresponden de cierto modo a las pozas de preconcentración de los salares con lagunas superficiales. Sin embargo, debido a su salinidad relativamente baja (están al límite de potabilidad), resulta más simple para las discusiones considerarlas también como aguas de aporte y juntarlas con las aguas de vertientes y ríos de la Cordillera.

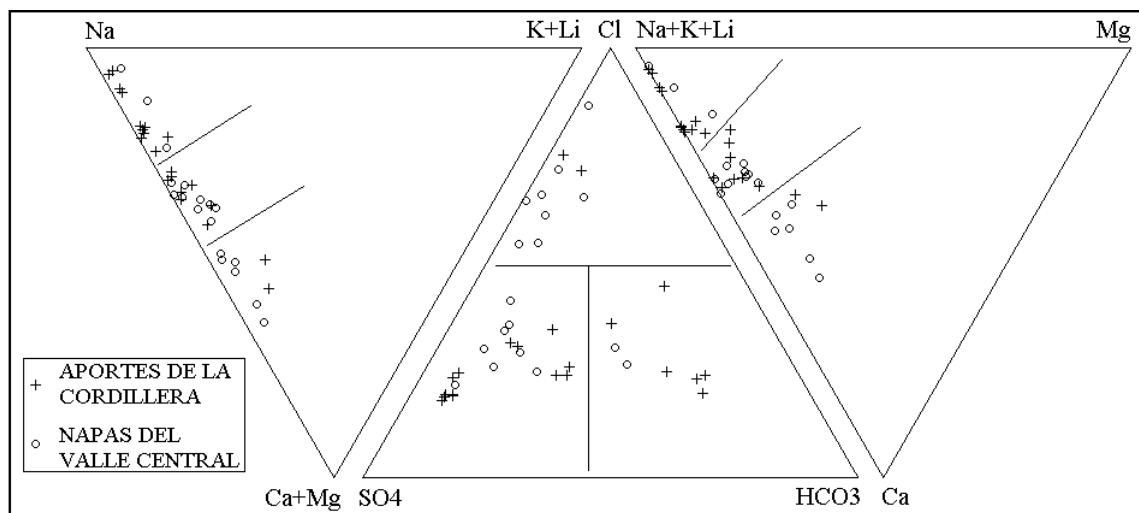


Fig. 1. Aguas de aporte al salar de Pintados en diagramas triangulares (meq/l).

La composición química de los aportes está representada en diagramas triangulares (Fig. 1). A primera vista la repartición de los puntos parece confusa. Sin embargo, se puede observar algunas tendencias. En el triángulo de aniones, las aguas de vertientes y ríos de la Cordillera (cruces) se reparten, con dos excepciones (9 y 30) en un huso paralelo al borde $SO_4 - HCO_3$. Estas aguas varían de un polo carbonatado hacia un polo sulfatado y su variación en Cl es limitada. Las aguas de napa del Valle Central (círculos) se disponen con dos excepciones (1 y 13) a lo largo de un huso paralelo al borde Cl - SO_4 . Estas soluciones van desde un polo clorurado hacia un polo sulfatado, con variación limitada de su contenido en HCO_3 . Se puede entonces distinguir tres tipos de aguas en el triángulo de aniones:

- aguas cloruradas (Cl)
- aguas sulfatadas (SO₄)
- aguas (bi)carbonatadas (HCO₃)

En los triangulos de cationes, las aguas de ríos y vertientes de la Cordillera tienen tendencia a ser más ricas en alcalinos (Na, K) con dos excepciones notables (Quebrada Soga: 38 y 39), mientras que las aguas de napas del Valle Central tienden a tener más alcalino-terreos (Ca, Mg) con tres excepciones (1,16 y 42). Podemos repartir las aguas de aporte en tres grupos catiónicos:

- un grupo donde domina Na
- un grupo donde todavía domina Na, pero con más Ca y Mg
- un grupo con predominancia de Ca+Mg

La combinación de los tres grupos aniónicos con los tres grupos catiónicos define 9 tipos de agua de aporte presentados en la figura 2. Cada grupo está identificado con una letra. La salinidad promedio de cada grupo aumenta regularmente desde el grupo I (Ca-Mg / HCO₃) hasta los grupos clorurados A (Na / Cl) y B (Na-Ca-Mg / Cl).

	Na	Na-Ca-Mg	Ca - Mg
Cl	30 A [1858 mg/l] 16 - 42	9 B [2634 mg/l] ⑪ - 26 27 - 28 - 29	C [825 mg/l] 6
SO ₄	④ - ⑱ - 19 - ⑳ ㉑ - ㉓ - ㉔ - ㉕ D [659 mg/l]	14 - ㉒ - 24 34 - 37 E [1063 mg/l] 3 - 5 - 15	F [1499 mg/l] 2 - 17 - 25 35 - 40
HCO ₃	8 - 10 G [609 mg/l] 1	⑫ - 31 H [321 mg/l] ⑬	⑳ - ㉙ I [212 mg/l]

Fig. 2. Clasificación de las aguas de aporte al salar de Pintados. Los números en posición superior corresponden a aguas de ríos y vertientes de la Cordillera de los Andes. Los números más gruesos en posición inferior indican aguas de napa del Valle Central. Los círculos representan aguas termales. Los cuadrados indican aguas de vía evolutiva. carbonatada. Las salinidades corresponden a promedios.

Se observa que las aguas termales pertenecen en su gran mayoría a los grupos D, G, H, I (11 y 22 siendo excepciones). También, anticipando el estudio de las vías evolutivas, notamos que las aguas perteneciente a la vía evolutiva carbonatada pertenecen exclusivamente a los mismos

grupos D, G, H, I. La distribución geográfica de los varios tipos de agua esta representada en la figura 3.

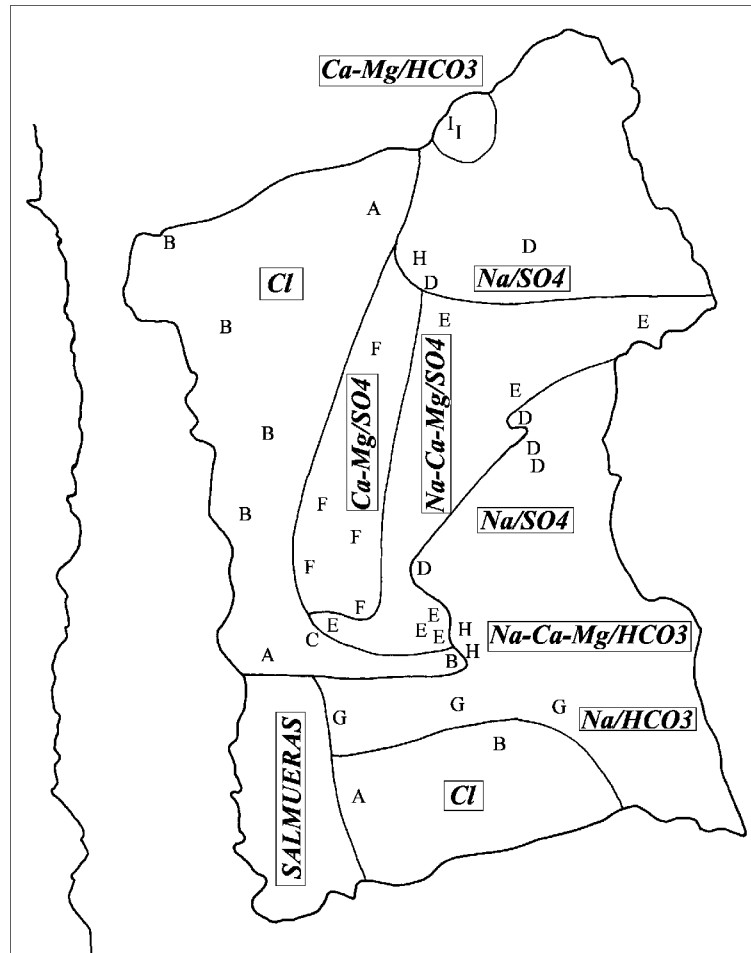


Fig.3 : Distribución geográfica de los varios tipos de agua en el salar de Pintados. La letras corresponden a los tipos químicos definidos en la figura 2.

No se observa correlación clara con las sub-cuencas de la Cordillera. Se nota una cierta zonación de los tipos de agua desde la Cordillera hasta el Valle Central: D - E - F - B. Los grupos A, B, C, F corresponden predominantemente a napas del Valle Central, mientras que los grupos E, D, G, H, I son principalmente aguas de la Cordillera. Se puede así definir dos mega-grupos:

- un mega-grupo I con aguas de tipo:
 - + Na / Cl (A)
 - + Na-Ca-Mg / Cl (B)
 - + Ca-Mg / Cl (C)
 - + Ca-Mg / SO₄ (F)
- un mega-grupo II con aguas de tipo:
 - + Na-Ca-Mg / SO₄ (E)
 - + Na / SO₄ (D)
 - + Na / HCO₃ (G)

+ Na-Ca-Mg / HCO₃ (H)

+ Ca-Mg / HCO₃ (I)

Se aprecia que las aguas G y E del mega-grupo II forman cuñas de aguas más diluidas en el Valle Central. Las aguas E (Na-Ca-Mg / SO₄) son las más salinas del mega-grupo II y muestran características transicionales entre los dos mega-grupos. La ubicación de las aguas E en la Cordillera corresponde aproximadamente a la sub-cuenca de la quebrada de Tarapacá.

Relaciones Na / Cl y Ca / SO₄

Se observa en la figura 4 que las aguas cloruradas se distribuyen cerca de la recta de equimolaridad Na = Cl de la misma manera que las salmueras del salar. Las aguas de aporte más diluidas, sulfatadas (D, E, F) y carbonatadas (G, H, I) se alejan de esta recta. Las aguas cloruradas A, B, C parecen haber redissuelto cloruro de sodio (halita), probablemente a partir de sedimentos salinos superficiales en el Valle Central (por ejemplo: 26, 27, 28) o por lixiviación de formaciones sedimentarias en la Cordillera (9, 30). Hay que notar que las aguas están agrupadas de acuerdo a su tipo químico.

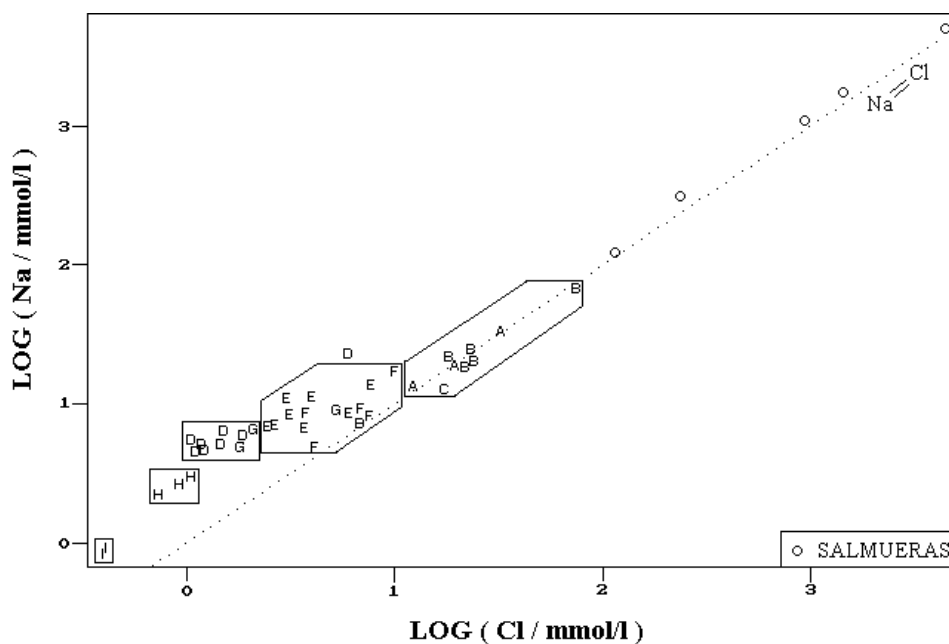


Fig. 4. Relación Na versus Cl en las aguas y salmueras de Pintados.

La figura 5 presenta la relación Ca versus SO₄. Aquí también las aguas se agrupan según su tipo químico. Las aguas cloruradas A, B, C se distribuyen cerca de la recta de equimolaridad Ca = SO₄, lo que sugiere una contribución de Ca y SO₄ por redissolución del yeso, mineral abundante en el Valle Central. Las salmueras se alejan notablemente de esta recta debido a la saturación en yeso (ejemplo de distribución en forma de T). Todas las salmueras, menos una, se concentran en SO₄ y se empobrecen en Ca (tipo Na / Cl-SO₄). Solamente PIN-7 es de tipo cálcico (Na-Ca / Cl). Sin embargo, esta salmuera proviene de un pozo piezométrico estancado de concreto, lo que puede ocasionar alguna contaminación.

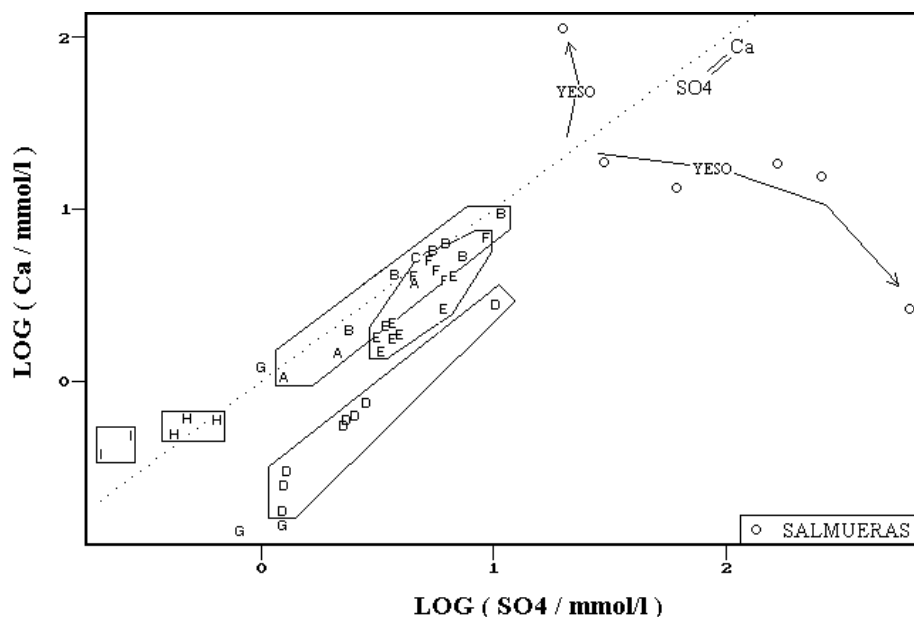


Fig. 5 . Relación Ca versus SO_4 en las aguas y salmueras de Pintados.

Comportamiento del magnesio y del sodio. Relación con las aguas de la cuenca del Huasco.

El magnesio presenta un comportamiento interesante (Fig. 6). Su concentración en las aguas de aporte es muy variable. Las aguas de tipo D, G, H tienen concentraciones porcentuales muy bajas en magnesio: 0,02% Mg en promedio con una mínima de 0,004% (PIN-21).

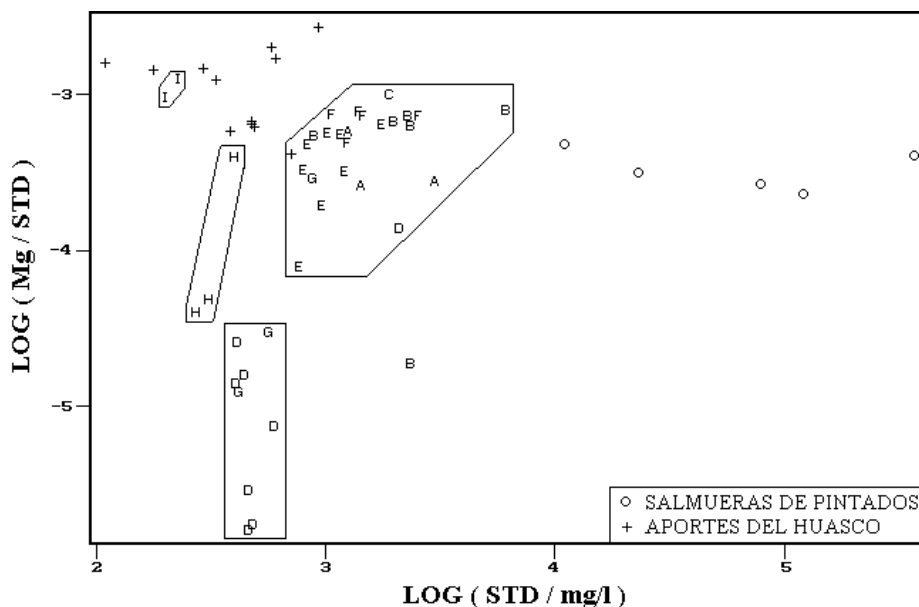


Fig.6 Concentraciones de Mg relativas a la salinidad total.

Estas aguas de aporte son dentro de las menos concentradas en Mg en todo el norte chileno. Al contrario, las aguas cloruradas A, B, C y las sulfatadas E y F tienen un contenido netamente más elevado en Mg: 1,5% en promedio o sea 75 veces más que las aguas D, G, H. Las salmueras tienen un porcentaje de Mg similar a las aguas de aporte cloruradas A, B, C y sulfatadas E y F. Se

puede notar que las aguas muy pobres en Mg son casi todas termales, con la excepción de las aguas de Soga que son termales y tienen el contenido relativo en Mg más elevado en toda la cuenca de Pintados. Se puede observar en la figura 3 que las aguas D, G y H ocupan el lado de la Cordillera colindante con la cuenca del salar del Huasco.

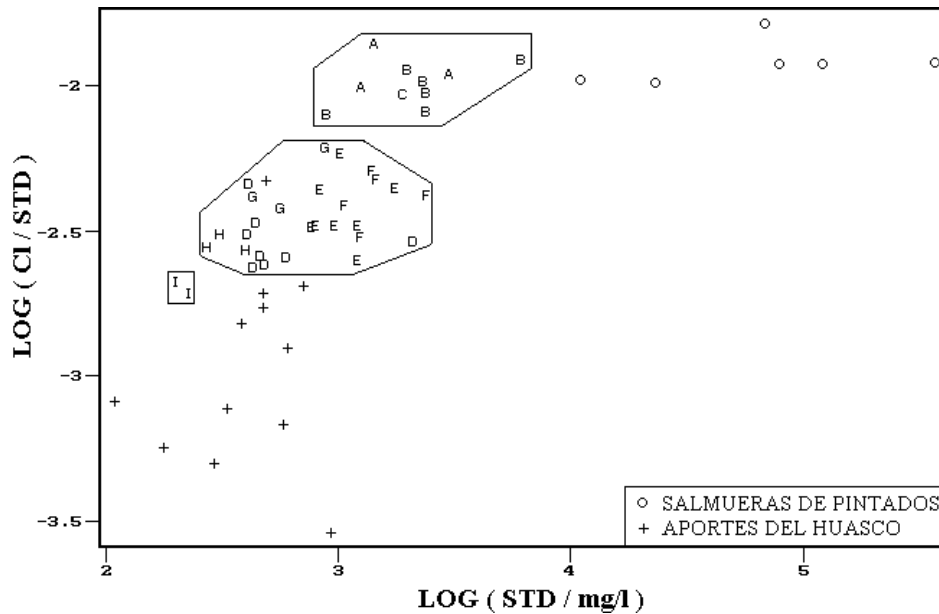


Fig.7 Concentraciones de Cl relativas a la salinidad total.

Hemos representado en la figura 6 los puntos representativos de las aguas de aporte de este salar. Su contenido en Mg es muy elevado, sin ninguna relación con las aguas de aporte de la cuenca de Pintados. En promedio, las aguas diluidas de la cuenca del Huasco contienen 100 veces más Mg que las aguas de la Cordillera andina vecina de Pintados. Una diferencia tan elevada es difícilmente compatible con una infiltración importante de aguas de la cuenca del Huasco hacia Pintados. Es más probable que esta diferencia refleja una diferencia en la litología de las dos cuencas. El sodio, el cloruro (Fig.7), el potasio y, en menor grado, el calcio y el yodo muestran también una diferencia notable entre las aguas colindantes del Huasco y de Pintados.

Calidad de aguas

De todas las aguas de aporte extraídas en Pintados, solamente 10 cumplen estrictamente con la norma chilena de potabilidad (12, 13, 20, 21, 23, 31, 32, 33, 38, 39) y pertenecen todas al mega-grupo de aguas diluidas (D, G, H, I). Otras 10 deben ser consideradas impropias para el consumo humano (4, 6, 9, 11, 26, 27, 28, 30, 34, 35) y con excepción de PIN-4, son todas del mega-grupo salino (A, B, C, E, F). Las demás aguas, a pesar de no cumplir con la norma de potabilidad, podrían ser aprovechadas (y casi todas lo son efectivamente) para usos domésticos. Se puede distinguir dos tendencias en el desmejoramiento de calidad; por una parte, alta salinidad, generalmente debida a un exceso en Na y SO_4 ; y por otra parte, arsénico elevado. No hay una estricta correlación entre los dos tipos de contaminación. El agua de uso doméstico del pueblo de Tarapacá (35) tiene una salinidad cinco veces superior a la máxima recomendada, pero su

contenido en arsénico es bajo. El agua de la colonia agrícola Pintados (1) tiene una salinidad aceptable, pero 8 veces más arsénico que el máximo permisible para potabilidad.

Vías evolutivas

Al evaporarse, las aguas de aporte de la cuenca de Pintados siguen dos grandes vías evolutivas. Las aguas bicarbonatadas G, H, I que drenan las rocas volcánicas de la Cordillera pertenecen todas a la vía carbonatada. Las aguas de aporte sulfatadas y cloruradas siguen en su gran mayoría la vía neutra sulfatada (3 excepciones: 18, 19 y 32, del tipo D, Na / SO₄, que siguen la vía carbonatada). Una sola agua (24) sigue la vía alcalina sulfatada, lo que es bastante extraño puesto que esta vía es intermedia entre la vía carbonatada y la vía neutra sulfatada. Las salmueras del Valle Central (salvo una) son del tipo Na / Cl-SO₄ y corresponden a las vías sulfatadas.

De manera sorprendente, en vista de la complejidad de la cuenca, aparece una buena relación entre los rasgos mayores de la geología de la Cordillera andina, la composición de las aguas de aporte y las vías evolutivas. Se puede a grandes rasgos distinguir cuatro zonas geológicas mayores.

- al nor-este de la Cordillera predominan las rocas volcánicas del Plioceno - Pleistoceno (TQ1 y TQ2, ignimbritas, dacitas, tobas). Las aguas asociadas a estas formaciones son del megagrupo II, (aguas diluidas de los tipos D, H, I) con predominancia de la vía evolutiva carbonatada, en buen acuerdo con la litología. Se observa al oeste de estas formaciones, y al extremo norte de la cuenca, afloramientos sedimentarios del Cretácico (KT), Jurásico (Jdm) y Silúrico - Ordovícico (SO). El agua del río Aroma (PIN-30) que drena estas formaciones es salobre (3 g/l), de tipo A (Na - Cl) y de vía evolutiva neutra sulfatada, en buen acuerdo con la geología.

- en el centro-norte de la Cordillera se nota un sector de forma circular con una mezcla compleja de rocas volcánicas y sedimentarias (Cretácico KT y Ki2 y, sobre todo, Jurásico Jdm). A estas rocas están asociadas aguas de tipo E, dentro de las más saladas que se originan en la Cordillera, y de vía evolutiva neutra sulfatada, lo que refleja el contexto sedimentario de la litología.

- en el centro-sur de la Cordillera, colindante con la cuenca del Huasco, se encuentran las ignimbritas riolíticas y dacíticas (Tmp2) del Mioceno - Plioceno. Las aguas asociadas a estas formaciones son diluidas, de tipo carbonatado (G, H) y sulfatado (D) y de vía evolutiva carbonatada, lo que corresponde muy bien a la litología volcánica de este sector de la Cordillera.

- al sur de la Cordillera reaparecen rocas sedimentarias con un fuerte núcleo jurásico, lo que debería producir aguas de vía evolutiva neutra. Efectivamente la única agua que hemos extraído en este sector (un río: PIN-9) no solamente pertenece a la vía evolutiva neutra sulfatada, pero también es el agua de aporte más salada de todas las analizadas por nosotros en la Cordillera (6 g/l).

Evolución cuantitativa de aguas

Hemos visto que todas las salmueras, salvo una, pertenecen a la familia sulfatada Na / Cl-SO₄. Se sospecha que la única excepción (PIN-7) de tipo cálcico Na-Ca / Cl, es producto de la contaminación local de la napa por el concreto del pozo. Las salmueras sulfatadas derivan de

aguas diluidas de vía evolutiva sulfatada, es decir de aguas de tipo E, F, C, B, A y parcialmente D. No pueden derivar de aguas de tipo carbonatado G, H, I. El objetivo de esta parte del estudio es tratar de precisar el tipo de agua de aporte que origina (o ha originado) las salmueras del salar, es decir, en otras palabras, cual es la alimentación principal de las salmueras del Valle Central.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.	TIPO
													I II
PIN-43	6,93	6,47	156000	58900	717	2,91	116000	13600	343	106	3600		
PIN-42E	7,32	17,7	140000	54500	1480	11,9	101000	9530	261	293	4980	0,318	A
PIN-24E	7,72	23,0	105000	93400	1340	15,7	104000	8650	311	274	1500	0,431	E
PIN-26E	6,98	26,3	130000	51000	2680	12,6	92000	8740	316	319	6800	0,458	B
PIN-29E	6,94	25,7	136000	48800	2830	12,7	88100	19200	276	324	6290	0,461	B
PIN-5E	7,45	9,31	95800	97200	871	17,0	86500	17200	93,3	339	6180	0,534	B
PIN-25E	7,15	21,9	95600	93600	2090	15,4	83500	11300	293	321	10000	0,534	F
PIN-15E	7,52	26,0	92200	103000	1790	16,6	99100	8890	123	337	3630	0,545	E
PIN-30E	6,43	26,4	148000	30300	4260	11,4	97800	10700	573	362	2540	0,551	A
PIN-9E	7,07	17,2	172000	19000	1620	9,00	102000	5350	313	465	7590	0,558	B
PIN-40E	6,99	27,2	111000	67500	2730	14,6	74000	14800	279	324	11500	0,564	F
PIN-14E	7,47	25,8	105000	106000	2020	18,1	111000	10900	143	353	1750	0,585	E
PIN-35E	7,18	28,1	82000	121000	2480	16,7	89200	7570	399	334	8610	0,622	F
PIN-34E	7,22	30,5	77400	120000	2570	17,6	87400	8000	457	351	7590	0,634	E
PIN-22E	7,45	22,9	72500	114000	1750	18,6	89600	5730	183	382	6160	0,642	E
PIN-2E	7,35	19,3	78400	126000	1650	17,4	89300	11000	94,5	353	8560	0,685	F
PIN-3E	7,51	23,0	82600	128000	1750	19,9	100000	14100	83,9	409	5440	0,691	E
PIN-37E	7,35	35,0	81600	136000	2710	19,8	94900	15800	839	396	5980	0,694	E
PIN-6E	6,94	16,0	169000	10200	1690	9,60	80200	14200	341	916	12600	0,769	C
PIN-17E	7,08	20,7	110000	94500	2130	15,7	85200	17900	53,0	343	14400	0,809	F
PIN-20E	7,32	26,0	116000	97500	2350	17,1	115000	8750	420	296	87,3	0,823	F
PIN-21E	7,32	25,9	114000	98900	2370	17,4	114000	9900	421	311	50,0	0,843	D
PIN-28E	6,35	19,1	160000	8830	3640	10,5	85300	11100	392	1000	7600	0,856	B
PIN-23E	7,25	27,3	111000	100000	2620	17,7	113000	10800	421	323	54,9	0,863	D
PIN-4E	7,46	25,6	81200	98400	1970	17,6	100000	3220	51,6	377	2570	0,868	D
PIN-33E	7,05	34,7	103000	106000	3630	18,6	108000	13200	534	363	206	0,899	D
PIN-27E	6,35	16,4	159000	6150	3430	10,9	85200	11000	368	1430	6390	0,912	B
PIN-8E	9,97	890	104000	51800	1210	77,4	110000	4130	160	0,31	0,27	1,360	G
PIN-18E	10,0	1430	70200	99400	1860	97,2	122000	5510	269	0,40	0,33	1,400	D
PIN-19E	10,0	1420	71100	98500	2150	96,2	122000	4740	263	0,40	0,33	1,440	D
PIN-11E	7,06	7,94	167000	5330	1230	10,6	107000	1590	75,6	1510	208	1,470	B
PIN-13E	9,91	819	77600	100000	1680	78,3	119000	4680	117	0,45	0,36	1,480	H
PIN-1E	10,1	1830	60000	91900	2490	106	119000	9720	105	0,40	0,34	1,510	G
PIN-32E	9,94	962	88700	94400	2390	80,7	122000	3900	99,6	0,42	0,35	1,560	D
PIN-31E	10,1	1950	64800	80200	2850	108	115000	16600	65,8	0,39	0,34	1,580	H
PIN-10E	10,1	1530	75300	87900	1770	98,5	123000	6040	38,9	0,37	0,31	1,610	G
PIN-39E	9,82	468	61500	112000	969	74,7	91200	38700	38,5	0,57	0,42	1,620	I
PIN-12E	10,0	1470	63300	97900	2110	98,2	122000	3020	105	0,41	0,33	1,630	H
PIN-38E	9,97	775	63800	89600	944	89,3	87600	45700	38,3	0,41	0,32	1,630	I

Tabla 1. Comparación de la composición química de las aguas de aporte evaporadas con la salmuera más concentrada de Pintados (PIN-43). ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

En la tabla I presentamos la composición calculada de todas las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta la salinidad de la salmuera más concentrada de Pintados (PIN-43). Los valores de la columna "desviación" son los coeficientes del chi-cuadrado adaptado que miden el grado de semejanza entre las soluciones de aporte evaporadas (PIN-xxE) y la salmuera real PIN-43. En la última columna aparece el tipo de agua de aporte: a la izquierda las aguas del mega-grupo I (Valle Central, A, B, C, F) y a la derecha las del mega-grupo II (Cordillera, D, E, G, H, I). Las aguas diluidas y salobres del Valle Central son las que más se acercan a la salmuera real cuando se evaporan. Las que más se alejan son las aguas de aporte desde la Cordillera (D, G, H, I). Las aguas E se encuentran en una posición intermedia. Sin embargo, hemos hecho notar al principio que las aguas salobres del Valle Central son aguas ya evolucionadas a partir de aportes

más diluidos de la Cordillera. Si comparamos con el mismo procedimiento las aguas salobres del Valle Central con las soluciones evaporadas a partir de las aguas de aporte D, E, G, H, I de la Cordillera, observamos que las aguas salobres derivan exclusivamente de aguas de tipo E. Por ejemplo, PIN-42 se asemeja a las soluciones evaporadas a partir de (PIN-24, 15, 14, 34, 22), todas de tipo E. Podemos entonces concluir que las aguas iniciales de las soluciones salobres y saladas del Valle Central provienen de la evaporación de las aguas de aporte de tipo E (Na-Ca-Mg / SO₄) que han adquirido sus componentes disueltos por alteración de las formaciones volcano-sedimentarias cretácicas y jurásicas del centro norte y del extremo sur de la Cordillera andina, esencialmente en el sector de la quebrada de Tarapacá. Las aguas de aporte que drenan terrenos mayormente volcánicos en el norte y en el centro de la Cordillera no tienen mayor influencia sobre la química de las salmueras del Valle Central.

Hay que tener, sin embargo, mucho cuidado en concluir que las aguas de aporte más abundantes son las de tipo E que drenan terrenos sedimentarios. La salinidad promedia de las aguas de tipo E es de 1,0 g/l mientras que la salinidad promedia de las aguas que drenan terrenos volcánicos (D, G, H, I) es de 0,45 g/l, o sea menos de la mitad que de las aguas E. Por su salinidad relativamente elevada las aguas E pueden tener influencia dominante sobre la composición química de las aguas del Valle Central sin ser las más abundantes. Un buen indicio de la importancia de las aguas de aporte más diluidas procedentes del sector volcánico de la Cordillera colindante con la cuenca del Huasco es la cuña de aguas G, de vía evolutiva carbonatada, que penetra muy a dentro del Valle Central, prácticamente al contacto con las salmueras.

Conclusiones

Para efectos de este estudio se ha considerado al salar de Bellavista y al salar de Pintados como un solo cuerpo salino con el nombre de este último, incluyéndose también al salar del Viejo al sur del área. Existen básicamente dos tipos de aguas de aporte en la cuenca del salar de Pintados. Las aguas que drenan formaciones mayormente volcánicas son de tipo sulfatadas sodicas o bicarbonatadas sodicas y cálcicas. Son aguas diluidas (0,2 - 0,7 g/l STD) de vía evolutiva generalmente carbonatada que al evaporarse producen salmueras alcalinas ausentes en la cuenca. La mayor parte de las aguas termales pertenecen a este grupo. El otro grupo corresponde a aguas de formaciones volcano-sedimentarias, más saladas (1 - 6 g/l STD), de tipo cloruro-sulfatado y de vía evolutiva neutra sulfatada. Proceden principalmente de la sub-cuenca del río Tarapacá. Las aguas salobres y las salmueras del Valle Central derivan por evaporación de estas aguas. Los dos tipos de aguas de aporte reflejan bien la litología de los terrenos que lixivian. A pesar de no tener influencia alguna sobre la composición de las salmueras del Valle Central, las aguas de aporte diluidas parecen tener un flujo notable en la zona central colindante con la cuenca del Huasco. Penetran río abajo en el Valle Central casi al contacto con las salmueras. Su influencia química es obliterada por la salinidad notablemente más elevada del otro grupo de agua de aporte cloruro-sulfatado. Parece entonces que existen dos flujos mayores de aguas de aporte desde la Cordillera de los Andes hacia el Valle Central: uno por la sub-cuenca del Tarapacá (incluidos Laonzana y Coscaya) y el otro por el sector colindante con la cuenca del Huasco (Pica).

Las aguas diluidas de la cuenca del Huasco parecen bien distintas de las aguas del sector adyacente de Pintados a pesar de pertenecer a la misma vía evolutiva carbonatada. El comportamiento del magnesio, entre otros, es totalmente diferente en cada cuenca. Eso sugiere que no debería haber un flujo mayor de la cuenca del Huasco hacia Pintados.

Finalmente, cabe señalar dos puntos menores. Primero, se puede observar en la distribución de los tipos químicos (fig. 3) que en el sector de Pica se mezclan cuatro tipos de aguas muy distintas unas de las otras. Es de esperar una cierta complejidad de la química de aguas en este sector. Después hemos notado en varias ocasiones la composición muy particular de las aguas de Soga, anomalía para la cual no se tiene explicación, aunque estas aguas no parecen tener gran influencia en el ambiente hidroquímico local.

Referencias y estudios anteriores

Castillo, O. 1960. El agua subterránea en el Norte de la Pampa del Tamarugal, Inst. de Invest. Geológicas, Chile, Boletín N° 5.

Castillo, O. 1966. Profundidad, sentido de escurrimiento y calidad química del agua en el salar de Pintados. Informe IREN, Departamento de Recursos Hidráulicos, Santiago, Publicación 10-R.

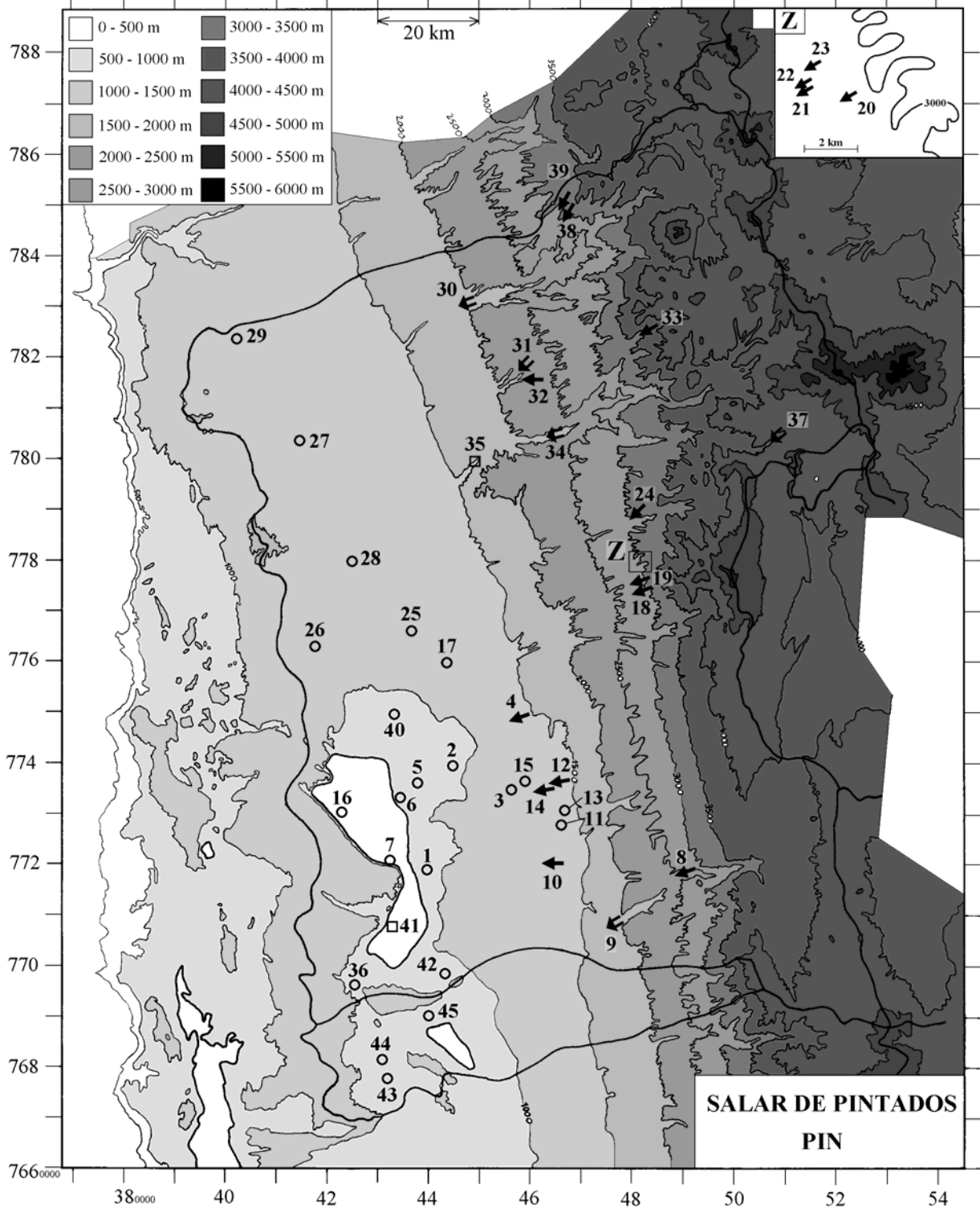
Fritz, P.; Silva, C.; Suzuki, O.; Salati, E. 1979. Isotope Hydrology in Northern Chile. Isotope Hydrology 1978, IAEA-SM-228/26, vol.II, 525-544.

Grilli, A.; Pollastri, A.; Ortiz, J.; Aguirre, E. 1989. Evaluación de tasas de evaporación desde salares, utilizando técnicas isotópicas - Aplicación en el salar de Bellavista, Chile. IAEA-TECDOC, Estudios de Hidrología isotópica en America Latina. Internacional Atomic Energy 502, Vienna (Austria), 155-168.

IRH 1983. Evaluación de los recursos de aguas superficiales de la Provincia de Iquique. Ingeniería y Recursos Hidráulicos. Informe para la Dirección General de Aguas, Santiago, Chile

Suzuki, Q. y Aravena, R. 1984. Hidrología isotópica del área Pica-Matilla. Comisión Chilena de Energía Nuclear, Informe inédito, Santiago, Chile.

Vasquez, A. 1978. Calidad de agua, Primera Región. Laboratorio Hidrológico, Departamento Hidrología, Dirección General de Aguas, Informe inédito.



SALAR DE PINTADOS

PIN

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
PIN-1	30/08/96	16 ^H 45	440644	7719065	980	Napa (pozo colonia Pintados)
PIN-2	31/08/96	10 ^H 50	446143	7739834	990	Napa (pozo ESSAT)
PIN-3	31/08/96	11 ^H 10	446000	7740000	1100	Napa (Mezcla 9 pozos ESSAT)
PIN-4	31/08/96	12 ^H 20	459221	7748539	1390	Manantial corriente (Puquio La Calera)
PIN-5	31/08/96	15 ^H 25	440824	7736029	993	Napa (Noria Luis Quispe)
PIN-6	31/08/96	17 ^H 15	434009	7731942	982	Napa (Pozo Bosque Junoy)
PIN-7	31/08/96	18 ^H 15	432510	7720930	981	Napa (Pozo piezometrico DGA B-254)
PIN-8	01/09/96	13 ^H 35	489113	7718259	2200	Manantial corriente (Estanc. Chacarilla)
PIN-9	01/09/96	16 ^H 00	475717	7709018	1595	Río Chacarilla
PIN-10	01/09/96	17 ^H 35	463467	7721975	1200	Manantial corriente (Puquio Nuñez)
PIN-11	01/09/96	18 ^H 30	466205	7729098	1290	Napa (Pozo artesiano Santa Rosa)
PIN-12	02/09/96	09 ^H 45	467082	7735155	1395	Manantial corriente termal (Cocha Pica)
PIN-13	02/09/96	10 ^H 40	466672	7731712	1295	Napa (pozo artesiano Chintaguay)
PIN-14	02/09/96	12 ^H 05	462980	7733912	1250	Manantial corriente Santa Rosa
PIN-15	02/09/96	12 ^H 55	460427	7735384	1130	Napa (pozo Esmeralda)
PIN-16	02/09/96	16 ^H 45	424933	7727446	982	Napa (pozo estación Gallinazo)
PIN-17	02/09/96	18 ^H 40	444343	7757180	1080	Napa (pozo La Cascada)
PIN-18	03/09/96	12 ^H 00	481849	7774010	2750	Manantial corriente termal Macaya
PIN-19	03/09/96	12 ^H 40	481225	7774154	2700	Manantial corriente (ag. potable Macaya)
PIN-20	03/09/96	14 ^H 15	479017	7780473	2900	Manantial corriente Jama Juga
PIN-21	03/09/96	15 ^H 15	477924	7780502	2800	Manantial corriente Mamiña-Ipla
PIN-22	03/09/96	15 ^H 40	478010	7780541	2800	Manantial corriente Mamiña-magnesio

**SALAR DE PINTADOS
PIN**

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
PIN-23	03/09/96	16 ^H 20	478032	7781032	2810	Manantial corriente Mamiña-El Tambo
PIN-24	03/09/96	17 ^H 30	480314	7787803	2850	Manantial corriente Parca
PIN-25	04/09/96	11 ^H 05	435977	7767162	1050	Napa (pozo Dupliza 2)
PIN-26	04/09/96	12 ^H 45	419913	7763118	1040	Napa (pozo Cala Cala)
PIN-27	04/09/96	13 ^H 50	415925	7804801	1140	Napa (pozo Negreiros)
PIN-28	04/09/96	15 ^H 30	425757	7780194	1080	Napa (pozo of. Mapocho, Soquimich)
PIN-29	04/09/96	17 ^H 35	401757	7824639	1160	Napa (Pozo Dolores)
PIN-30	05/09/96	12 ^H 40	447935	7830681	1650	Río (quebrada Aroma en Arequilda)
PIN-31	05/09/96	16 ^H 45	458870	7817372	2000	Río Guasquiña
PIN-32	05/09/96	17 ^H 30	458465	7816762	2000	Manantial corriente (Guasquiña)
PIN-33	06/09/96	18 ^H 25	481681	7823963	3450	Manantial corriente termal Chusmiza
PIN-34	09/09/96	11 ^H 30	464021	7804771	1800	Río Laonzana
PIN-35	09/09/96	13 ^H 20	447874	7797749	1450	Napa (dren agua potable Tarapaca)
PIN-36	09/09/96	18 ^H 50	426449	7695736	990	Napa (pozo observación DGA D-290)
PIN-37	10/09/96	13 ^H 20	507329	7803504	3870	Río Coscaya (estación aforo DGA)
PIN-38	11/09/96	13 ^H 00	465054	7847974	2800	Manantial corriente Soga-Rincón
PIN-39	11/09/96	14 ^H 35	464954	7848729	2800	Manantial corriente Soga-Chinanguana
PIN-40	12/09/96	10 ^H 30	433120	7748726	990	Napa (pozo ESSAT La Tirana)
PIN-41	30/08/96	10 ^H 50	431835	7706656	960	Napa (dren en Victoria, Bellavista)
PIN-42	30/08/96	14 ^H 45	443951	7698167	980	Napa (pozo Cerro Gordo, Bellavista)
PIN-43	30/08/96	12 ^H 20	431029	7678461	940	Napa (salmuera bombeada, Centro Lag.)
PIN-44	30/08/96	13 ^H 15	430630	7681406	940	Napa (pozo, Norte Laguna)
PIN-45	30/08/96	13 ^H 30	439303	7689788	950	Napa (pozo Pique Salado, Sur Viejo)

SALAR DE PINTADOS

PIN

NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
PIN-1	760	26,9	na	1,000	8,15	2,52	74,6	0,182	0,137	114	0,569	3,09	39,5	0,395	150	12,1	0,131	6,22	0,406
PIN-2	1704	27,3	na	1,001	7,65	1,36	131	0,249	0,178	592	5,13	2,76	36,4	0,0324	197	18,4	0,158	154	14,7
PIN-3	1119	22,4	na	1,000	8,43	1,49	92,3	0,216	0,0798	317	11,6	1,96	34,4	0,0430	162	15,8	0,094	60,2	6,27
PIN-4	2880	31,8	4,0	1,001	7,78	1,96	213	0,396	0,247	989	51,2	5,88	23,0	0,0580	527	8,45	0,135	111	7,00
PIN-5	1530	21,4	na	1,001	7,69	1,34	212	0,421	0,105	348	1,01	1,92	38,6	0,0428	196	37,9	0,206	86,6	13,9
PIN-6	2840	16	na	1,001	7,60	1,80	618	1,32	0,125	445	2,15	6,33	41,4	0,0720	294	52,0	1,25	209	46,4
PIN-7	94400	23	na	1,049	10,8	4,81	39800	4,11	1,50	1900	2,71	20,6	0,952	0,108	19300	2310	69,4	4530	0,141
PIN-8	1217	12,8	9,5	1,001	8,11	4,59	187	0,348	0,203	96,0	nd	2,25	20,2	0,0525	208	7,66	0,296	48,9	6,08
PIN-9	9670	23,7	8,7	1,005	8,14	2,99	2640	3,60	1,70	1050	0,019	25,1	18,6	0,0200	1550	81,7	4,79	377	116
PIN-10	577	18,7	8,5	1,000	9,20	1,65	63,9	0,164	0,0699	78,5	2,55	1,58	36,1	0,109	112	5,40	0,035	5,49	0,122
PIN-11	3830	33,7	1,5	1,002	8,24	0,311	831	1,44	0,561	606	0,682	6,78	18,4	0,00929	559	8,09	0,385	255	1,06
PIN-12	349	32	6,5	1,000	7,96	1,59	26,3	0,116	0,0768	40,6	3,32	0,876	20,0	0,00348	51,5	1,25	0,044	19,9	0,258
PIN-13	416	31,8	na	1,000	7,98	1,57	33,1	0,128	0,0624	62,6	5,88	0,713	19,4	0,00566	60,3	1,99	0,050	23,9	0,355
PIN-14	1124	28,8	7,0	1,000	8,05	0,775	88,4	0,196	0,125	347	3,91	2,03	26,1	0,0310	159	9,15	0,120	71,0	1,47
PIN-15	1332	28	na	1,001	7,54	2,98	111	0,291	0,189	329	7,07	2,16	29,7	0,0250	192	10,7	0,148	84,2	4,52
PIN-16	2540	23	na	1,001	8,96	0,533	689	1,29	0,499	121	9,80	9,62	0,308	0,00655	435	48,9	1,47	42,5	8,85
PIN-17	1473	28	7,0	1,000	7,55	1,44	145	0,361	0,0509	436	24,0	2,82	33,6	0,00714	113	23,7	0,070	164	19,3
PIN-18	582	31	4,5	1,000	8,38	1,39	43,3	0,186	0,147	121	nd	1,15	22,1	0,106	108	3,40	0,166	9,98	0,136
PIN-19	637	21	3,1	1,000	8,50	1,65	52,2	0,213	0,208	124	0,022	1,58	21,1	0,107	119	3,48	0,193	12,0	0,168
PIN-20	709	30	1,6	1,000	8,99	0,433	41,9	0,036	0,0802	217	nd	1,15	26,1	0,00078	115	3,17	0,152	22,8	0,032
PIN-21	723	41,5	0,1	1,000	8,97	0,440	40,8	0,177	0,0824	220	0,010	1,15	28,8	0,00046	112	3,56	0,151	24,6	0,018
PIN-22	1700	25,4	4,4	1,001	7,56	1,46	107	0,358	0,133	583	14,1	2,57	30,2	0,0112	251	8,45	0,270	106	9,40

T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l.
 CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

SALAR DE PINTADOS

PIN

NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
PIN-23	744	52,9	0,1	1,000	8,87	0,450	40,5	0,172	0,0876	229	nd	1,29	30,0	0,00080	117	3,91	0,153	24,7	0,020
PIN-24	1620	11,1	7,6	1,001	8,30	4,89	141	0,518	0,249	375	nd	2,30	14,0	0,0185	262	11,6	0,418	75,0	16,0
PIN-25	2050	25,3	na	1,001	7,35	2,44	242	0,535	0,0506	545	21,9	5,30	30,5	0,0360	213	28,5	0,743	178	25,8
PIN-26	3610	24,8	na	1,002	7,36	1,56	678	1,39	0,279	713	27,2	14,7	29,4	0,428	492	46,1	1,67	215	36,0
PIN-27	3230	25,2	na	1,002	7,54	1,15	777	1,55	0,303	363	3,03	18,5	31,9	0,174	421	54,0	1,80	167	31,3
PIN-28	3690	25,9	na	1,002	7,39	1,12	838	1,68	0,360	533	3,03	21,0	31,9	0,192	455	58,7	2,07	228	40,1
PIN-29	1391	19,6	na	1,001	8,03	1,05	247	0,523	0,0765	230	3,29	5,57	32,5	0,129	167	35,7	0,512	79,0	11,7
PIN-30	4740	21,4	8,1	1,003	8,03	3,87	1150	2,33	0,570	436	nd	36,1	29,1	2,22	775	84,1	4,48	158	19,9
PIN-31	470	13,8	8,8	1,000	7,33	2,59	37,6	0,169	0,0108	46,6	0,011	1,91	31,6	0,00558	69,2	9,62	0,038	24,5	3,79
PIN-32	617	27,5	3,5	1,000	8,48	1,16	66,7	0,229	0,0623	117	nd	3,56	16,9	0,0302	120	2,93	0,075	6,70	0,258
PIN-33	919	43,5	3,1	1,000	8,21	0,684	53,6	0,160	0,0576	275	0,021	2,40	27,6	0,0268	147	6,84	0,277	29,9	0,107
PIN-34	2130	13,4	10	1,001	8,14	4,02	273	0,464	0,0412	648	nd	9,07	20,8	0,0700	317	28,2	1,61	162	27,2
PIN-35	3090	16,4	2,8	1,002	6,93	5,98	355	0,63	0,0225	889	nd	10,7	16,9	0,0147	391	32,8	1,73	273	37,9
PIN-36	95000	21,4	1,7	1,059	8,67	6,57	33200	9,91	2,97	16000	2,79	128	1,85	5,75	24800	2990	47,5	734	505
PIN-37	1230	12,1	8,0	1,000	8,31	1,63	130	0,276	0,0769	303	nd	4,31	25,4	0,219	156	25,1	1,33	73,0	9,65
PIN-38	227	22,2	7,4	1,000	8,18	1,22	13,9	0,142	0,0079	19,5	7,32	0,205	28,0	0,00809	19,9	9,93	0,008	15,1	4,08
PIN-39	268	20,6	7,8	1,000	7,80	1,51	14,4	0,137	0,0119	26,3	6,12	0,227	23,7	0,00644	21,4	9,07	0,009	19,4	6,17
PIN-40	1945	23,8	5,5	1,001	7,50	2,38	251	0,527	0,105	508	5,54	6,17	36,7	0,0269	168	33,5	0,632	201	26,2
PIN-41	31300	17,2	11	1,019	8,53	3,79	8380	3,11	1,88	5890	27,7	59,7	10,1	0,530	7080	696	15,1	529	179
PIN-42	1857	24,8	na	1,001	7,76	2,30	437	0,745	0,260	206	4,53	4,58	33,3	0,181	311	29,4	0,805	58,1	17,5
PIN-43	212000	19,1	0,4	1,247	6,93	6,47	156000	54,4	60,5	58900	15600	717	2,91	0,105	116000	13600	343	106	3600
PIN-44	119400	23,9	na	1,089	7,45	2,85	51100	15,2	1,32	24700	144	215	4,84	0,0100	39800	3950	79,1	622	683
PIN-45	14480	24	na	1,010	6,68	0,986	4080	1,91	0,623	2890	nd	16,9	28,8	0,333	2830	188	5,58	758	129

T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l.

CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

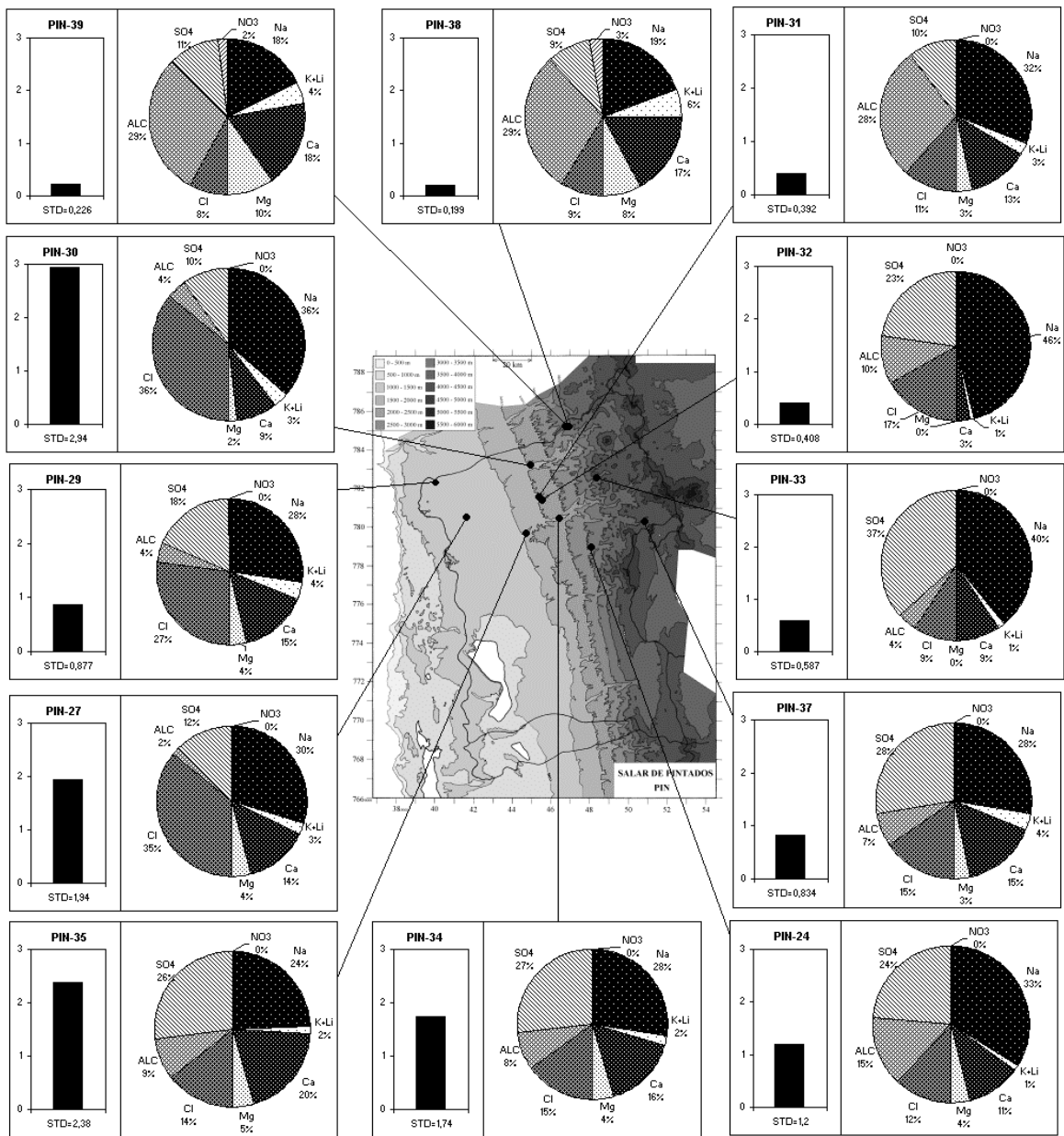
SALAR DE PINTADOS

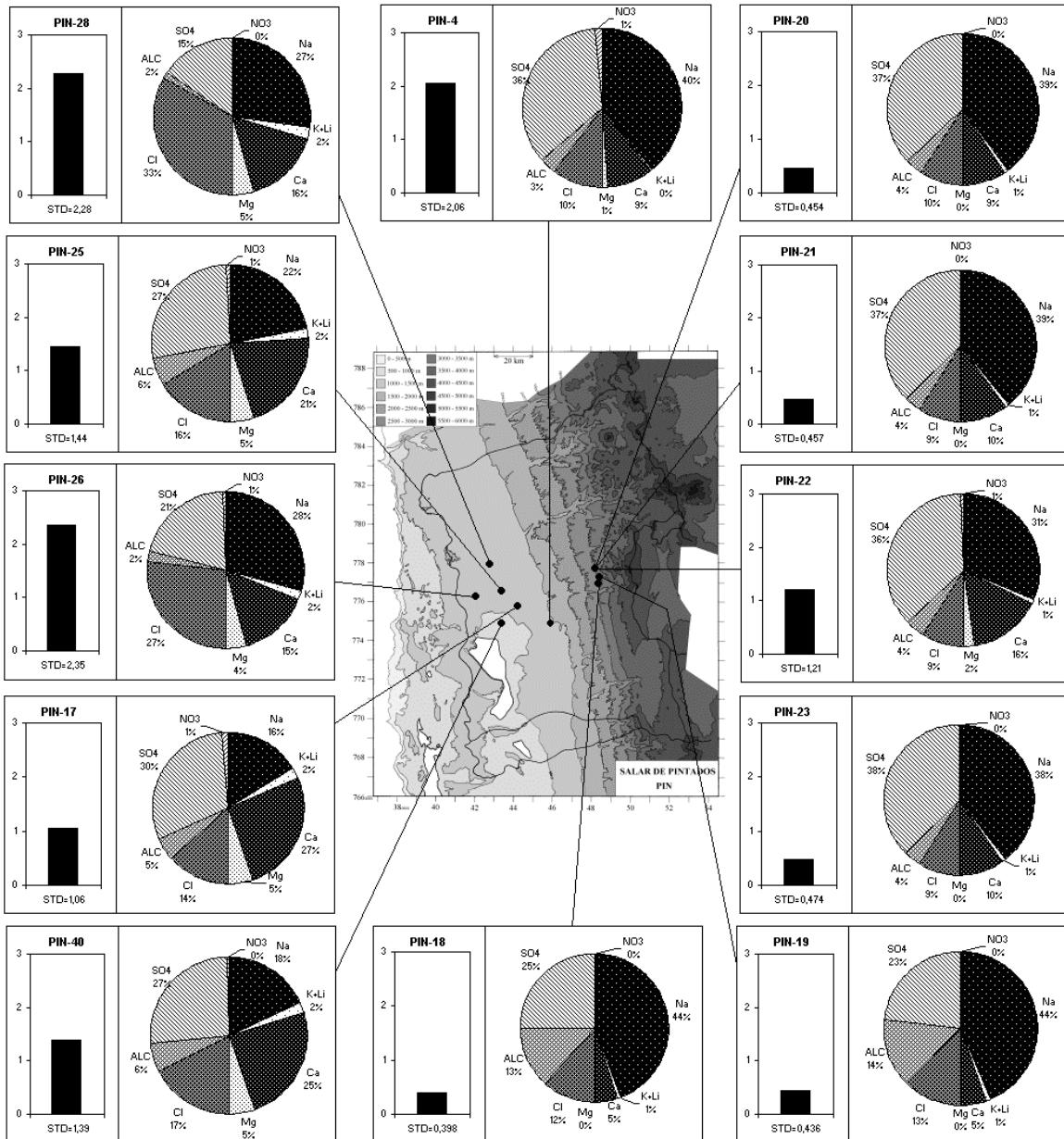
PIN

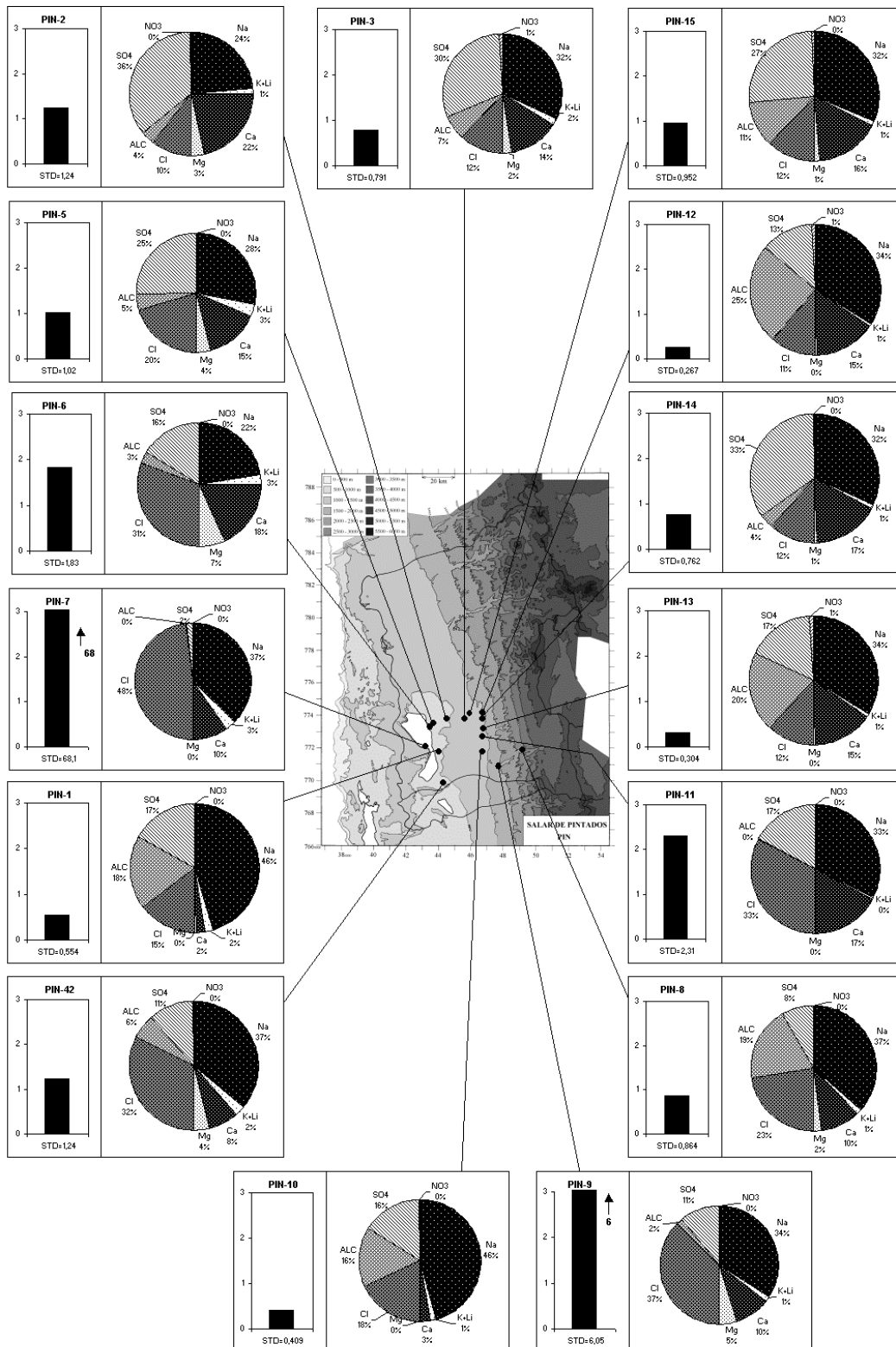
NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF. %	NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF. %
PIN-1	554,2	147	1,44	1,45	7,201	7,010	2,7	PIN-23	473,5	2,62	0,30	0,004	6,436	6,371	1,0
PIN-2	1235	80,5	0,66	2,38	17,94	17,48	2,6	PIN-24	1202	286	4,98	2,42	16,81	16,69	0,7
PIN-3	791,2	81,1	2,34	0,43	10,97	10,88	0,9	PIN-25	1439	146	0,66	8,80	21,06	20,97	0,4
PIN-4	2059	115	1,14	2,33	29,25	29,39	0,5	PIN-26	2350	92,7	0,48	5,28	36,52	35,96	1,5
PIN-5	1017	79,9	0,48	2,33	14,99	14,56	2,9	PIN-27	1939	65,9	0,48	2,51	30,84	30,66	0,6
PIN-6	1825	107	0,72	4,05	28,53	28,52	0,05	PIN-28	2280	64,7	0,36	3,43	36,28	35,87	1,1
PIN-7	68080	-	-	-	1135	1164	2,6	PIN-29	876,8	59,5	0,72	0,84	13,14	12,87	2,0
PIN-8	864,3	273	2,76	3,56	12,23	11,85	3,1	PIN-30	2935	212	3,72	2,68	46,03	45,25	1,7
PIN-9	6052	153	6,12	1,36	98,34	99,30	1,0	PIN-31	391,6	157	0,24	12,8	4,796	4,620	3,7
PIN-10	408,9	70,2	6,06	0,07	5,317	5,128	3,6	PIN-32	408,0	62,2	1,32	0,29	5,671	5,480	3,4
PIN-11	2306	10,3	0,54	0,07	37,35	36,35	2,7	PIN-33	587,1	34,6	0,78	0,27	8,116	7,915	2,5
PIN-12	267,2	93,9	0,78	1,45	3,292	3,230	1,9	PIN-34	1741	232	4,20	2,64	25,09	25,21	0,5
PIN-13	303,6	92,7	0,90	1,36	3,899	3,900	0,03	PIN-35	2375	363	0,60	61,6	34,81	34,50	0,9
PIN-14	762,3	43,6	0,66	0,53	10,84	10,55	2,7	PIN-36	78873	65,9	14,2	0,12	1241	1276	2,7
PIN-15	952,0	179	0,90	7,04	13,21	13,08	1,0	PIN-37	834,2	92,7	1,62	0,79	12,04	11,60	3,7
PIN-16	1398	9,39	0,90	0,01	23,21	22,61	2,6	PIN-38	199,3	71,4	0,78	0,70	2,212	2,135	3,5
PIN-17	1056	85,4	0,66	3,21	15,26	15,00	1,8	PIN-39	226,4	90,9	0,42	2,29	2,638	2,563	2,9
PIN-18	397,9	78,1	1,44	0,44	5,320	5,131	3,6	PIN-40	1388	142	0,96	6,16	20,44	20,13	1,5
PIN-19	435,8	93,3	1,86	0,44	5,889	5,702	3,2	PIN-41	23114	124	10,6	0,41	369,1	363,1	1,6
PIN-20	453,8	10,8	0,96	0,02	6,224	6,134	1,5	PIN-42	1242	137	0,96	3,21	18,71	18,98	1,4
PIN-21	456,9	5,49	0,60	0,01	6,210	6,171	0,6	PIN-43	365620	-	-	-	5759	5877	2,0
PIN-22	1205	87,2	0,48	3,21	17,21	16,84	2,2	PIN-44	121454	104	1,80	2,95	1930	1959	1,5
								PIN-45	10988	59,4	0,12	14,1	177,0	176,2	0,5

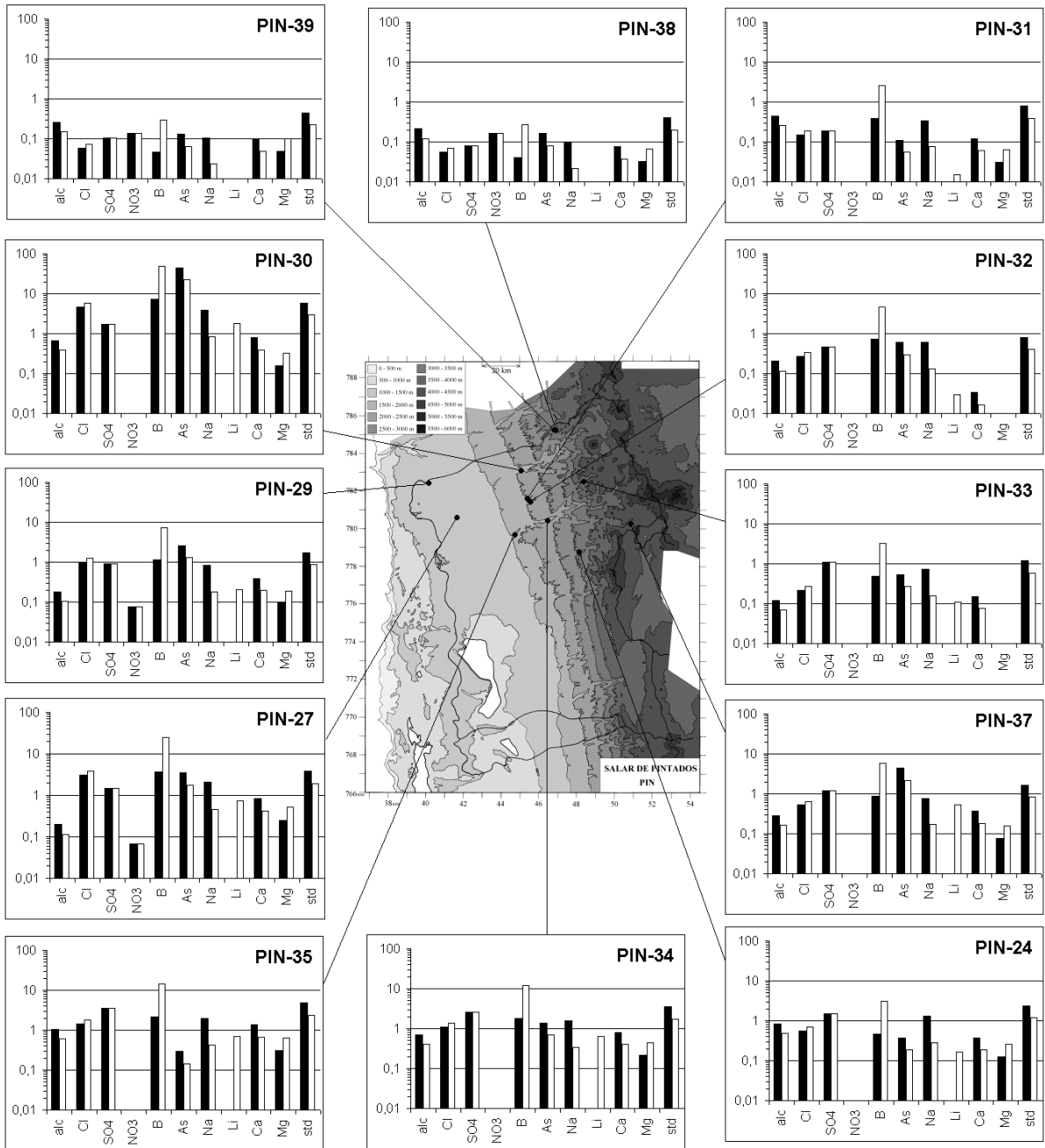
Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.

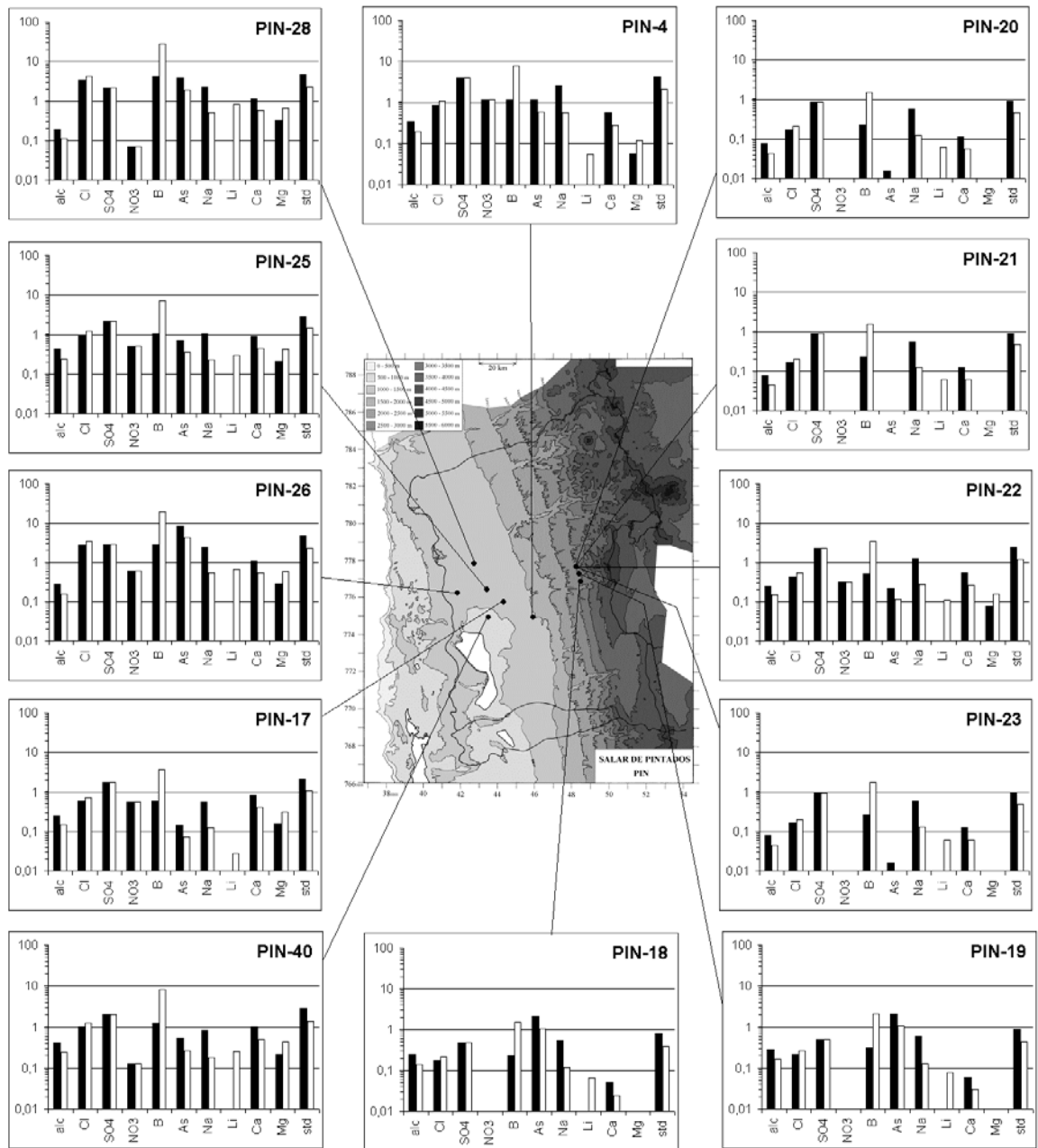
S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l); DIF.% = diferencia en %

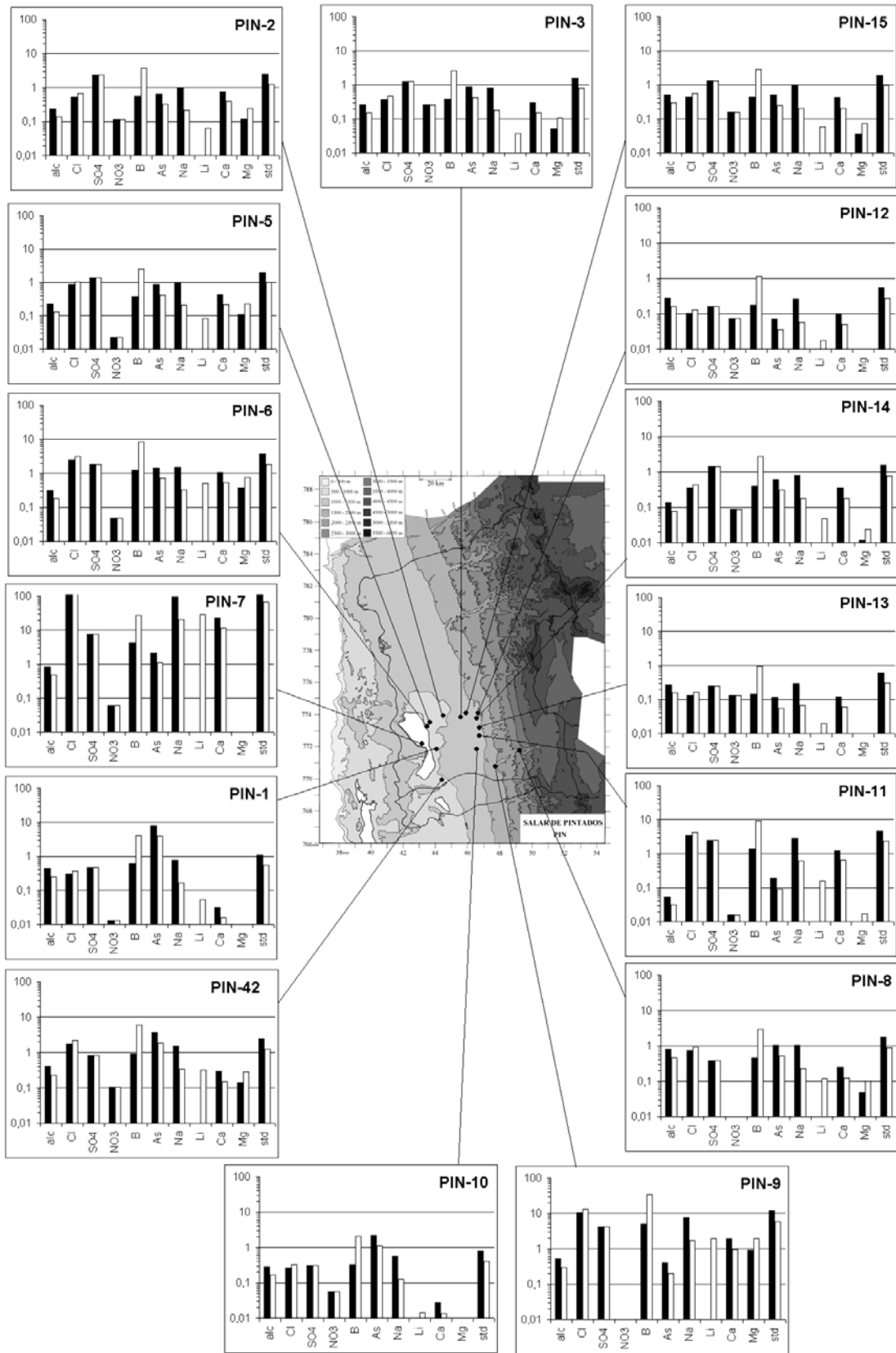








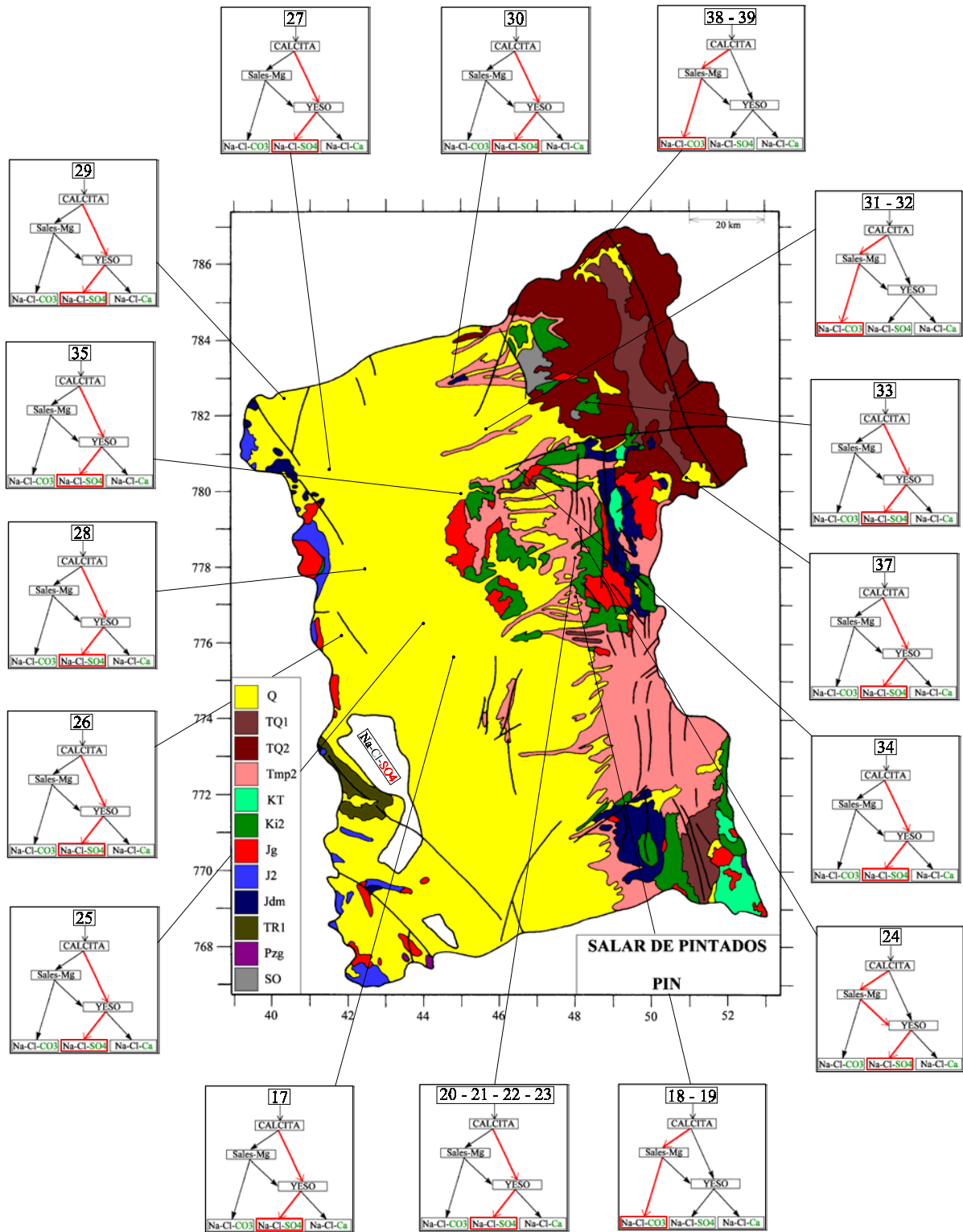


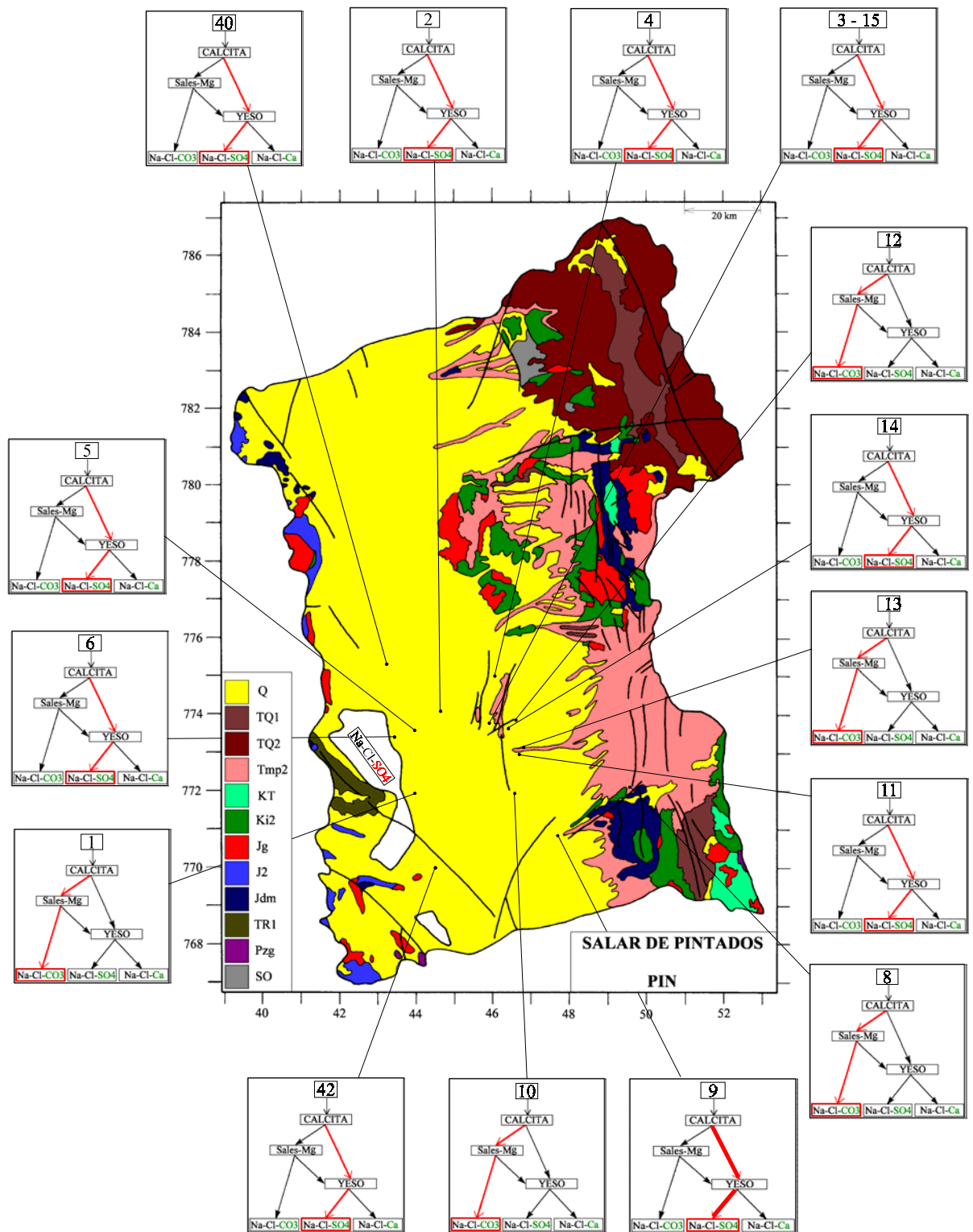


MAPA GEOLOGICO Y VIAS EVOLUTIVAS

PIN

- Q** : *Cuaternario*. Sedimentos fluviales, lacustres, glaciales, eólicos aluviales, coluviales y laháricos.
- TQ1** : *Plioceno - Pleistoceno*. Ignimbritas dacíticas, tobas e intercalaciones de sedimentitas clásticas continentales.
- TQ2** : *Plioceno - Pleistoceno*. Coladas, tobas y brechas andesíticas y basálticas con intercalaciones de sedimentitas detríticas.
- Tmp2** : *Mioceno - Plioceno*. Ignimbritas riolíticas y riolíticas con intercalaciones sedimentarias.
- KT** : *Cretácico sup. - Terciario inf.* Coladas y brechas andesíticas y riolíticas, tobas e ignimbritas dacíticas y riolíticas, con intercalaciones de lutitas, calizas, areniscas y conglomerados continentales.
- Ki2** : *Cretácico inf.* Coladas y brechas andesíticas, dacíticas, riolíticas y traquíticas; tobas, ignimbritas e intercalaciones sedimentarias.
- Jg** : *Jurásico*. Rocas plutónicas e hipabisales.
- J2** : *Jurásico*. Fm. La Negra. Coladas y tobas andesíticas y, en forma subordinada, coladas riolíticas, dacíticas y traquíticas, tobas dacíticas e intercalaciones sedimentarias, algunas con fósiles marinos.
- Jdm** : *Jurásico (Dogger - Malm)*. Areniscas, areniscas calcáreas, calizas, margas, lutitas, conglomerados y cherts. Desarrollo de facies evaporíticas en el Jurásico sup. de la Cordillera de los Andes.
- TR1** : *Triásico medio - Triásico sup.* Rocas sedimentarias y/o volcánicas: areniscas, lutitas y conglomerados; coladas y brechas riolíticas y andesíticas.
- Pzg** : *Paleozoico*. Rocas plutónicas e hipabisales.
- SO** : *Silúrico - Ordovícico*. Areniscas cuarcíferas y feldespáticas, lutitas, conglomerados, cherts y calizas.





LAGUNA LAGUNILLA

Introducción

Se trata de una pequeña cuenca ubicada al norte de la cuenca del salar del Huasco aunque a veces se la considera como una sub-cuenca de este último. Sus principales características morfológicas y climatológicas son:

- altura: 3900 m (laguna)
- superficie de la cuenca: 129 km²
- superficie del salar: 0,2 km²
- superficie de la laguna 0,1 - 0,2 km²
- precipitaciones: 150 mm/año
- evaporación potencial: 1490 mm/año
- temperatura: 4,6°C

Es una laguna superficial apenas salobre de superficie muy variable. Las napas subterráneas de la cuenca de drenaje son explotadas por la compañía minera Cerro Colorado. Hemos prelevado solamente tres muestras :

- la única vertiente que alimenta la laguna (LGU-1)
- la laguna (LGU-2)
- una napa subterránea (LGU-3)

Composición química y vías evolutivas

La figura 1 presenta la composición química de estas soluciones y de las del salar del Huasco.

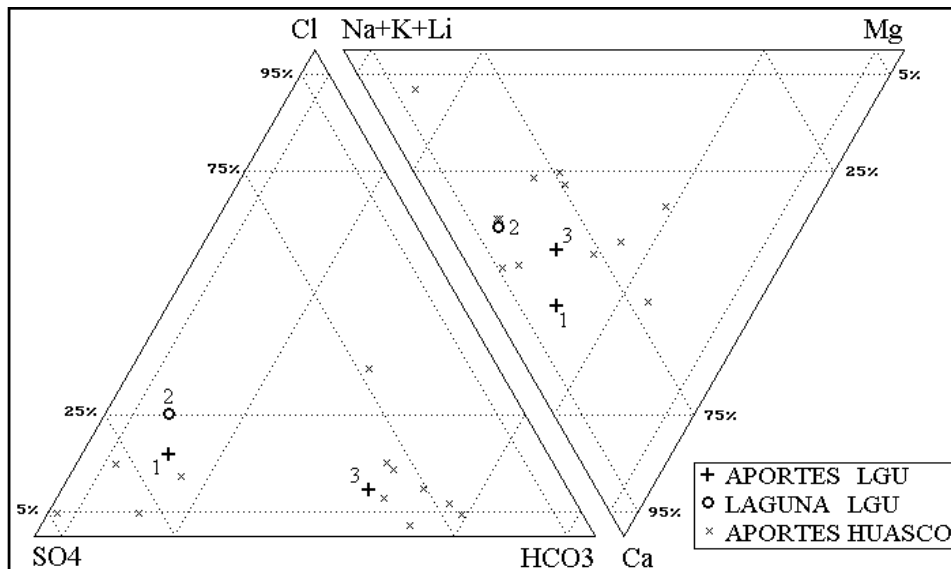


Fig.1 : Composición química de las aguas de Lagunilla y de los aportes al salar del Huasco.

La vertiente (1) es de tipo Na-Ca / SO₄ y la napa (3) de tipo Na-Ca / HCO₃-(SO₄). Cada una de estas aguas de aporte pertenece a uno de los dos grupos químicos identificados en el salar del Huasco. La composición de la laguna se asemeja a la de la vertiente. Al evaporarse, el agua de vertiente sigue la vía neutra sulfatada, mientras que el agua de napa sigue la vía alcalina sulfatada, sin pasar por la etapa de la precipitación del yeso. Esa variante indica que el agua de napa esta al limite entre las vías evolutivas carbonatada y sulfatada. De todas estas obervaciones, se puede deducir que el agua de la vertiente (1) no proviene de la descarga de la napa (3). La composición de los aportes y las vías evolutivas no discrepan con la litología de la cuenca.

Evolución cuantitativa de las aguas de aporte

En la tabla I presentamos la composición calculada de las dos aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta la salinidad de la laguna. Los valores de la columna "desviación" son los coeficientes del chi-cuadrado adaptado que miden el grado de semejanza entre las soluciones de aporte evaporadas (LGU-xE) y la solución de la laguna LGU-2.EQL. Se ha recalculado la composición de la laguna al equilibrio con la calcita.

NUMERO	PH	ALC	NA	K	LI	CA	MG	CL	SO4	B	SI	DESV.
<i>LGU-2.EQL</i>	<i>8,39</i>	<i>0,664</i>	<i>188</i>	<i>65,3</i>	<i>0,154</i>	<i>106</i>	<i>21,1</i>	<i>161</i>	<i>559</i>	<i>2,37</i>	<i>18,8</i>	
LGU-1E	8,22	0,810	141	34,5	0,206	160	27,9	109	637	3,14	33,4	0,135
LGU-3E	8,80	3,20	238	84,2	0,176	10,7	41,9	89,5	506	2,44	34,3	0,392

Tabla 1 : Comparación de las aguas de aporte evaporadas con las aguas de la laguna Lagunilla. ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

El agua de vertiente evaporada es la solución más parecida a la de la laguna. La napa evaporada se aleja netamente más de la composición de la laguna. Sin embargo, el coeficiente de desviación del agua de vertiente evaporada no es tan bueno como se podría esperar al observar la aparente simplicidad del sistema vertiente-laguna. Al considerar un aporte adicional por la napa 3, se puede mejorar las concentraciones calculadadas de Na, K, Ca, y SO₄, pero empeoran las de alc, Li, Mg, Cl y B. El coeficiente de desviación no mejora notablemente, lo que se gana de un lado se pierde del otro. Eso sugiere que debe existir un otro aporte no prelevado, distinto de la vertiente y de la napa.

Calidad de aguas

Las dos aguas de aporte son de muy buena calidad para el consumo humano. El arsénico no plantea ningún problema. La vertiente tiene un contenido límite en boro para un uso agrícola.

Balance hídrico

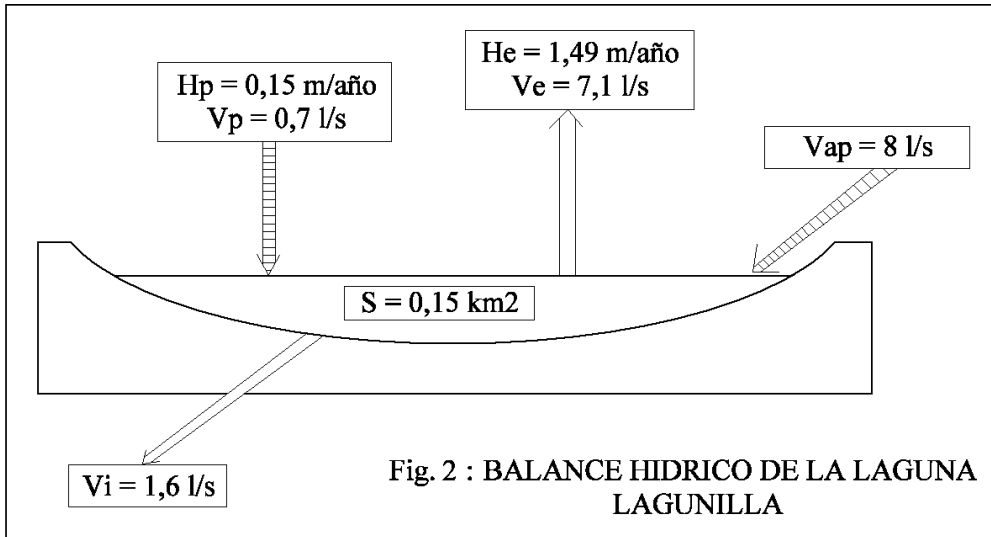
Para estimar las infiltraciones, tenemos una imprecisión debida al aporte oculto. Se utiliza el cloruro como elemento conservativo. Los parámetros considerados son :

- H_e = 1,49 m/año
- H_p = 0,15 m/año
- S = 0,15 km²
- C_{ap} = 32,2 mg/l (vertiente LGU-1)

- $C_L = 161 \text{ mg/l}$ (laguna LGU-2)

Volumen de aporte : $V_{ap} = S(H_e - H_p)/(1 - C_{ap}/C_L) = 251\,300 \text{ m}^3/\text{año} = 8 \text{ l/s}$

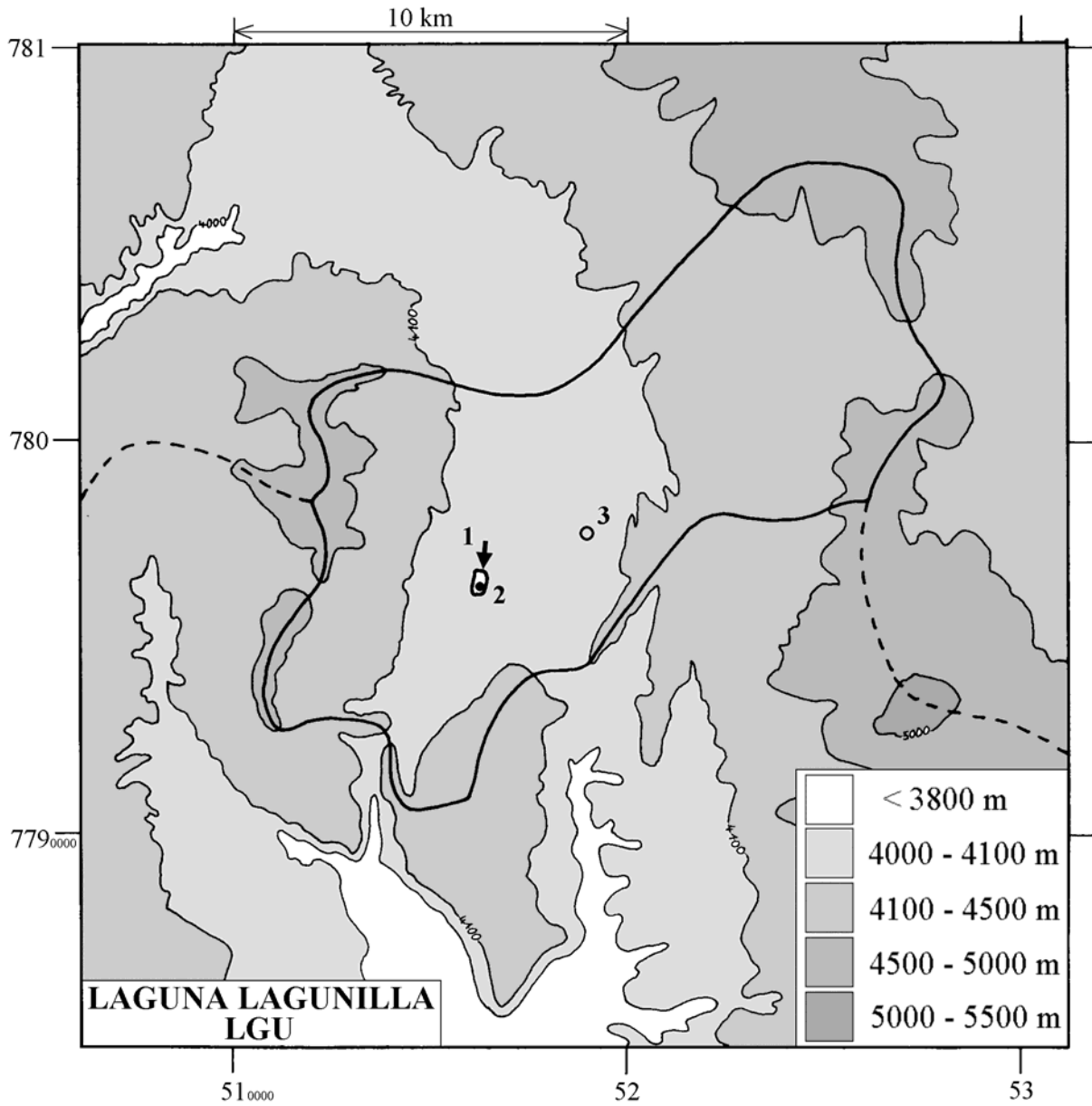
Volumen de infiltraciones : $V_i = S(H_e - H_p)/(1 - C_L/C_{ap}) = 50\,300 \text{ m}^3/\text{año} = 1,6 \text{ l/s}$



Conclusiones

Las aguas de la cuenca de Lagunilla son muy parecidas a las del salar del Huasco. Es efectivamente probable que las dos cuencas estén conectadas hidrogeológicamente. La laguna es alimentada por aguas distintas de la napa subterránea del oeste de la cuenca. La vertiente al norte de la laguna no es el único aporte. La química de la laguna sugiere una alimentación adicional, probablemente por descarga de otras napas subterráneas.

➔ MANANTIAL FLUYENTE	➔ RIO, RIACHUELO	○ POZO
➤ MANANTIAL DIFUSO	• LAGUNA, POZA	□ CALICATA, DREN, CAPTACION



**LAGUNA LAGUNILLA
LGU**

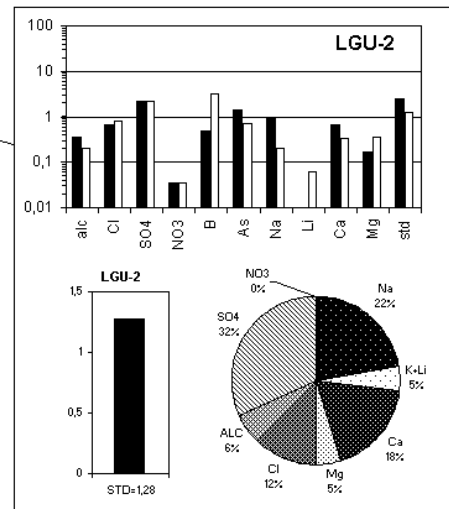
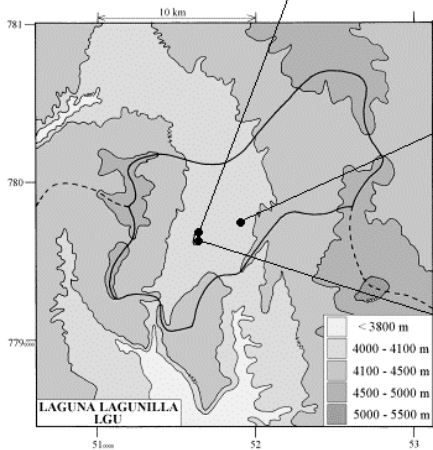
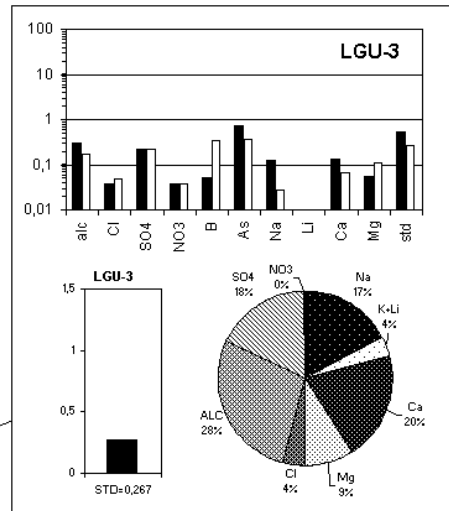
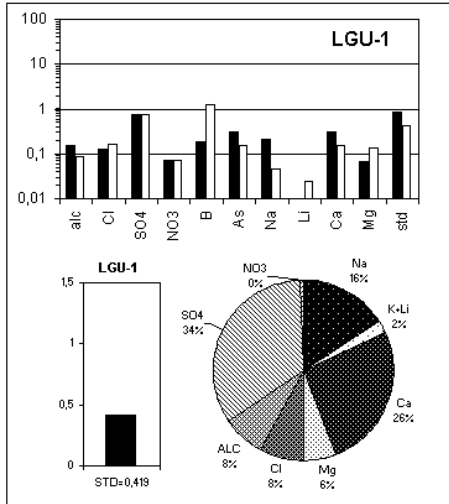
NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
LGU-1	07/09/96	13 ^H 35	516116	7796731	4070	Manantial corriente
LGU-2	07/09/96	13 ^H 55	516414	7796115	4070	Laguna
LGU-3	10/09/96	12 ^H 25	518592	7797261	4080	Napa (pozo 3 Cerro Colorado)

NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
LGU-1	589	14,5	na	1,000	8,20	0,879	32,2	0,097	0,0091	184	3,08	0,930	23,4	0,015	41,6	10,2	0,061	61,8	8,26
LGU-2	1420	10,5	6,2	1,001	8,85	2,07	161	0,299	0,0145	553	1,52	2,37	18,8	0,070	191	65,3	0,154	134	21,1
LGU-3	318	10,7	2,2	1,000	8,16	1,73	9,51	0,070	0,0061	53,8	1,64	0,259	27,5	0,036	25,3	8,95	0,019	26,5	6,85

T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l.
CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF.%
LGU-1	419,0	50,9	0,72	0,53	5,840	5,675	2,9
LGU-2	1276	104	7,92	0,26	18,40	18,14	1,4
LGU-3	267,3	103	0,90	1,3	3,218	3,145	2,3

Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.
S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l); DIF.% = diferencia en %



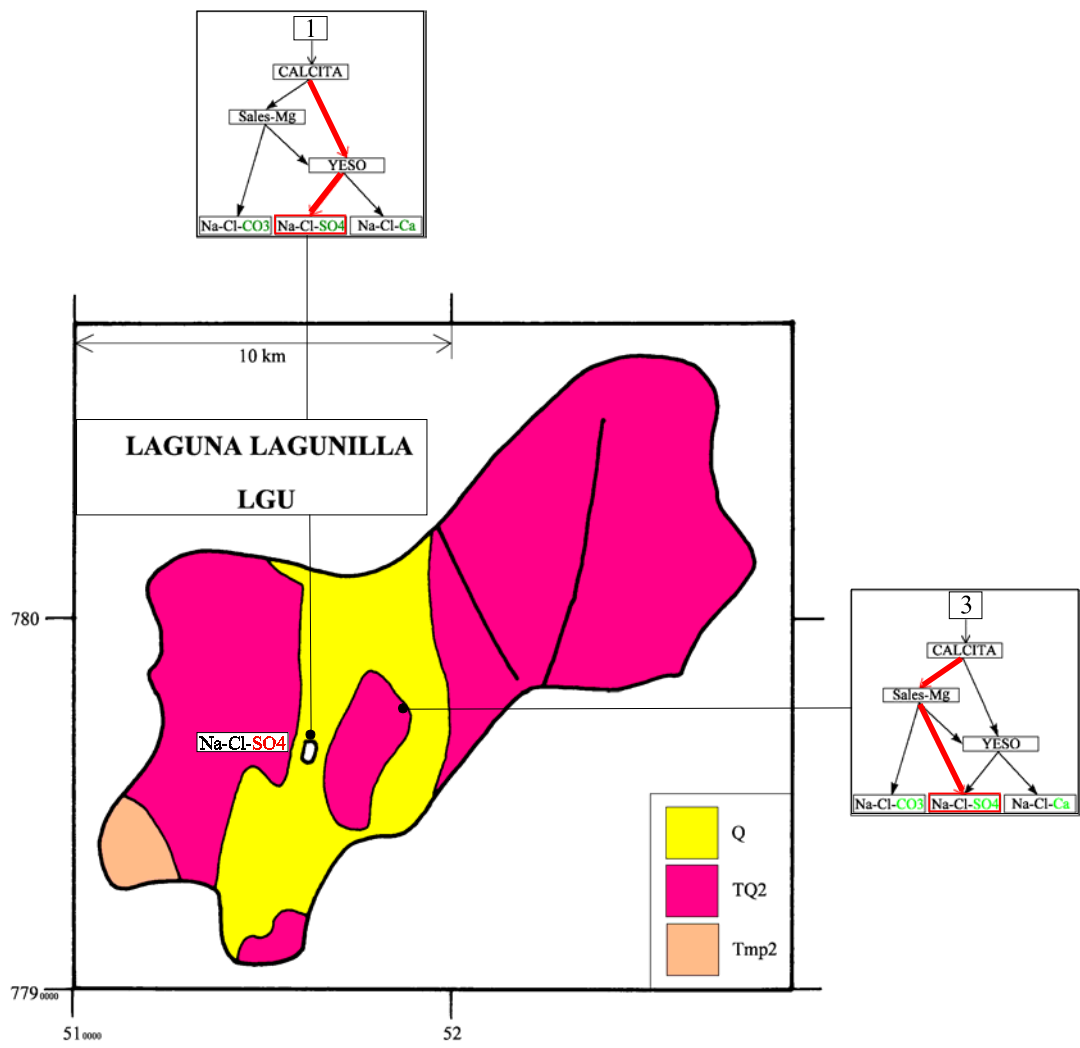
MAPA GEOLOGICO
Y
VIAS EVOLUTIVAS

LGU

Q : *Cuaternario*. Sedimentos fluviales, lacustres, glaciales, eólicos aluviales, coluviales y laháricos.

TQ2 : *Plioceno - Pleistoceno*. Coladas, tobas y brechas andesíticas y basálticas con intercalaciones de sedimentitas detríticas.

Tmp2 : *Mioceno - Plioceno*. Ignimbritas riolíticas y riodacíticas con intercalaciones sedimentarias.



SALAR DEL HUASCO

Introducción

La cuenca del salar del Huasco se encuentra en la Primera Región, entre la cuenca del salar de Pintados en la pampa del Tamarugal y la cuenca del salar de Empexa en el Altiplano boliviano. Sus principales características morfológicas y climatológicas son:

- altura: 3778 m
- superficie de la cuenca: 1572 km²
- superficie del salar: 51 km²
- superficie de las lagunas: 2 - 3 km²
- precipitaciones: 150 mm/año
- evaporación potencial: 1260 mm/año
- temperatura media: 5°C

La mayor parte de la superficie del salar está constituida de limos salinos y costras salinas. Las lagunas superficiales son de extensión variable y de poca profundidad (unos decímetros). El balance hídrico del salar ha sido estimado por Grilli y Vidal (1986). La hidrogeología de la cuenca de drenaje ha sido estudiada para DGA por la agencia japonesa JICA (1995).

Aportes de agua.

Geográficamente se puede distinguir dos "anillos" de aporte. En lo alto de la cuenca, a distancias comprendidas entre 10 y 30 kilómetros del salar, se encuentran varios manantiales y ríos con caudales de unos l/s hasta 120 l/s (río Collacagua en HCO-5; según DGA, Balance Hídrico de Chile, 1987). En época seca ninguno de estos aportes llega hasta el salar pues todos se infiltran en las formaciones superficiales. El segundo "anillo" consiste en vertientes fluyentes al borde mismo del salar. Hay tres vertientes principales (HCO-1, 11 y 12) que alimentan las lagunas superficiales. Disponemos también de dos aguas de napa subterránea: HCO-6 (pozo JICA) a 6 m de profundidad, y HCO-9 a 50 cm de profundidad.

La composición química de los aportes está representada en diagramas triangulares (Fig. 1). En el triángulo de los aniones se observa tres tipos de aguas: un grupo carbonatado (HCO-1, 2, 3, 4, 5, 8, 12), un grupo sulfatado (HCO-7, 9, 10, 11) y el agua de la napa subterránea HCO-6 que presenta una composición de tendencia carbonatada clorurada. En el triángulo catiónico Na - Ca+Mg - K+Li se nota también tres tipos de aguas de aporte que se diferencian por su contenido relativo entre el sodio y los alcalino-terrosos Ca + Mg. La napa subterránea HCO-6 contiene mayormente Na. El siguiente grupo consiste en aguas con Na ~ Ca+Mg (HCO-1, 2, 4, 5, 9, 11, 12). El tercer grupo está representado por aguas con concentraciones dominantes en Ca + Mg (HCO-3, 7, 8, 10). Los tres grupos aniónicos de aguas no corresponden a los tres tipos catiónicos.

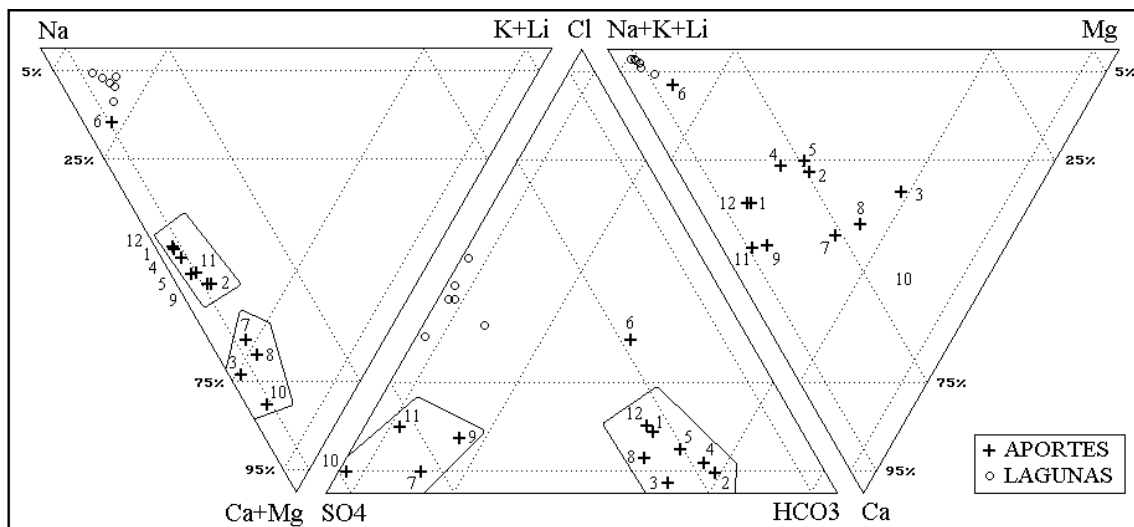


Fig.1: Composicion de aguas y salmueras del salar del Huasco.

En el siguiente cuadro se detallan las diversas combinaciones que muestran cinco grupos de agua de aporte.

	HCO ₃	SO ₄
Na	6	
Na-Ca-Mg	1-2-4-5-12	9-11
Ca-Mg	3-8	7-10

La repartición geográfica de los diversos grupos y su relación con la geología de la cuenca es, a primera vista, un poco confusa. La parte occidental de la cuenca de drenaje está constituida de ignimbritas riolíticas mientras que en parte oriental predominan las rocas andesíticas. Las andesitas contienen más Ca y Mg que las riolitas. Observamos que efectivamente las aguas 7, 8 y 10, con más proporción de Ca y Mg, provienen de terrenos andesíticos al este de la cuenca. Por otra parte, las aguas 1 y 12, con más Na, salen de ignimbritas riolíticas. Las demás aguas de aporte se distribuyen a lo largo de un eje central norte-sur en sedimentos cuaternarios aluviales y coluviales sin que se pueda relacionarlas con las dos principales formaciones geológicas de la cuenca. Considerando las composiciones de las aguas, se puede suponer que HCO-2, 4, 5, 6 provendrían mayormente de terrenos riolíticos, al oeste de la cuenca, y HCO-3 de terrenos andesíticos al este. Las aguas (HCO-9 y 11) se diferencian de las aguas Na-Ca-Mg / HCO₃, por su proporción más elevada de SO₄, un rasgo más común en lavas y coladas que en ignimbritas.

No se ha detectado ninguna relación equimolar entre componentes mayores en las aguas de aporte, lo que significa que ninguna ha redissuelto antiguas evaporitas. Las sales disueltas en las aguas de aporte provienen de la alteración de rocas volcánicas.

Vías evolutivas.

Las vías evolutivas, representadas junto con el mapa geológico, permiten diferenciar claramente dos grupos principales de aguas de aporte. Las aguas HCO-1, 2, 4, 5, 6, 12 siguen al evaporarse

la vía alcalina carbonatada que llega a salmueras de carbonato de sodio (Na / CO₃-Cl). Esta vía es perfectamente coherente con las ignimbritas riolíticas del oeste de la cuenca. Por otra parte, las aguas HCO-7, 9, 10, 11 siguen la vía evolutiva neutra sulfatada que produce salmueras de sulfato y cloruro de sodio (Na / SO₄-Cl). Es una vía que se encuentra comunamente asociada a rocas volcánicas con algo de azufre, en este caso probablemente con las andesitas del este de la cuenca. Las aguas HCO-3 y 8 siguen la vía alcalina sulfatada, que también llega a salmueras de sulfato de sodio. Los cinco tipos de aguas de aporte se reagrupan entonces en dos grandes familias: las que evolucionan hacia salmueras carbonatadas y las que evolucionan hacia salmueras sulfatadas.

Calidad de agua

La calidad de las aguas de aporte es buena a regular. El arsénico y el boro constituyen, como de costumbre, los factores limitantes. Dos aguas sobrepasan el límite de potabilidad en As: HCO-5 (1,6 veces) y HCO-11 (3,5 veces), siendo las demás aptas para el consumo humano. El exceso de boro para uso agrícola es notable en HCO-6 (2,7 veces la norma) y HCO-11 (2,3 veces), estando las demás aguas cerca del límite o ligeramente encima.

Química de la laguna

Se sacó un perfil de muestras de salinidad creciente en la laguna principal (HCO-13 hasta 18). Las soluciones son del tipo Na / SO₄-Cl (Fig. 1) en buen acuerdo con el agua de la vertiente HCO-11, y también con todas las aguas de aporte del este de la cuenca, pero en desacuerdo con las aguas de las vertientes HCO-1 y 12, y con las del norte, que deberían producir salmueras de carbonato de sodio. La salinidad máxima de la laguna es de 113 g/l (HCO-18). La salmuera más concentrada (HCO-18) tiene una salinidad de 113 g/l y se encuentra saturada en calcita, yeso, magnesita, mirabilita (cuando t < 6°C), silicato-Mg, sílice amorfa y ulexita. Hemos simulado la evaporación de cada uno de los aportes hasta llegar a la salinidad máxima de la laguna. La tabla 1 presenta las composiciones de las aguas de aporte evaporadas clasificadas por orden de similitud con la salmuera más concentrada de la laguna (HCO-18). La columna "desviación" da el coeficiente de desviación (prueba adaptada del chi-cuadrado).

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	STD	DESV.
HCO-18	8,67	23,8	32300	37800	457	15,4	32200	7120	116	750	872	113000	
HCO-11E	8,20	11,9	20400	50400	683	26,5	27100	7340	107	571	2790	113000	0,194
HCO-9E	8,18	11,1	13400	58500	647	27,2	25500	7090	73,4	562	3490	113000	0,307
HCO-3E	8,13	6,63	5040	70700	371	27,8	23800	5670	82,4	556	4880	113000	0,516
HCO-8E	7,77	10,1	10300	58700	1370	27,9	19800	11700	6,85	542	4050	113000	0,799
HCO-10E	7,95	8,81	6010	73000	558	25,9	12500	5560	9,03	497	12000	113000	0,951
HCO-7E	8,04	8,22	4620	71600	521	27,4	17100	8090	3,61	526	7930	113000	0,958
HCO-12E	9,96	437	22300	30600	717	52,4	35700	5390	97,5	0,54	1,88	113000	0,965
HCO-1E	9,98	481	20200	31100	737	54,3	35600	5470	92,8	0,52	1,83	113000	0,981
HCO-6E	10,0	555	25500	23100	646	55,6	37600	4130	96,6	0,46	1,63	113000	1,000
HCO-5E	10,0	571	14900	33400	733	58,0	34700	6300	99,7	0,51	1,78	113000	1,010
HCO-4E	10,1	800	8070	32900	615	64,2	36200	5070	67,8	0,47	1,70	113000	1,140
HCO-2E	10,1	735	5610	36600	684	64,5	32400	9340	54,5	0,49	1,76	113000	1,220

Tabla 1. ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

Se nota primero que las salmueras calculadas se reparten en dos familias muy distintas. Las aguas evaporadas que más se parecen a la salmuera de la laguna son del tipo Na / SO₄-Cl. El agua

evaporada de la vertiente Huascolipe (HCO-11E) es la que mejor se ajusta. Las aguas evaporadas que menos se asemejan son del tipo Na / CO₃-Cl, con muy altas alcalinidades y muy bajos contenido de Ca y Mg (en cursivas). Estos dos tipos muy distintos de salmueras reflejan los dos grupos de aguas de aporte que existen en la cuenca. La evaporación a amplificado las pequeñas diferencias, apenas notorias, de las aguas de aporte.

El agua evaporada que mejor se ajusta presenta sin embargo algunas diferencias. El valor de la alcalinidad no es significativa, puesto que para las salmueras neutras el modelo de evaporación no incluye todos los boratos en la alcalinidad. Más significativas son las discrepancias en Cl, SO₄, Na y sobre todo Mg. La laguna no proviene solamente de la vertiente HCO-11. Las dos vertientes HCO-1 y 12 parecen constituir la alimentación principal de la laguna, pero sus aguas evolucionan hacia salmueras carbonatadas muy distintas de las que efectivamente existen. Por eso hemos simulado la evaporación de varias mezclas de las tres principales vertientes HCO-1, 11 y 12. La mezcla evaporada que más se parece a la salmuera de la laguna corresponde a 42,5% (HCO-1) + 42,5%(HCO-12) + 15%(HCO-11), o sea 85% de aguas de aporte de la vía carbonatada y 15% de aguas de aporte de la vía sulfatada. El resultado de la simulación aparece en la tabla 2.

HCO	18	(1+12+11)E
pH	8,67	8,40
alc	23,8	13,9
Cl	32300	32200
SO4	37800	36200
B	457	586
Si	15,4	24,8
Na	32200	30700
K	7120	8970
Li	116	149
Ca	750 (438)	269
Mg	872	907
Desv.		0,062

Tabla 2. Evaporación de la mezcla de HCO-1, 12 y 11
Alc en meq/l. Otros en mg/l.

La salmuera está sobresaturada con respecto a la calcita y el yeso. El valor de Ca de 438 mg/l puesto entre paréntesis corresponde a la concentración al equilibrio con estos minerales después de haber precipitado el exceso de Ca. Los dos componentes que más discrepan son la sílice y el calcio. Las diatomeas consumen sílice y la ulexita, que remueve Ca en la simulación, generalmente no precipita a partir de superficies de agua libre.

Se nota que 15% de aportes de aguas de vía evolutiva sulfatada son suficientes para cambiar la vía evolutiva de 85% de aportes de vía carbonatada. Si se cortara la alimentación por la vertiente Huasco Lipez (HCO-11), la laguna se volvería probablemente alcalina.

Balance hídrico de la laguna principal.

Puesto que la laguna principal tiene sus aportes bien definidos, se puede estimar un orden de magnitud de su balance hídrico. Se utilizará el cloruro como componente conservativo. La concentración en Cl de los aportes (C_{ap}) es el promedio ponderado del contenido en Cl de las aguas HCO-1 (42,5%), HCO-2 (42,5%) y HCO-11 (15%). La salinidad de la laguna presenta un gradiente continuo desde los aportes hasta el sector más salino. En primera aproximación podemos asumir una salinidad media (C_L) igual al promedio entre la de los aportes y la de la salmuera más concentrada (HCO-18). La altura de evaporación (H_e) debe ser corregida de un factor 0,9 por la salinidad de la laguna. Los parámetros así definidos son:

- $H_e = 1,13 \text{ m/año}$
- $H_p = 0,15 \text{ m/año}$
- $S = 2,5 \times 10^6 \text{ m}^2$
- $C_{ap} = 34 \text{ mg/l}$
- $C_L = 16170 \text{ mg/l}$

Volumen de aportes: $V_{ap} = S(H_e - H_p)/(1 - C_{ap}/C_L) = 2,46 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año} = 78 \text{ l/s}$

Volumen de infiltraciones: $V_i = S(H_e - H_p)/(C_L/C_{ap} - 1) = 5200 \text{ m}^3/\text{año} \approx 0,2 \text{ l/s}$

Las dos vertientes al oeste del salar (HCO-1 y 12) contribuyen con 85% a los aportes o sea 66 l/s y la vertiente Huascolipe (HCO-11) con 15% o sea 12 l/s. La altura de infiltración es de 2 mm/año.

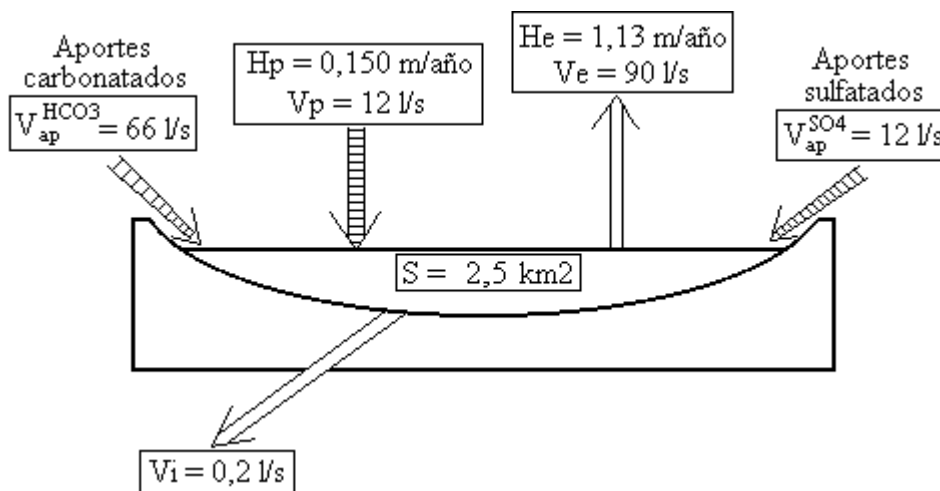


Fig.2 : Balance hídrico de la laguna principal del salar del Huasco.

Conclusiones

El salar del Huasco está alimentado por dos tipos de aguas. Al oeste de la cuenca predominan las ignimbritas cuya lixiviación produce aguas de tipo Na-Ca-Mg / HCO_3 de vía evolutiva alcalina

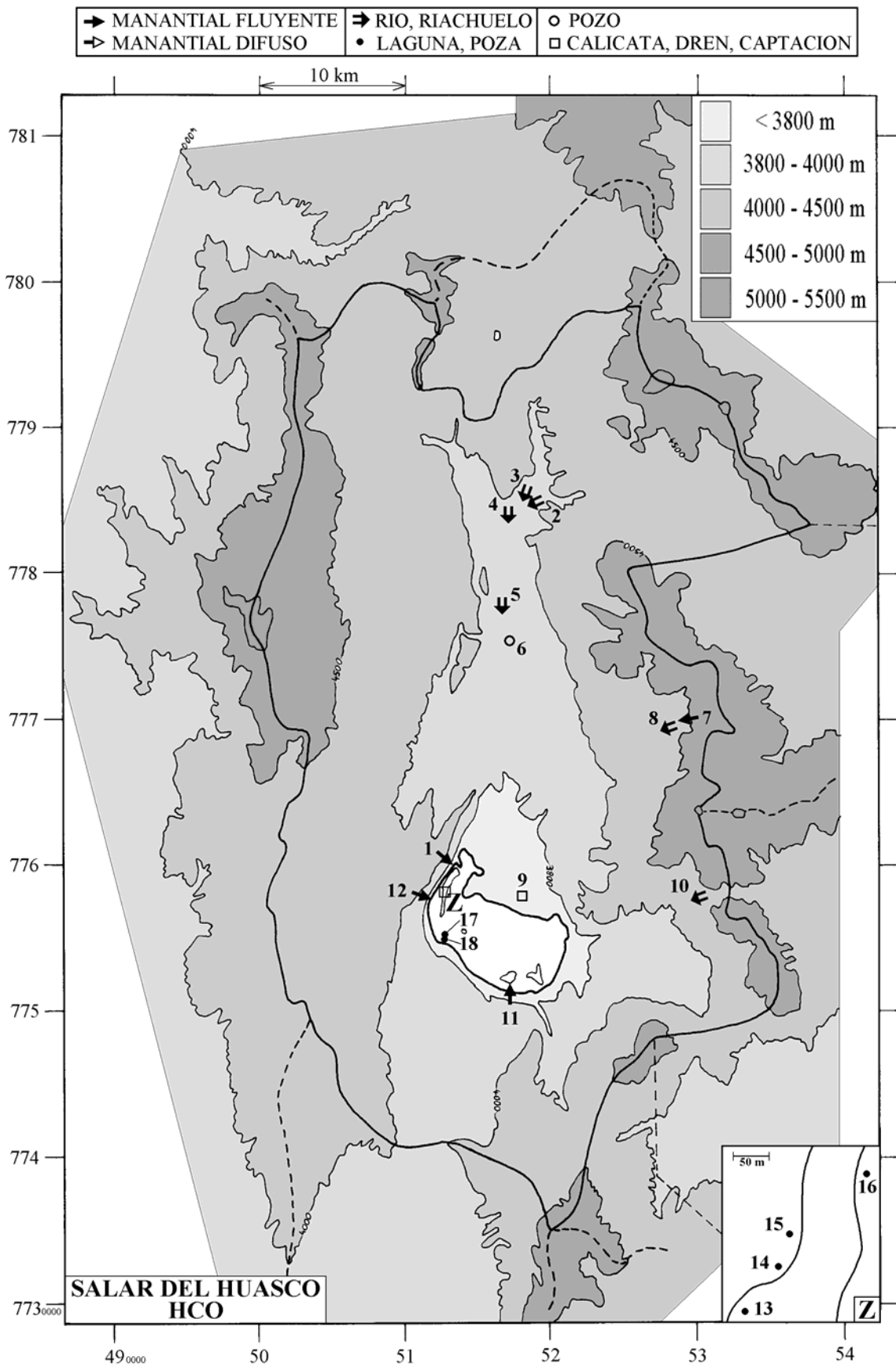
carbonatada. La alteración de las andesitas al este de la cuenca produce aguas de tipo Ca-Mg / SO₄-(HCO₃) de vía evolutiva alcalina sulfatada o neutra sulfatada. No se nota ninguna influencia de evaporitas antiguas en la composición de las aguas de aporte. Las sales disueltas provienen de la alteración de las rocas volcánicas de la cuenca de drenaje. En general estas aguas son de calidad aceptable para el consumo humano y para el riego, siendo los principales contaminantes arsénico y boro. Sin embargo, se podría fácilmente disminuir el exceso mezclando con aguas de menor contenido. Las salmueras de la laguna central son del tipo Na / SO₄-Cl. Las infiltraciones son despreciables para el balance hídrico. Su composición proviene de la mezcla de 85% de aguas de aporte carbonatadas por el oeste del salar y 15% de aguas sulfatadas por el sur del salar. Ligeras modificaciones de esas proporciones llevan a grandes diferencias en la composición de la laguna. Si se cortara el aporte sulfatado por la vertiente sur (Huasco-Lipez), la laguna podría cambiar de quimismo y volverse muy alcalina, con efectos negativos sobre la flora y fauna. El salar del Huasco es un salar frágil. Considerando esta fragilidad, el manejo de sus recursos hídricos debe hacerse cuidadosamente.

Referencias y estudios anteriores

CORFO 1981. Informe prospección preliminar salar Huasco. Corporación de Fomento de la Producción, Comité Sales Mixtas, Informe CSM 81/11, 19p.

Grilli, A. y Vidal, F. 1986. Evaporación desde salares: metodología para evaluar los recursos hídricos renovables. Aplicación a las regiones I y II. Dirección General de Aguas, Departamento de Hidrología, Publicación Interna SDEH 86/4, 19p.

Niemeyer, H. 1964. Estudio de desviación del río Piga. Revista Chilena de Ingeniería, n° 306, 4-15.



**SALAR DEL HUASCO
HCO**

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
HCO-1	29/08/96	12 ^H 00	513133	7759909	3782	Manantial corriente
HCO-2	07/09/96	16 ^H 10	518763	7785296	3995	Río Piga
HCO-3	07/09/96	16 ^H 20	518820	7785385	4000	Río Collacagua antes Piga
HCO-4	07/09/96	16 ^H 45	517529	7783785	3900	Río Batea (estación aforo DGA)
HCO-5	07/09/96	17 ^H 20	516449	7777514	3880	Río Collacagua en Peña Blanca
HCO-6	08/09/96	11 ^H 40	516889	7775789	3870	Napa (pozo JICA)
HCO-7	08/09/96	12 ^H 00	529080	7769659	4400	Manantial corriente Sililica Alto
HCO-8	08/09/96	13 ^H 40	527891	7768666	4210	Río Sililica Bajo
HCO-9	08/09/96	15 ^H 25	518409	7757739	3780	Napa (poza Ermitaño 2)
HCO-10	08/09/96	16 ^H 25	529792	7757494	4130	Río La Rinconada
HCO-11	08/09/96	17 ^H 15	517082	7751582	3785	Manantial corriente Huascolipe
HCO-12	08/09/96	17 ^H 55	511755	7757609	3782	Manantial corriente Ermitaño 1
HCO-13	10/09/96	10 ^H 15	512542	7758157	3778	Laguna
HCO-14	10/09/96	10 ^H 30	512588	7758220	3778	Poza de preconcentración
HCO-15	10/09/96	15 ^H 45	512595	7758259	3778	Poza de preconcentración`
HCO-16	10/09/96	16 ^H 00	512680	7758302	3778	Poza de preconcentración
HCO-17	10/09/96	16 ^H 50	512577	7754613	3778	Laguna
HCO-18	10/09/96	17 ^H 05	512577	7754613	3778	Laguna

**SALAR DEL HUASCO
HCO**

NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
HCO-1	575,0	15,1	4,2	1,000	7,65	3,41	29,1	0,093	0,0589	83,4	nd	1,39	20,2	0,004	70,8	7,86	0,133	42,1	7,80
HCO-2	275,0	12	8,2	1,000	8,14	2,42	5,15	0,020	0,0103	33,8	nd	0,627	28,8	0,027	30,6	8,56	0,050	18,5	10,4
HCO-3	911,0	12,7	7,7	1,000	7,91	7,95	9,55	0,051	0,0090	184	nd	0,703	25,1	0,031	67,2	10,8	0,156	79,0	61,5
HCO-4	328,0	12,1	8,8	1,000	8,25	2,70	9,09	0,037	0,0089	41,3	nd	0,692	28,3	0,026	44,4	5,71	0,076	20,9	10,1
HCO-5	618,0	11,5	7,7	1,000	8,84	4,90	26,6	0,058	0,0425	93,1	nd	1,31	28,0	0,079	81,0	11,2	0,178	39,5	24,8
HCO-6	609,0	10	0,5	1,000	7,84	2,85	81,7	0,209	0,162	73,8	0,012	2,06	3,84	nd	122	13,2	0,309	11,0	7,36
HCO-7	204,0	8,5	0,5	1,000	6,59	0,353	3,55	0,032	0,0044	81,3	nd	0,400	26,2	0,001	13,2	6,22	0,003	18,1	6,15
HCO-8	105,0	15,2	7,2	1,000	9,15	0,653	3,12	0,029	0,0037	18,1	nd	0,519	19,0	0,003	6,07	3,56	0,002	9,10	4,16
HCO-9	395,0	7	0,5	1,000	7,09	0,972	20,4	0,058	0,0331	156	0,781	0,984	38,1	0,010	45,3	10,8	0,112	42,9	5,37
HCO-10	679,0	7,2	5,5	1,000	7,43	0,152	13,8	0,051	0,0033	373	0,260	1,29	19,9	0,0002	28,8	12,8	0,021	84,2	27,9
HCO-11	852,0	11,1	5,0	1,000	7,01	0,681	50,8	0,078	0,0145	361	0,639	1,71	30,0	0,175	100	18,3	0,266	88,6	7,05
HCO-12	527,0	14	4,2	1,000	7,60	3,34	32,5	0,101	0,0567	85,8	nd	1,15	20,2	0,006	72,7	7,86	0,142	42,5	7,46
HCO-13	26500	4,9	6,5	1,017	8,87	7,17	4970	6,21	0,613	8340	0,136	85,0	13,3	6,27	6280	1020	17,8	162	169
HCO-14	53500	1,7	na	1,034	9,21	11,4	7880	10,9	0,832	18900	1,79	136	13,0	11,4	12900	1680	28,4	278	277
HCO-15	14100	18,1	11	1,010	9,03	6,20	2850	3,74	0,453	4670	0,081	47,3	12,8	3,54	3450	633	10,2	117	102
HCO-16	3500	18,1	9,3	1,002	9,01	3,98	444	0,641	0,171	794	0,149	9,25	13,0	0,506	612	98,9	1,62	37,6	25,5
HCO-17	41500	13,7	6,0	1,029	8,34	9,29	8730	12,2	0,735	13000	0,029	152	16,8	12,4	9680	1870	32,5	441	275
HCO-18	109400	13,3	2,9	1,086	8,67	23,8	32300	37,5	1,14	37800	0,068	457	15,4	47,0	32200	7120	116	750	872

T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l.

CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

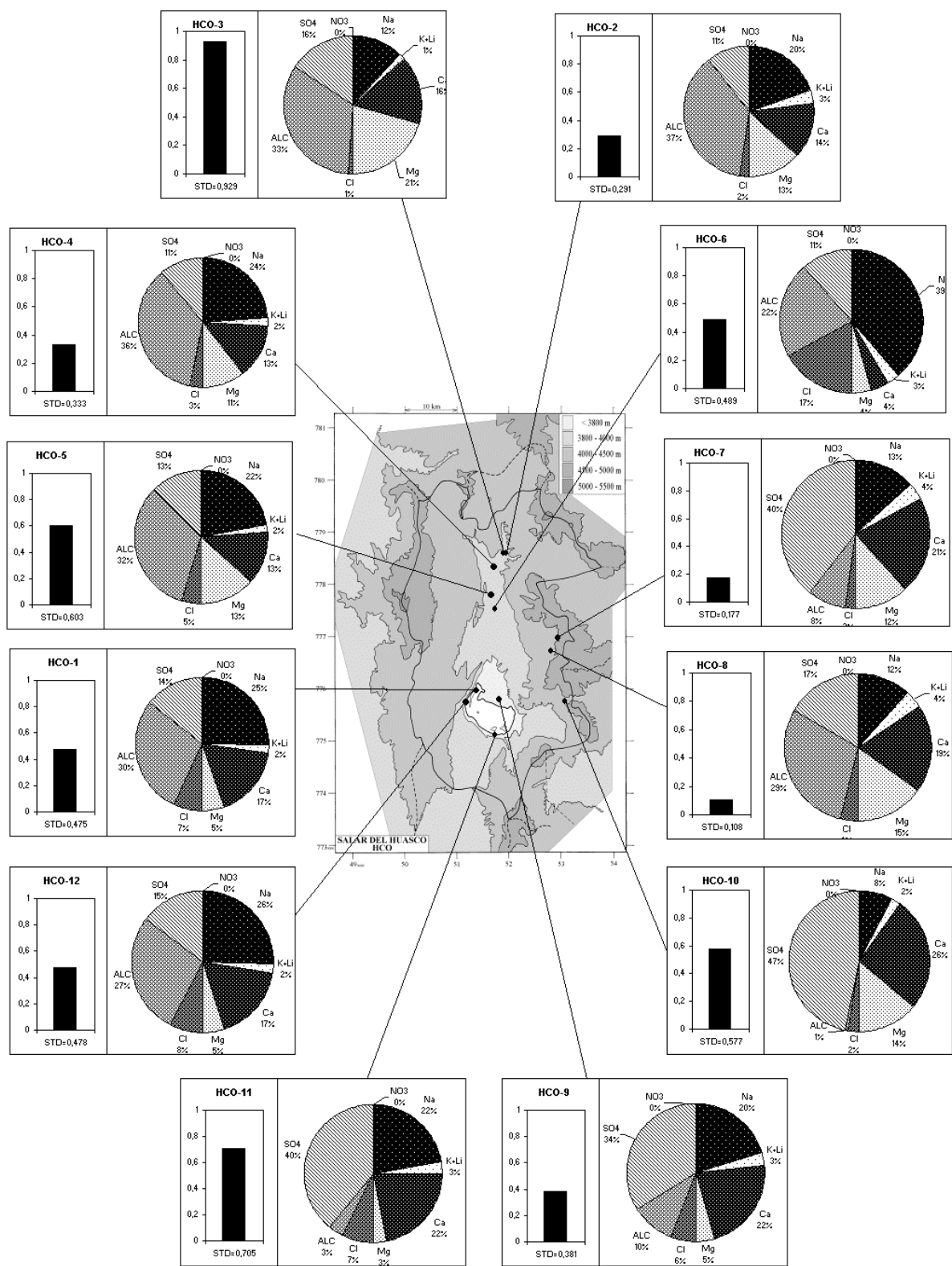
**SALAR DEL HUASCO
HCO**

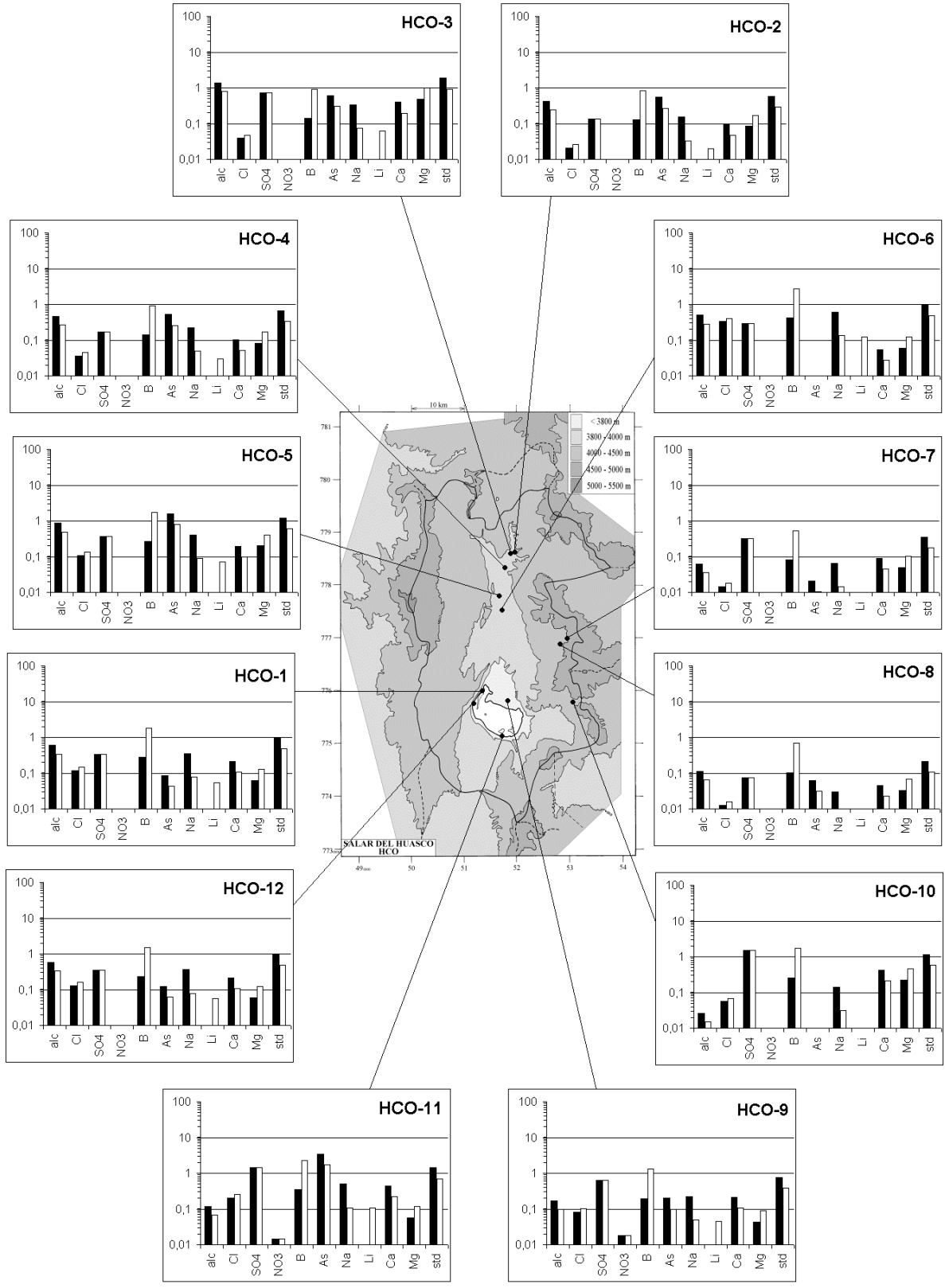
NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF. %
HCO-1	474,6	206	0,72	7,9	6,042	5,967	1,2
HCO-2	291,4	144	1,20	1,9	3,336	3,269	2,0
HCO-3	929,1	475	4,80	9,7	12,22	12,06	1,3
HCO-4	332,6	160	1,80	1,6	3,957	3,816	3,6
HCO-5	603,1	264	14,6	0,66	7,843	7,588	3,3
HCO-6	489,3	172	0,60	4,4	6,846	6,689	2,3
HCO-7	177,1	21,5	0	11	2,139	2,147	0,4
HCO-8	108,3	28,7	2,10	0,04	1,151	1,119	2,8
HCO-9	381,1	59,1	0,06	9,7	4,844	4,821	0,5
HCO-10	577,2	9,03	0	0,66	8,081	8,326	3,0
HCO-11	705,0	41,4	0,06	7,0	9,856	9,641	2,2
HCO-12	477,9	202	0,66	8,8	6,116	6,044	1,2
HCO-13	21492	234	21,5	0,44	323,6	321,0	0,8
HCO-14	42750	188	44,1	0,16	643,8	627,4	2,6
HCO-15	12261	188	30,2	0,20	181,9	183,6	0,9
HCO-16	2278	183	17,5	0,25	33,34	33,02	1,0
HCO-17	34746	379	18,4	1,8	518,2	525,3	1,4
HCO-18	113093	306	58,0	0,57	1708	1721	0,8

NUMERO	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
HCO-6	-12,75	-100
HCO-7	-13,79	-100
HCO-11	-12,74	-100
HCO-12	-12,07	-100

Análisis de oxígeno-18
y deuterio

Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.
S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l)
DIF.% = diferencia en %





MAPA GEOLOGICO

Y

VIAS EVOLUTIVAS

HCO

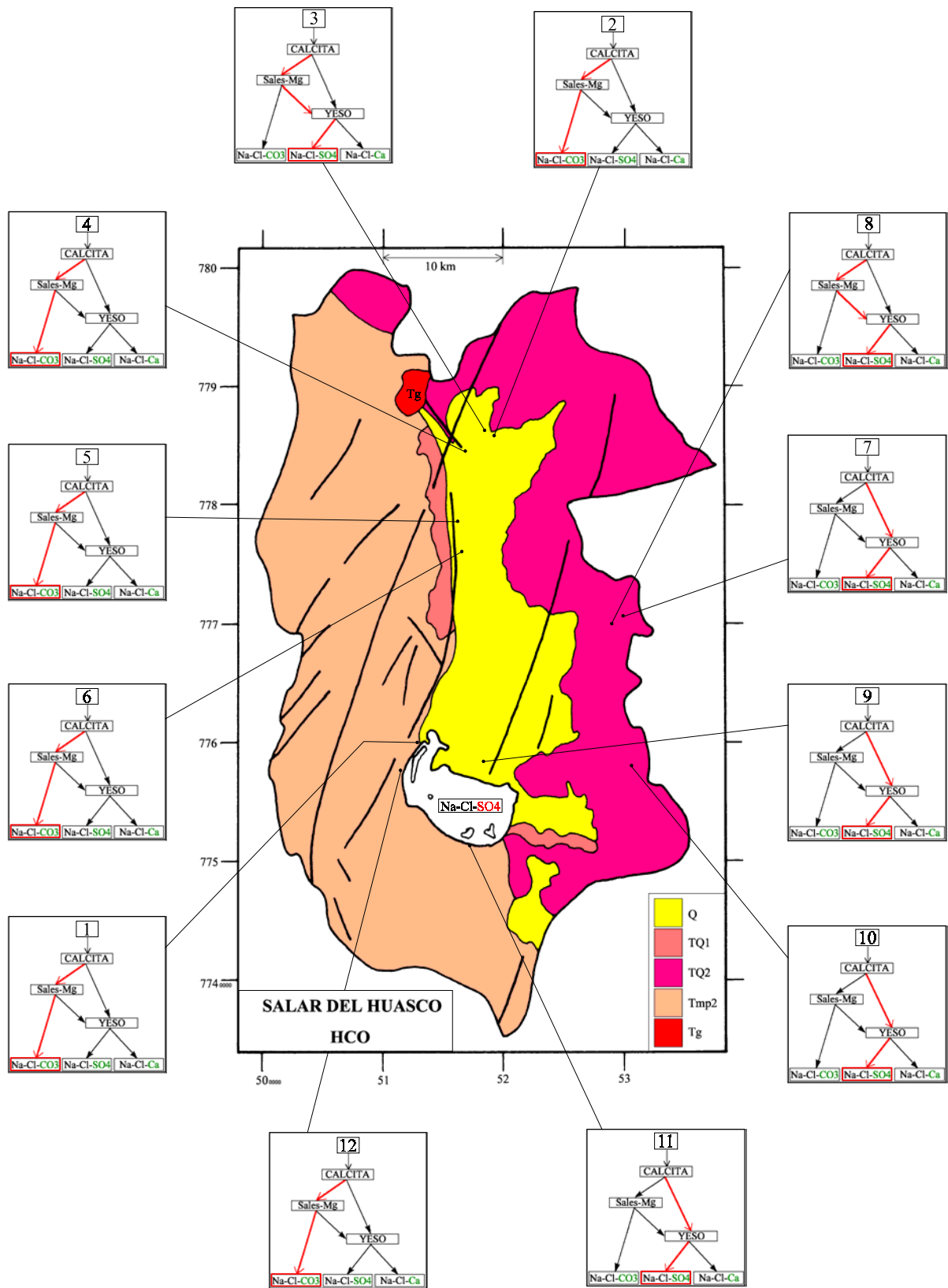
Q : *Cuaternario*. Sedimentos fluviales, lacustres, glaciales, eólicos aluviales, coluviales y laháricos.

TQ1 : *Plioceno - Pleistoceno*. Ignimbritas dacíticas, tobas e intercalaciones de sedimentitas clásticas continentales.

TQ2 : *Plioceno - Pleistoceno*. Coladas, tobas y brechas andesíticas y basálticas con intercalaciones de sedimentitas detríticas.

Tmp2 : *Mioceno - Plioceno*. Ignimbritas riolíticas y riódacíticas con intercalaciones sedimentarias.

Tg : *Terciario*. Rocas plutónicas e hipabisales.



SALAR DE COPOSA

Introducción

La cuenca del salar de Coposa se encuentra en la Primera Región entre la cuenca del salar de Pintados en el Valle Central y las cuencas de los salares de Empexa y de la Laguna en el Altiplano Boliviano. Sus principales características morfométricas y climatológicas son:

- altura: 3730 m
- superficie de la cuenca: 1116 km²
- superficie del salar: 85 km²
- superficies de las lagunas: 3 - 7 km²
- precipitaciones: 150 mm/año
- evaporación potencial: 1300 mm/año
- temperatura media: 5 °C

El salar esta constituido por un núcleo clorurado rodeado por limos salinos y arenosos. La laguna principal (Jachu Coposa) tiene una extensión muy variable según la época del año. A unos 50 cm por debajo de la superficie del salar se encuentra una napa de salmuera. El primer estudio hidrogeológico fue realizado por Henriquez y Montti (1976). El proyecto minero Collahuasi ha generado numerosos estudios geológicos, hidrogeológicos, geofísicos e hidroquímicos, todos de difusión reservada, del salar de Coposa y de su cuenca.

Aportes de agua

Los aportes de agua provienen esencialmente del sur y del oeste de la cuenca. Hemos sacado 6 aguas de vertientes y 8 aguas de napas subterráneas. La composición química de los aportes está representada en diagramas triangulares (Fig.1).

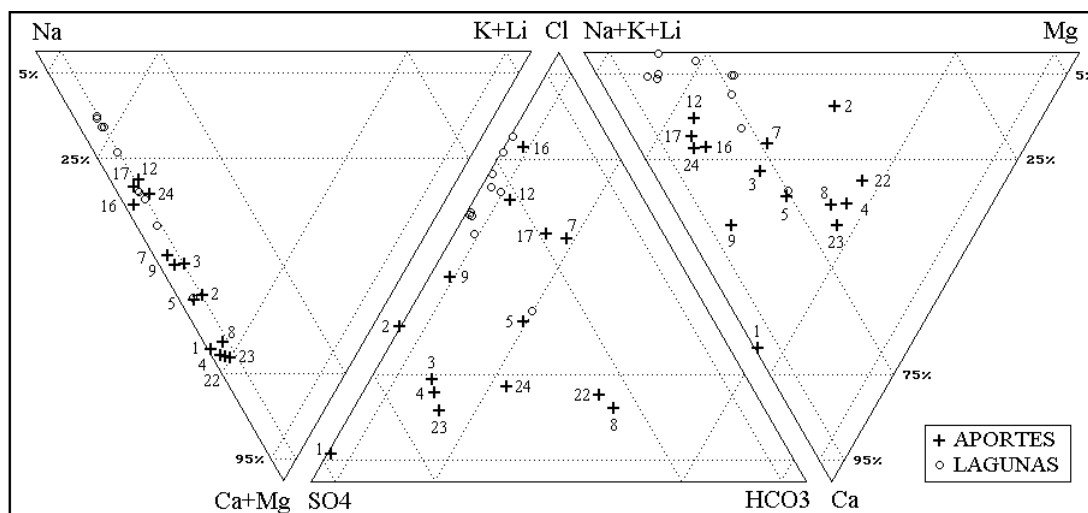


Fig.1: Composición de aguas y salmueras del salar de Coposa.

En los triángulos [Na+K+Li - Ca - Mg] y [Cl - SO₄ - HCO₃] los puntos están esparcidos de manera aparentemente bien irregular. En el triángulo [Na - K+Li - Ca+Mg] aparecen cuatro grupos de puntos que se distribuyen de manera bien simétrica entre los vértices Na y Ca+Mg. El recuento de la distribución de los puntos, asociado a otros parámetros como salinidad, temperatura, relación con la geología de la cuenca de drenaje y vías evolutivas, solamente permitió vislumbrar algunas tendencias generales sobre la composición química de los aportes. Entre la gran variedad de composiciones observadas, se puede definir dos polos: un grupo de aguas de tipo Ca-Mg / SO₄-HCO₃, representadas por (COP-4, 8, 22 y 23), al sur de la cuenca, y un grupo de tendencia Na / Cl representado por (COP-12, 16 y 17), al noroeste de la cuenca.

Además de estos dos grupos, hay aguas de aportes de composición muy particulares. COP-1 es un agua que contiene casi exclusivamente Na (15%), Ca (35%) y SO₄ (47%). Su composición proviene obviamente de la redisolución de sales antiguas: sulfatos de sodio y calcio. Se puede observar en los diagramas triangulares que COP-23, aunque netamente distinta del agua sulfatada COP-1, es el agua del sector sur que más se aproxima a COP-1. También se puede notar que COP-4 tiene una composición porcentual muy parecida a la de COP-23, a pesar de ser 3,5 veces mas concentrada y estar a 13 km de distancia. Eso podría significar que COP-4 también recibe alguna influencia de una solución parecida a COP-1. El mecanismo de salinización de aguas diluidas por disolución de sulfatos antiguos podría ocurrir en otras partes de la cuenca. COP-2 es un agua termal (53 °C), ácida (pH = 2,28) y salina (STD = 6,7 g/l) de tipo Na-Mg / SO₄. El agua mas diluida (COP-3, STD = 119 mg/l) se encuentra río abajo de la vertiente termal salada COP-2, sin evidenciar influencia de ella. El agua de la napa del extremo sur de la cuenca (COP-24) se acerca al tipo Na / SO₄-HCO₃. Esta gran variedad de composiciones sugiere la existencia de varias napas, en formaciones geológicas distintas, que se mezclan antes de descargarse en el salar. Fijandose en la salinidad de los aportes, se nota una división nítida entre 4 aguas diluidas (COP-3, 24, 8 y 23) con salinidades entre 119 y 496 mg/l y todas las demás aguas netamente mas saladas, entre 905 y 9220 mg/l.

La figura 2 muestra la relación entre Cl y Na en todas las aguas del salar de Coposa. Las aguas de aporte (COP-5, 17, 16, 9, 7, 2 y 12) están sobre la recta de equimolaridad Na = Cl, lo que sugiere una redisolución de cloruro de sodio por estas aguas, o una influencia de la cuña salina del salar. Puesto que la vertiente COP-12 surge adentro del salar, su salinidad proviene probablemente de las mismas salmueras de Coposa. Entonces, además de COP-1 que redisuelve antiguos sulfatos, un cierto número de aguas de aporte reflejan por su alta salinidad y su contenido equimolar en Na y Cl la redisolución de antiguas evaporitas por debajo de las formaciones volcánicas de la cuenca de drenaje.

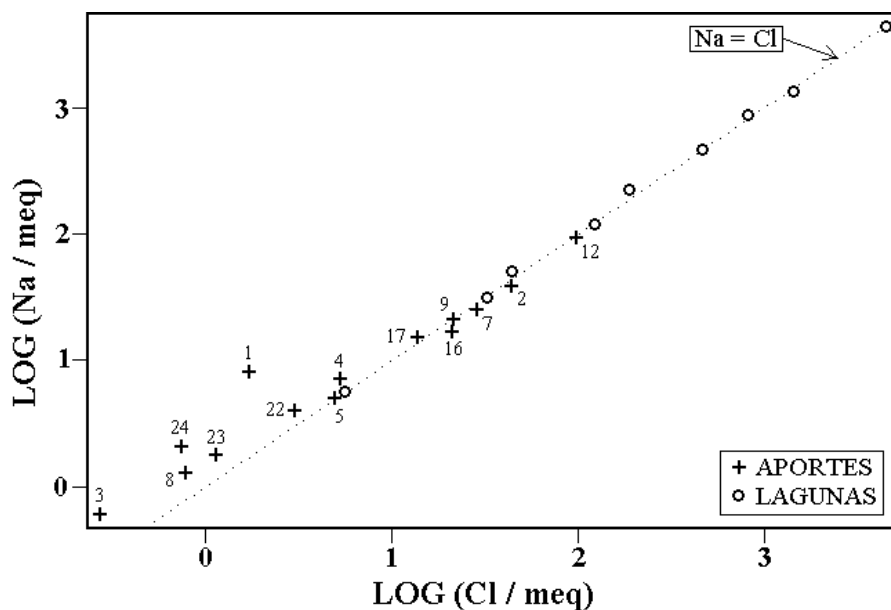


Fig. 2. Relación entre Cl y Na en meq/l en las aguas del salar de Coposa.

Vías evolutivas

Las aguas de aporte del salar de Coposa siguen al evaporarse tres vías evolutivas. La mayor parte de las aguas siguen la vía neutra sulfatada. Cuatro aguas siguen la vía alcalina sulfatada y una la vía neutra calcica:

vía alcalina sulfatada: 7 - 8 - 22 - 24

vía neutra sulfatada: 1 - 3 - 4 - 5 - 9 - 12 - 17 - 23

vía neutra calcica: 16

Se nota que las cuatro aguas de vía alcalina sulfatada se encuentran en el sur de la cuenca. En el mismo sector, el agua COP-1 no sigue esta vía por tener una composición muy especial (Na-Ca / SO₄). Como ya lo hemos dicho, podría tener influencia sobre COP-23, río abajo en el mismo sector, que tampoco sigue la vía alcalina sulfatada. La vía neutra sulfatada caracteriza sobre todo las aguas del sector occidental de la cuenca, las que alimentan directamente el salar. COP-16 es el agua de aporte ubicada más al norte en nuestro estudio que sigue la vía evolutiva neutra calcica. No se ha encontrado esta vía en ninguna de las cuencas más al norte (Huasco, Surire, Lauca, Cotacotani y Chungará). La relación con la geología de la cuenca no aparece claramente. Las antiguas evaporitas que contribuyen a lo esencial de la salinidad de los aportes no aparecen en la geología. Las evaporitas sulfatadas que se manifiestan en COP-1 parecen provenir de la Formación Collahuasi (andesitas paleozoicas). Las aguas de vía evolutiva neutra sulfatada, y el agua de evolución neutra calcica, provienen de la ignimbrita Huasco. En el salar del Huasco, esta misma ignimbrita (Tmp2) contiene aguas de vía evolutiva alcalina carbonatada, lo que corresponde perfectamente a este tipo de litología. Sin embargo, Vergara y Thomas (1984) señalan la presencia de niveles sedimentarios lacustres a la base de la formación que podrían explicar las vías evolutivas de tendencia más neutral observadas en Coposa. Las vías neutrales, y en particular la neutra calcica, están más relacionadas a terrenos sedimentarios.

Calidad de agua

Las aguas de mejor calidad se encuentran en el sur de la cuenca, con la excepción notable de COP-1. La vertiente principal de la laguna Jachu Coposa (COP-5) presenta un alto contenido de boro para uso de riego y un ligero exceso en arsénico para uso doméstico.

Química de las lagunas y de la salmuera subterránea.

Hemos recogido dos perfiles de aguas de concentración creciente: uno en la laguna principal (Jachu Coposa, COP-5, 15, 13, 14, 6, 10) y el otro, en una laguna más al norte cerca de la orilla occidental (COP-17, 18, 19, 20, 21). Además se sacó una muestra de la napa subterránea del salar (COP-11). Hemos simulado la evaporación de cada una de las aguas de aporte hasta llegar a la salinidad máxima de las lagunas y de la napa subterránea (Tabla.1). La columna "desviación" da el coeficiente de desviación (prueba adaptada del chi-cuadrado). Para poder comparar las composiciones calculadas *al equilibrio termodinámico* con las composiciones de las soluciones reales, se debe primero llevar las soluciones reales al equilibrio con los minerales que presentan sobresaturación. Las composiciones al equilibrio son COP-6eq y 21eq. En tanto, COP-11 no presenta sobresaturación marcada. Se puede observar que las concentraciones de algunos componentes de COP-21eq son más elevadas que en la solución natural COP-21. Eso se debe a que el principal mineral que precipita a partir de COP-21 para producir COP-21eq es la mirabilita: $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$. La cristalización de una molécula de este mineral consume 10 moléculas de agua, lo que concentra la solución residual.

El agua diluida cuya evaporación produce la salmuera más parecida a la de la laguna Jachu Coposa (COP-6) es el agua de la principal vertiente (COP-5) que alimenta la laguna. Sigue el agua de la napa (COP-7), cerca a la laguna, lo que sugiere que esta napa es la mezcla de la cuña salina del salar con aguas diluidas de aporte, por tanto su salinidad no se debe a la redisolución de evaporitas antiguas. En tercera posición tenemos el agua de napa (COP-9) que proviene de un sector diametralmente opuesto del salar. Las aguas cuya composición evaporada más discrepan con la laguna, son las más alejadas del salar (COP-1, 24, 23), en el sector sur.

Las mismas observaciones valen para la napa subterránea del salar y para el sistema lagunar (COP-18 a 21). Por su parte, COP-11 se parece más a la vecina vertiente evaporada (COP-12e) y a las napas evaporadas (COP-7e) y (COP-9e). El punto más sorprendente es la excelente similitud entre la salmuera más concentrada que se ha encontrado en el salar (COP-21) y el agua de napa evaporada (COP-9e) (que también se parece a la laguna Jachu Coposa y a la napa del salar). Hay que bien recalcar que no existe ningún aporte superficial por el norte y noreste del salar. No aparece ninguna lagunita que pudiera sugerir una descarga de napa en este sector del salar. Al contrario, es evidente en terreno que el sistema lagunar (COP-18 a 21) está alimentado por un conjunto de vertientes, siendo COP-17 la principal. Además, se puede notar en los diagramas triangulares, que COP-9 y COP-17 tienen concentraciones porcentuales bien distintas. No son las mismas aguas. La geología de los respectivos sectores de la cuenca también es diferente. La explicación más probable de esta similitud entre las salmueras del salar y el agua evaporada COP-9e del extremo noreste de la cuenca, es que COP-9 tiene una fuerte influencia de las salmueras mismas del salar. Estando COP-9 a unos 4 km del borde del salar, casi al límite entre las cuencas de Coposa y de Empexa, es poco probable que se trate de una cuña salina

relacionada con un cuerpo estático de salmuera (como COP-7). Más bien se debe tratar de la salmuera del salar moviéndose hacia la cuenca de Empexa y mezclándose con las aguas diluidas del noreste de la cuenca. La cuenca del salar de Coposa estaría hidrogeológicamente abierta hacia la cuenca del salar de Empexa.

Balance hídrico de la laguna Jachu Coposa

La laguna Jachu Coposa es bien homogénea (ver COP-6 y COP-10) y tiene su principal aporte bien definido (COP-5). Se puede entonces estimar su balance hídrico. El parámetro menos preciso es la superficie promedia de la laguna. La altura de evaporación debe ser reducida en un factor 0,95 para tomar en cuenta la salinidad de la laguna. Se utiliza el cloruro como componente conservativo. El litio da resultados muy similares. Los parámetros así definidos son:

- $H_c = 1,24 \text{ m/año}$
- $H_p = 0,15 \text{ m/año}$
- $S = 5 \times 10^6 \text{ m}^2$
- $C_{ap} = 174 \text{ mg/l}$
- $C_L = 16400 \text{ mg/l}$

Volumen de aportes: $V_{ap} = S(H_c - H_p)/(1 - C_{ap}/C_L) = 5,48 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año} = 174 \text{ l/s}$

Volumen de infiltraciones: $V_i = S(H_c - H_p)/(C_L/C_{ap} - 1) = 58000 \text{ m}^3/\text{año} \approx 1,8 \text{ l/s}$

La altura de infiltración es de 11 mm/año.

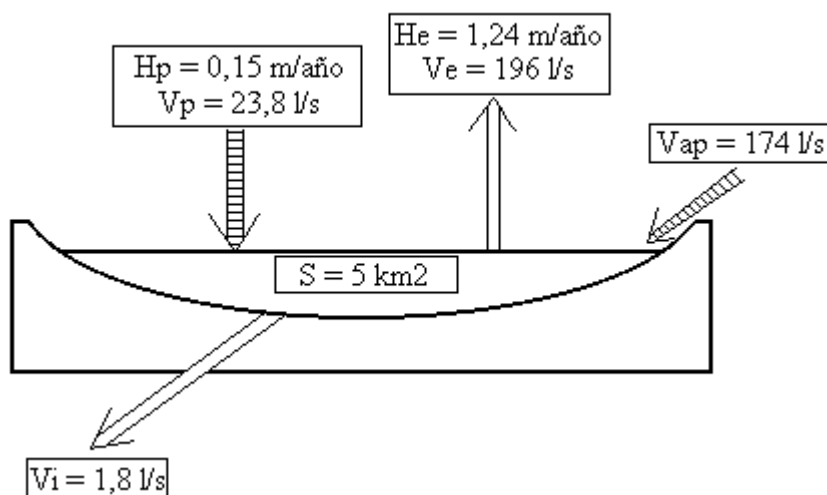


Fig.3 : Balance hídrico de la laguna Jachu Coposa

Balance hídrico del salar

Se puede intentar una estimación a nivel de orden de magnitud del balance hídrico del salar. La napa de salmuera subterránea se encuentra a unos 50 cm de profundidad en sedimentos limosos. La altura de evaporación en estas condiciones se encuentra reducida, muy aproximadamente, al 15% de la evaporación de un agua libre. Además hay que reducir esta altura de un factor 0,9 por la salinidad de la napa. La altura de evaporación es entonces:

$$H = 1,3 \times 0,9 \times 0,15 = 0,175 \text{ m/año}$$

Siendo la superficie seca del salar de 80 km^2 , el volumen evaporado a través de la superficie es:

$$V = 80 \times 106 \times 0,175 = 14 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año} = 444 \text{ l/s}$$

El volumen total evaporado en suelos y lagunas es de $444 + 196 = 640 \text{ l/s}$. Es exactamente el mismo valor que obtuvieron Grilli y Vidal (1986) utilizando la fórmula de Turc para establecer el balance hídrico del salar. Por supuesto, esta concordancia es pura coincidencia pues se trata de un grueso orden de magnitud. Si se aplican los valores de evaporación de napa medidos por Grilli y Vidal (1986) en los limos del salar de Atacama, se encuentra un factor de reducción de la evaporación de 18%, un volumen evaporado de salmuera subterránea de 533 l/s y un volumen total evaporado de 723 l/s . Estos valores llevan a un coeficiente de escurrimiento aproximado de 0,13.

Henriquez y Montti (1976) establecieron un mapa de isoconcentración de la napa del salar. La salinidad de la única salmuera que hemos muestreado (COP-11, 112 g/l) se ajusta bien a este mapa. El promedio de salinidad de la napa es aproximadamente de 60 g/l . Si suponemos que la napa se encuentra en equilibrio dinámico, es decir que todas las sales que entran por los aportes diluidos salen hacia Empexa por el noreste de la cuenca, podemos aplicar la ecuación de conservación de masa:

$$V_{\text{ap}} \times C_{\text{ap}} = V_{\text{exit}} \times C_{\text{napa}}$$

con V_{ap} = volumen de los aportes.

En el caso de una napa subterránea podemos, en primera aproximación, igualarlo al volumen evaporado (444 l/s). C_{ap} es la concentración promedio de un componente conservativo de los aportes (cloruro). Los dos principales aportes superficiales que hemos encontrado (COP-5 y COP-17) tienen una concentración promedio en cloruro de 330 mg/l . C_{napa} corresponde a la mitad de la concentración en cloruro de COP-11 o sea 25000 mg/l . El volumen de salmuera que sale de la cuenca es entonces del orden de 6 l/s . Repetimos que este valor es solamente un grueso orden de magnitud. Sin embargo, se puede afirmar que los volúmenes de salmuera del salar que salen de la cuenca son despreciables, pero no las cantidades de sales, puesto que estas pérdidas determinan las concentraciones de la napa. Ahora bien, hemos visto que al salir de la cuenca, las salmueras se mezclan con aguas diluidas que también deben salir de la cuenca, lo que aumenta el caudal saliente.

Conclusiones.

Las aguas de aporte del salar de Coposa muestran una gran variedad de composición. La mayoría se reparten entre dos polos:

- aguas de tipo Ca-Mg / $\text{SO}_4\text{-HCO}_3$ y de vía evolutiva alcalina sulfatada al sur de la cuenca

- aguas de tipo Na / Cl y de vía evolutiva neutra sulfatada al oeste de la cuenca

Además existen aguas de composición particular: una vertiente ácida y otra conteniendo casi exclusivamente sulfatos de sodio y calcio. Se encontró también en la cuenca de Coposa el agua de vía evolutiva neutra calcica ubicada más al norte en la cordillera andina. No aparece una relación clara con la geología de la cuenca de drenaje.

La composición química de las lagunas superficiales y de la napa subterránea del salar corresponden a las aguas de aporte evaporadas del oeste de la cuenca. Las pérdidas de agua por

evaporación a partir del salar son del orden de 600 a 700 l/s. La salmuera de la napa del salar fluye lentamente afuera de la cuenca, hacia el salar de Empexa. El salar de Coposa no es una cuenca totalmente cerrada.

Referencias y estudios anteriores

Grilli, A. y Vidal, F. 1986. Evaporación desde salares: metodología para evaluar los recursos hídricos renovables. Aplicación a las regiones I y II. Dirección General de Aguas, Departamento de Hidrología, Publicación Interna SDEH 86/4, 19p.

Henríquez H. y Montti S. 1976. Estudio hidrogeológico de los salares Coposa y Michincha. Instituto de Investigaciones Geológicas, Sección de Hidrogeología, 42p.

Montgomery, E.L. and Harshbarger J.W. 1985. Groundwater development from salar basins in the arid andean highlands of northern Chile. IV Congreso Geológico Chileno, Antofagasta, 19-24 Agosto de 1985, Actas, 5, 36-53.

Tabla 1 : Comparación de las aguas de aporte evaporadas con las aguas del salar de Coposa
ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

COP-6

NUMERO	PH	ALC	NA	K	LI	CA	MG	CL	SO4	B	SI	STD	DESV.
COP-6	8,43	6,71	10800	1130	28,7	782	2480	16400	13200	93,0	22,1	45000	
COP-6eq	8,17	2,34	10700	1130	28,7	652	2450	16400	12900	93,0	22,1	45000	
COP-5E	8,14	2,53	9560	1130	22,3	584	3060	14000	15900	116	29,0	45000	0,033
COP-7E	8,16	2,06	11200	884	37,1	641	2550	19700	9510	76,7	28,3	45000	0,035
COP-9E	8,08	1,75	12500	1310	29,2	832	1390	19700	8710	85,7	28,2	45000	0,066
COP-12E	8,10	1,46	12200	1670	33,4	784	1430	19000	9590	49,8	28,7	45000	0,103
COP-17E	8,31	3,14	13200	1220	29,8	311	1220	18200	10100	107	29,0	45000	0,117
COP-22E	8,14	2,85	8620	1170	57,0	510	3310	10000	20400	141	29,5	45000	0,132
COP-8E	8,21	4,13	9260	2050	26,8	500	2400	8750	20700	216	30,1	45000	0,173
COP-4E	8,08	2,48	6830	643	24,4	479	4610	7910	23700	124	29,1	45000	0,200
COP-16E	7,91	1,09	12600	597	19,7	1670	1450	24300	4000	68,8	27,5	45000	0,298
COP-3E	8,21	7,13	8720	1760	21,3	494	2430	6520	21300	443	30,4	45000	0,318
COP-23E	8,10	2,25	6550	1620	5,50	469	4300	6490	24900	101	29,8	45000	0,386
COP-24E	8,53	5,66	12500	2180	15,5	157	536	6900	21500	139	31,3	45000	0,511
COP-1E	8,31	2,80	13800	443	8,22	483	156	4550	24900	89,3	30,9	45000	0,705

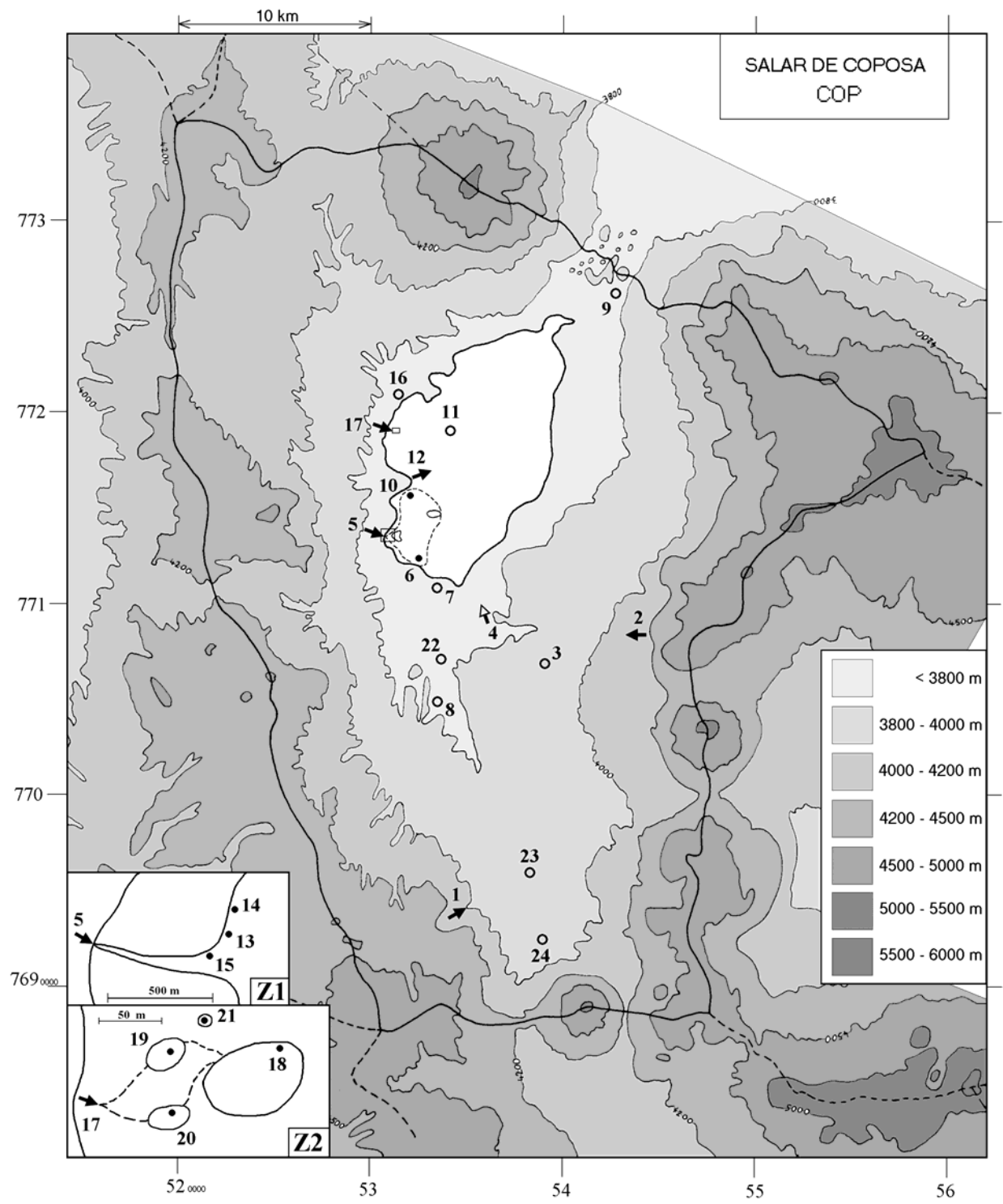
COP-21

NUMERO	PH	ALC	NA	K	LI	CA	MG	CL	SO4	B	SI	STD	DESV.
COP-21	7,50	27,1	102000	9030	251	350	10100	157000	50300	557	9,35	330760	
COP-21eq	6,53	2,59	95800	9710	270	376	10500	169000	27100	598	10,1	317000	
COP-9E	7,43	9,05	91500	11000	246	390	11600	166000	28200	722	6,44	313000	0,028
COP-17E	7,40	8,95	93200	11200	272	514	10900	166000	29300	885	8,33	317000	0,033
COP-12E	7,50	5,64	89000	14600	292	487	12500	166000	31600	436	8,30	317000	0,045
COP-7E	7,38	9,79	79500	7480	314	377	21500	167000	37000	649	7,23	317000	0,082
COP-1E	6,56	3,28	88100	14300	266	515	5040	147000	25200	2020	8,31	292000	0,199
COP-5E	7,28	19,0	56600	11900	234	277	32000	147000	61400	1220	7,35	317000	0,263
COP-24E	6,93	5,67	68300	40700	306	194	9820	136000	46400	1910	11,3	317000	0,349
COP-16E	7,36	7,00	99100	4700	155	1700	11400	191000	4100	542	5,16	315000	0,504
COP-22E	7,26	24,3	41500	13300	645	248	37400	113000	101000	1570	8,41	317000	0,516
COP-8E	6,95	14,0	43800	25100	340	187	30200	111000	94100	2150	9,83	317000	0,546
COP-4E	7,21	22,5	32900	6910	262	204	44500	85000	139000	1340	7,80	317000	0,586
COP-3E	6,53	12,5	39800	21300	259	316	29500	79300	111000	4010	11,7	317000	0,638
COP-23E	7,42	16,4	31800	15200	52	298	40400	61100	162000	955	11,2	317000	0,763

COP-11

NUMERO	PH	ALC	NA	K	LI	CA	MG	CL	SO4	B	SI	STD	DESV.
COP-11	7,52	8,80	31100	3080	89,5	742	4930	50800	20400	101	22,1	112000	0,025
COP-12E	8,06	2,78	31500	4300	86,1	788	3690	48900	21800	129	22,5	112000	0,025
COP-7E	7,95	3,39	28500	2260	94,6	782	6490	50300	22200	196	21,5	112000	0,061
COP-9E	8,05	4,05	32400	3390	75,6	825	3580	50900	19400	222	21,2	112000	0,071
COP-17E	8,11	5,02	33000	3050	74,2	729	3000	45300	25100	267	23,0	112000	0,113
COP-5E	7,95	4,82	24400	2900	57,1	579	7800	35900	38400	297	23,0	112000	0,200
COP-22E	7,96	5,79	21900	2980	145	529	8410	25500	50200	358	24,0	112000	0,316
COP-16E	7,81	2,40	33300	1580	52,1	2330	3840	64100	5590	182	19,6	112000	0,353
COP-8E	8,04	8,56	23600	5200	68,3	542	6080	22200	50900	549	25,3	112000	0,382
COP-1E	8,03	8,20	33800	3740	69,5	650	1320	38500	29900	669	23,2	112000	0,384
COP-4E	7,92	5,33	17400	1630	62,0	492	11700	20100	58600	316	23,3	112000	0,443
COP-24E	8,27	10,2	28700	7960	56,7	570	1830	25200	43600	509	26,3	112000	0,468
COP-3E	7,92	12,5	22200	4500	54,4	544	6200	16600	52900	1050	25,8	112000	0,520
COP-23E	7,94	4,46	16600	4110	14,0	501	10900	16500	61600	258	24,7	112000	0,614

➔ MANANTIAL FLUYENTE	➔ RIO, RIACHUELO	○ POZO
➔ MANANTIAL DIFUSO	• LAGUNA, POZA	□ CALICATA, DREN, CAPTACION



**SALAR DE COPOSA
COP**

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
COP-1	11/04/97	09 ^H 55	534979	7694118	4000	Manantial corriente (CSW-5 Collahuasi)
COP-2	11/04/97	11 ^H 30	543176	7708271	4025	Manantial corriente (CSW-7)
COP-3	11/04/97	12 ^H 20	537930	7706407	3844	Napa (pozo PVC de observación CWE-20)
COP-4	11/04/97	13 ^H 35	535976	7709324	3745	Manantial difuso
COP-5	11/04/97	14 ^H 15	530528	7713673	3745	Manantial corriente (CSW-21)
COP-6	11/04/97	16 ^H 50	532369	7712237	3743	Laguna Jachu Coposa sector sur
COP-7	11/04/97	17 ^H 20	533508	7710737	3755	Napa (pozo PVC de observación CWE-19)
COP-8	11/04/97	18 ^H 00	533362	7705072	3790	Napa (pozo PVC de observación CWE-18)
COP-9	12/04/97	10 ^H 35	542628	7725798	3745	Napa (pozo PVC de observación CWE-15)
COP-10	12/04/97	12 ^H 45	532133	7715622	3743	Laguna Jachu Coposa sector norte
COP-11	12/04/97	14 ^H 35	533975	7718014	3743	Napa salar (pozo PVC observación CMW-23)
COP-12	12/04/97	15 ^H 00	532750	7716425	3730	Napa (ojo alimentando lagunita)
COP-13	12/04/97	16 ^H 05	531259	7713708	3743	Laguna pequeña
COP-14	12/04/97	16 ^H 25	531300	7713909	3743	Laguna pequeña
COP-15	12/04/97	16 ^H 40	531120	7713595	3743	Laguna pequeña
COP-16	12/04/97	17 ^H 40	531289	7720834	3745	Napa (pozo 38 en producción)
COP-17	13/04/97	10 ^H 30	531181	7718644	3730	Manantial corriente
COP-18	13/04/97	10 ^H 40	531331	7718699	3743	Laguna
COP-19	13/04/97	11 ^H 10	531231	7718674	3743	Poza de evaporación
COP-20	13/04/97	11 ^H 25	531219	7718639	3743	Poza de evaporación
COP-21	13/04/97	11 ^H 40	531256	7718714	3743	Poza de evaporación
COP-22	13/04/97	13 ^H 15	533666	7706944	3760	Napa (pozo CP-3 en prueba de bombeo)
COP-23	13/04/97	16 ^H 00	537396	7696042	3840	Napa (pozo 14 en producción)
COP-24	13/04/97	16 ^H 40	538776	7692555	3980	Napa (pozo hierro de observación CWE-1)

**SALAR DE COPOSA
COP**

NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG	AL	FE
COP-1	2230	21	0,2	1,001	8,28	0,266	61,1	0,140	0,046	1210	na	1,20	11,7	0,0742	186	5,94	0,110	375	2,09	na	na
COP-2	11370	53,4	0,0	1,007	2,28	-11,8	1560	1,97	0,023	3730	na	22,5	103	0,259	886	204	1,20	258	552	52,1	42
COP-3	150,0	13,9	na	1,000	7,03	0,157	9,55	0,031	0,0034	37,9	1,6	0,649	32,2	0,0298	13,9	2,58	0,031	7,46	3,57	na	na
COP-4	2190	13,7	0,2	1,001	8,38	3,78	188	0,159	0,015	794	na	2,96	28,8	0,170	162	15,3	0,580	184	112	na	na
COP-5	1285	18,5	4,2	1,000	6,41	3,18	174	0,178	0,021	242	na	1,44	35,6	0,0610	115	14,0	0,276	87,0	37,9	na	na
COP-6	53800	7,7	6,2	1,037	8,43	6,71	16400	14,4	0,626	13200	na	93,0	22,1	2,62	10800	1130	28,7	782	2480	na	na
COP-7	4690	11,3	na	1,003	7,15	11,8	1010	0,341	0,036	488	na	3,93	54,0	0,224	573	45,4	1,90	214	163	na	na
COP-8	448,0	12,6	na	1,000	6,74	2,40	27,6	0,063	0,0061	66,5	na	0,681	24,2	0,0008	29,2	6,45	0,085	32,1	17,7	na	na
COP-9	4110	16,3	na	1,003	7,73	1,89	753	0,209	0,0084	1030	na	3,28	39,2	0,365	483	50,0	1,12	362	53,0	na	na
COP-10	53800	14	5,8	1,037	8,40	7,31	16400	12,9	0,874	12800	na	92,5	18,1	2,09	10600	1130	27,2	782	2430	na	na
COP-11	121700	9,9	na	1,084	7,52	8,80	50800	2,33	0,142	20400	na	101	22,1	0,580	31100	3080	89,5	742	4930	na	na
COP-12	13300	11,1	0,3	1,007	7,74	11,3	3450	nd	0,053	1910	na	8,88	34,7	0,475	2130	297	5,95	445	255	na	na
COP-13	5350	14	8,7	1,003	8,89	2,32	1150	0,975	0,197	1030	na	8,29	25,2	0,188	715	80,2	1,82	201	157	na	na
COP-14	16890	13,4	7,0	1,010	8,87	3,14	4300	3,36	0,294	3420	na	28,5	27,6	0,530	2740	317	7,29	380	593	na	na
COP-15	1406	16,7	9,9	1,000	7,89	3,52	199	0,191	0,040	240	na	1,63	30,5	0,0786	129	14,9	0,326	91,8	43,7	na	na
COP-16	2850	12,6	na	1,001	7,98	1,07	742	0,175	0,0083	235	na	2,10	17,4	0,0060	382	18,2	0,600	119	44,2	na	na
COP-17	2450	7	0,0	1,001	7,07	4,47	486	0,284	0,086	269	na	2,84	31,9	0,339	350	32,5	0,791	93,4	34,0	na	na
COP-18	82400	7,6	3,8	1,053	8,19	8,29	28600	15,3	0,632	14900	na	133	44,8	13,5	20200	1970	49,3	1130	1730	na	na
COP-19	24100	14,5	6,1	1,013	8,59	5,69	6640	3,68	0,428	3820	na	32,0	30,8	4,08	5080	438	10,1	305	340	na	na
COP-20	6580	10,2	8,8	1,003	9,10	3,00	1550	0,831	0,140	865	na	7,50	19,7	0,951	1160	102	2,35	79,0	92,1	na	na
COP-21	204000	20,6	0,3	1,226	7,50	27,1	157000	66,2	14,0	50300	na	557	9,35	53,1	102000	9030	251	350	10100	na	na
COP-22	1343	22,2	na	1,000	6,68	7,20	107	0,129	0,030	228	na	1,50	40,3	0,139	92,0	12,5	0,608	92,6	76,8	na	na
COP-23	688,0	17,5	na	1,000	7,80	1,21	40,1	0,082	0,0066	217	na	0,627	29,7	0,0196	40,5	10,0	0,034	57,3	26,7	na	na
COP-24	372,0	21,1	na	1,000	7,96	0,980	26,2	0,071	0,010	81,1	0,81	0,530	26,8	0,0058	47,8	8,29	0,059	15,5	4,64	na	na

T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l.
 CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

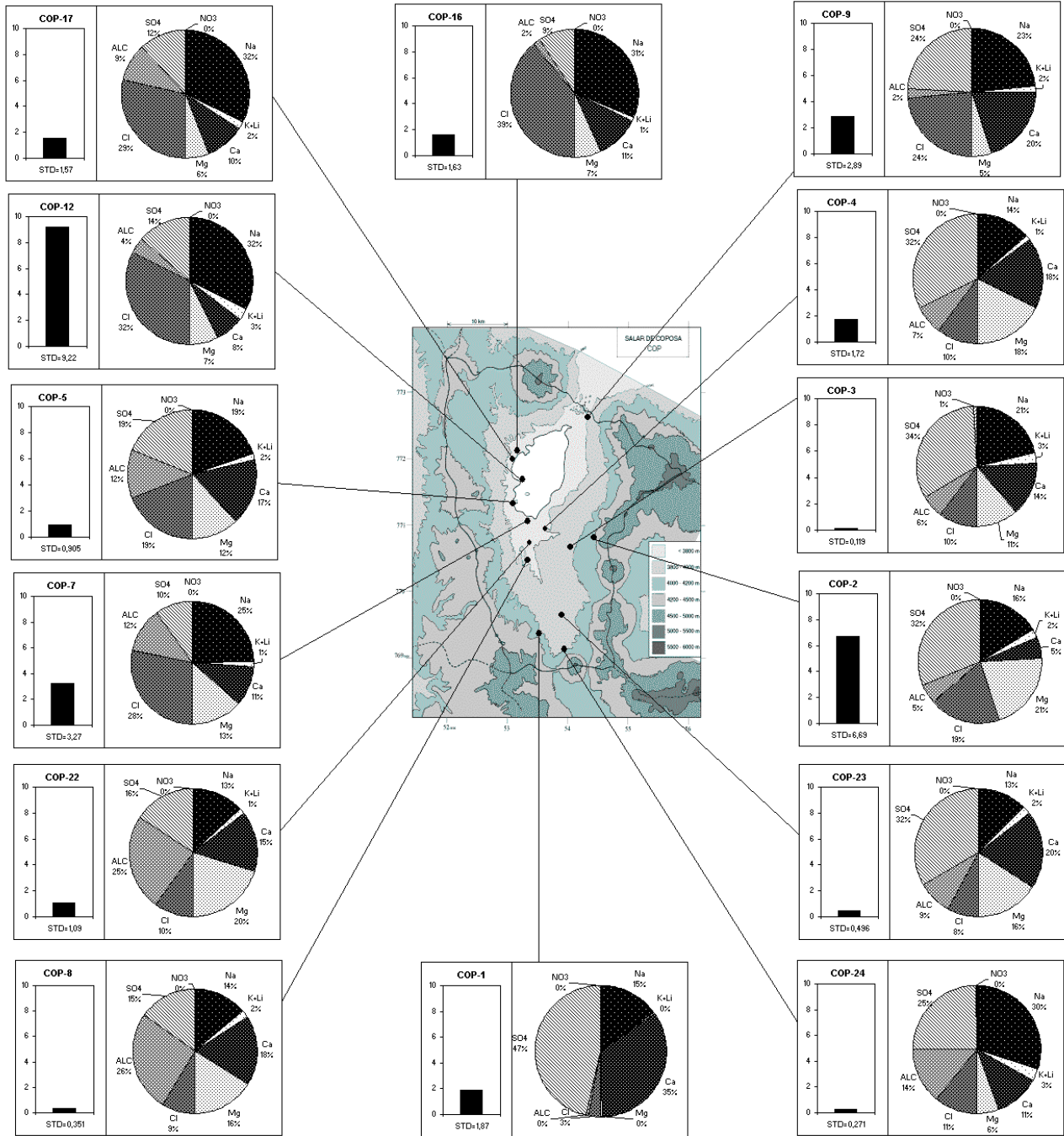
**SALAR DE COPOSA
COP**

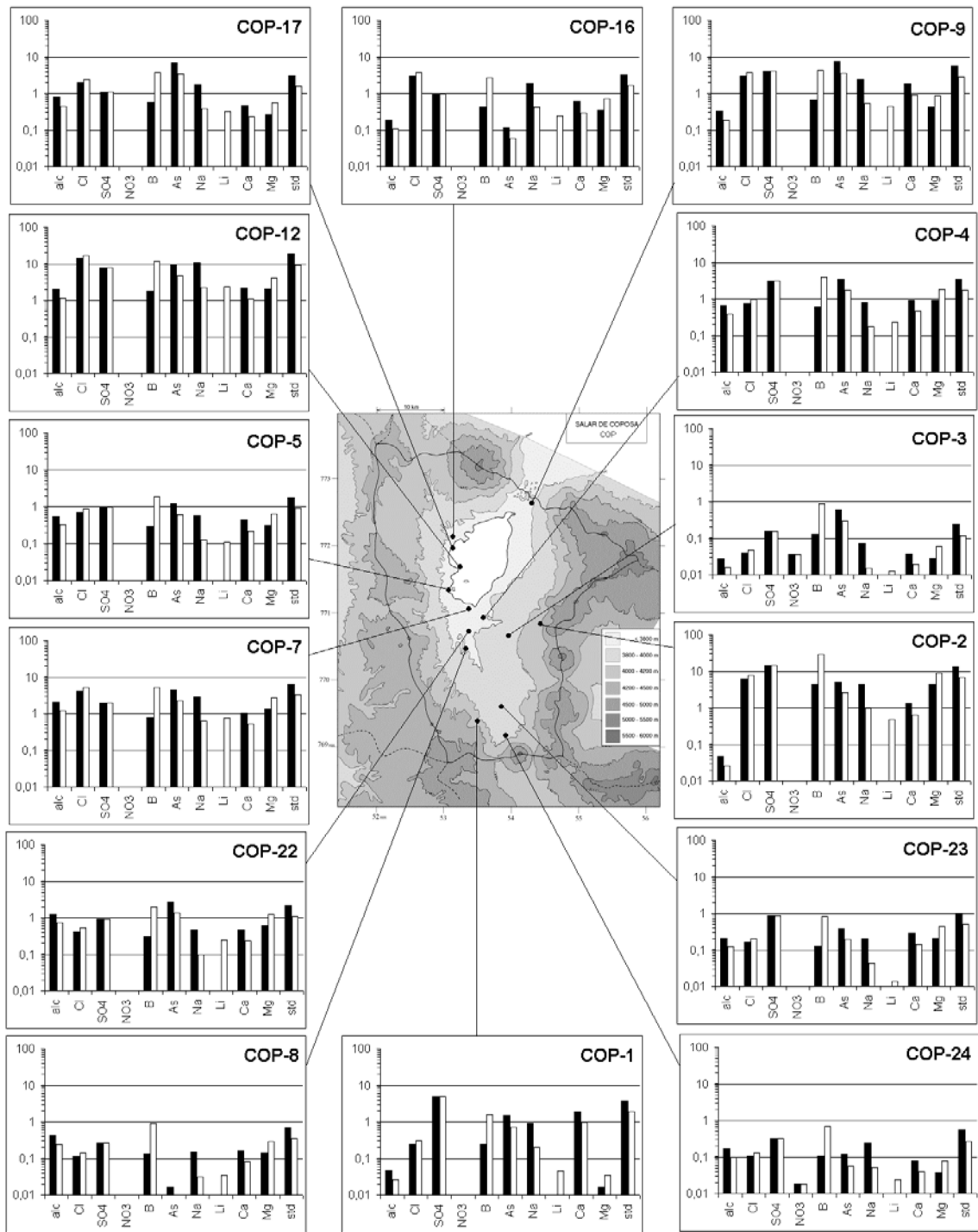
NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S (+)	S (-)	DIF. %
COP-1	1869	13,2	0,60	0,10	27,11	27,19	0,3
COP-2	7415	-	-	-	110,2	109,9	0,3
COP-3	119,1	9,46	0,0	1,6	1,343	1,241	7,9
COP-4	1716	209	8,64	1,4	25,91	25,62	1,1
COP-5	905,4	194	0,06	110	12,88	13,11	1,8
COP-6	45233	215	29,4	1,0	744,1	741,7	0,3
COP-7	3274	714	1,92	79	50,43	50,46	0,1
COP-8	350,8	146	0,06	48	4,503	4,563	1,3
COP-9	2887	111	1,32	3,0	44,86	44,49	0,8
COP-10	44715	233	35,2	1,0	734,9	734,3	0,1
COP-11	111772	465	16,3	15	1885	1865	1,1
COP-12	9221	671	8,58	18	144,1	148,3	2,9
COP-13	3508	93,3	13,3	0,18	56,33	56,02	0,6
COP-14	11997	84,8	18,4	0,15	195,9	195,3	0,3
COP-15	975,1	209	2,16	4,1	14,24	14,12	0,8
COP-16	1626	62,8	0,78	1,1	26,73	26,87	0,5
COP-17	1573	272	0,30	44	23,61	23,77	0,7
COP-18	69271	325	24,8	2,6	1133	1125	0,7
COP-19	17050	251	22,6	0,79	276,9	272,3	1,7
COP-20	4060	124	17,6	0,15	64,96	64,62	0,5
COP-21	330761	-	-	-	5547	5485	1,1
COP-22	1091	439	0,36	130	15,35	14,97	2,5
COP-23	495,6	72,0	0,48	1,8	7,081	6,860	3,2
COP-24	271,3	58,1	0,36	0,97	3,456	3,422	1,0

NUMERO	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
COP-1	-14,24	-107
COP-2	-8,39	-76
COP-5	-12,69	-98

Análisis de oxígeno-18
y deuterio

Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.
S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l); DIF.% = diferencia en %

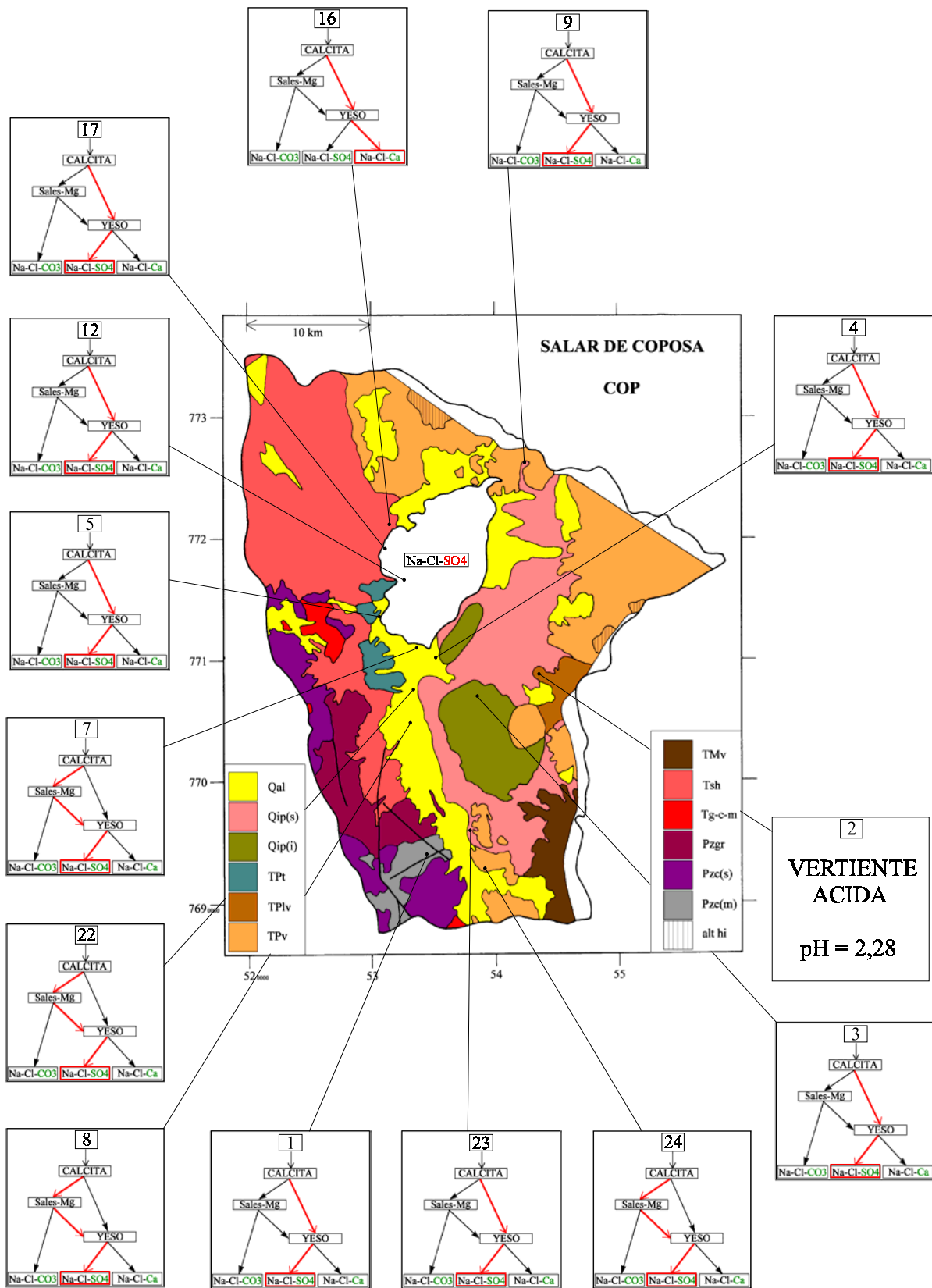




MAPA GEOLOGICO
Y
VIAS EVOLUTIVAS

COP

- Qal** : *Cuaternario*. Depósitos aluviales: bolones, gravas, arenas y arcillas.
- Qip(s)** : *Pleistoceno*. Cenizas de lapilli con niveles de limos, arcillas y diatomeas.
- Qip(i)** : *Pleistoceno*. Tobas de lapilli dacíticas.
- TPt** : *Plioceno - Pleistoceno*. Depósitos aterrazados. Gravas, limos y tobas.
- TPlv** : *Plioceno sup. - Pleistoceno*. Estrato-volcanes andesíticos y dacíticos no erosionados.
- TPv** : *Plioceno*. Estrato-volcanes andesíticos y dacíticos moderadamente erosionados.
- TMv** : *Mioceno medio - Plioceno*. Estrato-volcanes andesíticos y dacíticos intensamente erosionados.
- Tsh** : *Terciario*. Ignimbrita Huasco. Ignimbritas riolíticas y dacíticas.
- Tg-c-m** : *Terciario (Paleogeno)*. Rocas plutónicas: cuazo-monzonita y monzodiorita cuarcífera.
- Pzgr** : *Pérmico*. Granito Chara.
- Pzc(s)** : *Carbonífero - Pérmico inf.* Fm. Collahuasi. Dacitas y riolitas, tobas, areniscas y calizas en lentes intercaladas.
- Pzc(m)** : *Carbonífero - Pérmico inf.* Fm. Collahuasi. Andesitas y tobas andesíticas.
- alt hi** : alteración hidrotermal.



SALAR DE MICHINCHA

Introducción

El salar de Michincha se encuentra en el extremo sur de la Cordillera Andina de la Primera Región. Colinda al norte con la cuenca de Coposa y al sur con la del río Loa. La presencia de importantes yacimientos de cobre (Quebrada Blanca, Collahuasi) incentivó por parte de empresas numerosos estudios hidrogeológicos, gran parte de ellos confidenciales o de difusión restringida, de la cuenca de Michincha para la explotación de sus napas de agua. Debido al pequeño tamaño de la cuenca, el equilibrio hídrico del salar es sensible a la extracción de aguas en las napas circundantes. Considerando fiable la información de mapas antiguos, la superficie de la laguna del salar ha disminuido drásticamente. Sus principales características morfométricas y climatológicas son:

- altura: 4125 m
- superficie de la cuenca: 282 km²
- superficie del salar: 2,5 km²
- superficie de la laguna: 0,2 - 1 km²
- precipitaciones: 200 mm/año
- evaporación potencial: 1620 mm/año
- temperatura media: 3,5°C

Aguas de aporte

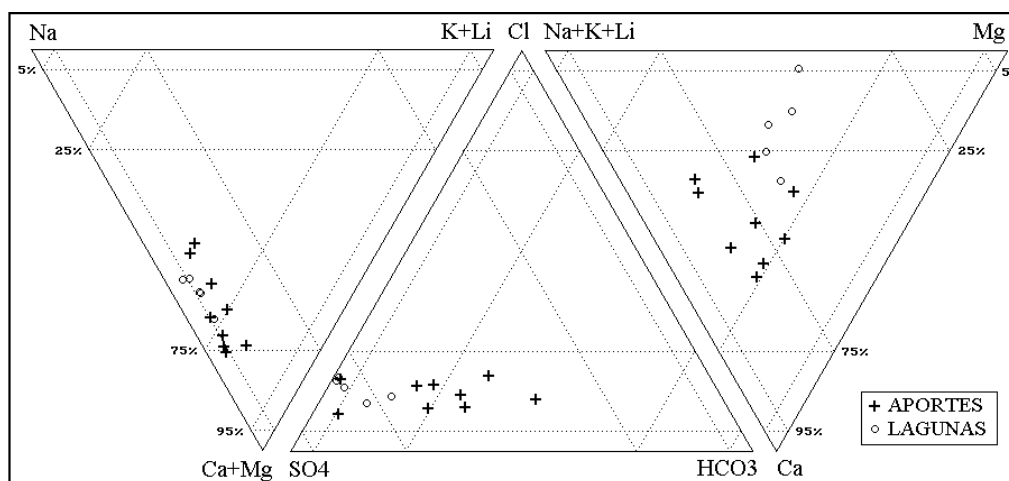


Fig.1. Composición de las aguas de aporte y de salmueras del salar de Michincha.

Representamos en la figura 1 la composición química de todas las aguas, diluidas y saladas, de Michincha. Las varias aguas de aporte tienen una composición relativamente homogénea y son de tipo catiónico Na - Ca - Mg, ubicándose casi al centro del triángulo Na-Ca-Mg. Su tipo aniónico se extiende en un estrecho huso desde un polo SO₄ (MIC-2 y 10) hasta un polo HCO₃ =

SO₄ (MIC-1), con una concentración porcentual de Cl baja y casi constante. Este contenido relativo en SO₄ y HCO₃ es el punto relevante que diferencia y caracteriza cada agua de aporte. Por otra parte, todas las aguas de aporte de Michincha son diluidas: desde 100 mg/l hasta 526 mg/l. Esas aguas se parecen mucho a las aguas de aporte del vecino salar de Alconcha. En los gráficos de la figura 2 se presenta las relaciones Na versus Cl y Ca versus SO₄ para todas las aguas SO₄ y salmueras. No se observa ninguna equimolaridad entre Na y Cl de una parte y Ca y SO₄ de otra parte.

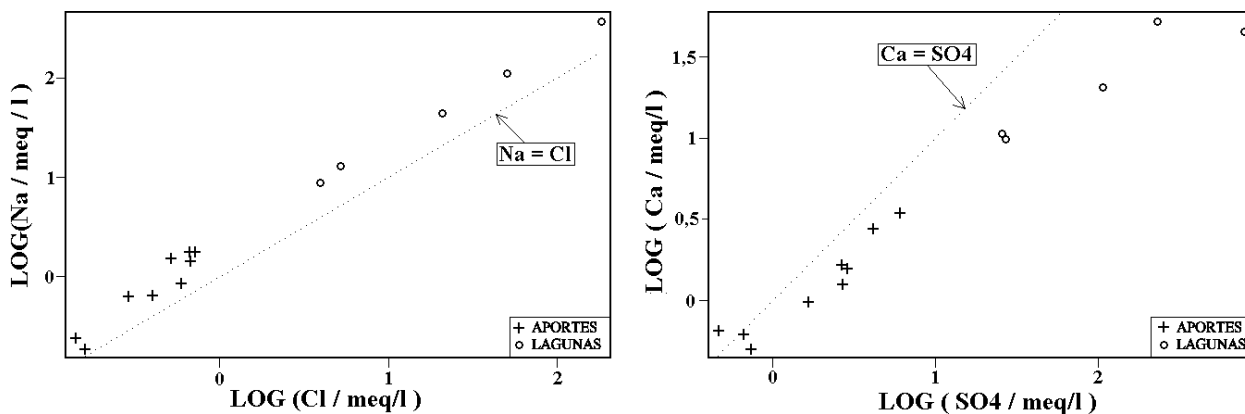


Fig.2. Relación entre Na vs Cl y Ca vs SO₄ en las aguas de Michincha

Tampoco se observa relaciones equimolares entre combinaciones simples de otros componentes mayores. No aparece entonces ninguna influencia de antiguas evaporitas en el origen de los componentes disueltos en las aguas de aporte de Michincha, ausencia también confirmada por las bajas salinidades de esas aguas. Este tipo de composición química sugiere fuertemente que los componentes disueltos en las aguas de aporte provienen de la alteración de rocas volcánicas con presencia de azufre o sulfuros. Al oxidarse, el azufre acidifica las aguas, reduciendo su contenido en bicarbonatos, sin modificar el contenido relativo de cloruros.

Composición de las lagunas

La laguna principal del salar es apenas salobre (2,6 g/l). Pero en el bofedal circundante existen numerosas pozas de evaporación con salmueras de hasta 62 g/l STD. La composición química de estas salmueras no es muy común en el ámbito de los salares chilenos por su alto contenido en magnesio. Son de tipo Na-Mg / SO₄, un sub-grupo de la familia Na / SO₄. Se observa en la figura 1 que las aguas de lagunas se empobrecen en calcio y en bicarbonatos, con poca variación de los contenidos porcentuales de los demás componentes. Esto refleja la precipitación de carbonato de calcio (calcita).

Vías evolutivas

Todas las aguas de aporte evolucionan por evaporación hacia salmueras sulfatadas, sea por la vía neutra sulfatada, sea por la vía alcalina sulfatada (8 y 11). Esta uniformidad refleja la similitud de todos los aportes. La vía sulfatada corresponde bien a aguas de terrenos volcánicos con azufre. La vía neutra sulfatada podría también reflejar la presencia de rocas volcánico-sedimentarias. Sin

embargo, la baja salinidad de los aportes caracteriza más los terrenos volcánicos o cristalinos que los niveles sedimentarios. Al observar el mapa geológico, notamos que la mitad occidental de la cuenca está constituida por formaciones volcano-sedimentarias (Cretácicas: KT, Ki2) o sedimentarias (Jurásicas: Jdm). Las aguas que drenan las mismas formaciones en la cuenca de Pintados son mucho más salinas. Tenemos entonces una cierta incoherencia entre la geología de la cuenca y la composición de las aguas. Podemos adelantar dos hipótesis. Primero, el componente sedimentario de las formaciones cretácicas podría ser muy reducido en este sector, quedando el Jurásico mayormente sedimentario que no muestra influencia sobre la composición de las aguas de la cuenca. Por otra parte, se puede suponer que la alimentación principal de las napas alrededor del salar proviene sobre todo de la parte oriental de la cuenca. Este sector es más elevado, volcánico y probablemente más húmedo que el sector occidental. Como apoyo a esta hipótesis, podemos recalcar la gran similitud de las aguas de aporte de Michincha con las del vecino salar de Alconcha, al este.

En la tabla 1 presentamos la composición calculada de todas las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta la salinidad de la laguna principal y también hasta la salmuera más concentrada. Las soluciones reales (5) y (15) están muy sobresaturadas en calcita y la salmuera (15) en yeso. Por eso hemos recalculado la composición de estas soluciones una vez llevadas al equilibrio después de precipitar la calcita y el yeso. Los valores de la columna "desviación" son los coeficientes del chi-cuadrado adaptado que miden el grado de semejanza entre las soluciones de aporte evaporadas (MIC-xxE) y la solución real equilibrada (MIC-xx.EQL).

NUMERO	PH	ALC	NA	K	LI	CA	MG	CL	SO4	B	SI	DESV.
MIC-15.EQL (Laguna)	7,89	1,96	297	94,3	0,23	121	161	185	1320	5,26	12,9	
MIC-13E	8,31	1,08	234	101	0,21	141	189	225	1300	4,67	33,4	0,096
MIC-3E	8,25	0,959	287	90,4	0,22	181	131	164	1390	5,12	33,3	0,101
MIC-9E	8,28	1,09	362	139	0,25	154	74,8	225	1240	14,4	33,4	0,247
MIC-8E	8,58	2,11	342	180	0,39	40,3	150	180	1280	6,44	33,7	0,253
MIC-1E	8,31	1,15	311	114	0,08	134	135	270	1210	13,1	33,4	0,275
MIC-11E	8,58	2,10	425	209	0,25	38,5	95,8	310	1100	10,8	11,9	0,282
MIC-2E	8,09	0,634	198	133	0,09	336	65,1	215	1320	5,96	33,3	0,342
MIC-10E	8,13	0,712	168	61,2	0,08	314	126	118	1480	3,06	33,3	0,346
MIC-14E	8,18	0,903	173	175	--	236	116	219	1240	18,3	33,3	0,356
MIC-5.EQL (Salmuera)	7,80	1,24	8530	2140	5,91	477	6140	6440	37100	59,3	14,6	
MIC-10E	8,06	2,83	8020	2910	4,01	466	5970	5640	37300	146	29,0	0,141
MIC-13E	8,05	2,85	7610	3270	6,85	480	6090	7320	33800	152	28,7	0,143
MIC-3E	8,11	3,42	10000	3170	7,62	473	4560	5750	36100	179	29,4	0,181
MIC-8E	8,16	3,66	9880	5190	11,1	475	3700	5200	35600	186	29,9	0,293
MIC-1E	8,12	6,50	9950	3660	2,45	495	4310	8650	30900	420	29,1	0,394
MIC-2E	8,17	5,13	9960	6670	4,63	505	3250	10800	28200	300	29,4	0,411
MIC-11E	8,25	5,76	11900	5820	7,05	500	2280	8650	30200	302	30,0	0,425
MIC-9E	8,23	8,08	12000	4610	8,27	498	2470	7470	31200	476	30,0	0,445
MIC-14E	8,10	10,1	6780	6880	--	496	4520	8600	29000	717	29,5	0,525

Tabla 1 : Comparación de las aguas de aporte evaporadas con las soluciones del salar de Michincha. ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

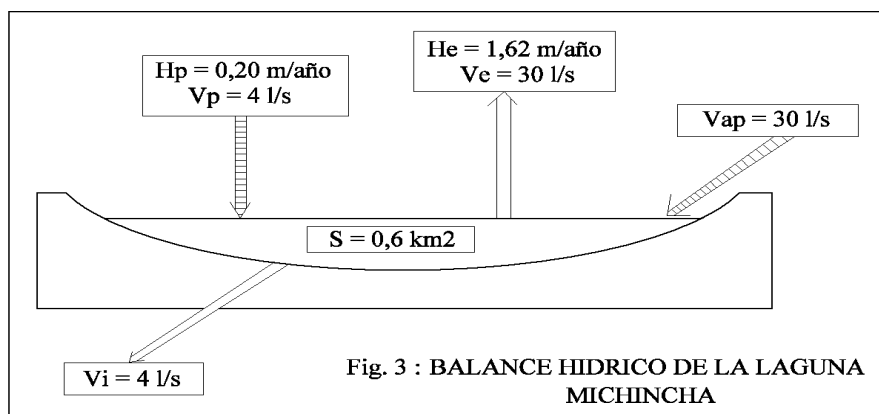
En los dos casos, el coeficiente de desviación no llega a valores muy elevados. En otros salares, llega comunamente por encima de 1,0. Eso confirma una vez más la similitud química de todas las aguas diluidas de la cuenca. Las dos soluciones evaporadas que más se asemejan a la laguna y a la salmuera más concentrada derivan de las aguas de aporte (3) (vertiente principal al sur de la laguna) y (13) (napa central al norte de la laguna). Tanto al norte como al sur del salar tenemos la misma agua de aporte.

Calidad de agua

Todas las aguas de vertientes y napas tienen una calidad excelente para el consumo humano. Solamente MIC-9 tendría ciertas limitaciones para un uso agrícola debido al boro.

Balace hídrico de la laguna Michincha

La extracción de aguas en la cuenca ha cambiado el equilibrio hídrico de la laguna superficial. No sabemos si un nuevo equilibrio se ha establecido entre los aportes reducidos actuales y las perdidas. Puede que la superficie de la laguna siga reduciéndose en los años venideros. Presentamos en la figura 3 un balance muy hipotético de la laguna. A lo mejor, los valores adelantados son ordenes de magnitud.



Se utiliza el cloruro como elemento conservativo. Los parámetros retenidos son :

- $H_c = 1,62$ m/año
- $H_p = 0,20$ m/año
- $S = 0,6$ km²
- $C_{ap} = 23,6$ mg/l (vertiente MIC-3)
- $C_L = 185$ mg/l (laguna MIC-15)

Volumen de aporte : $V_{ap} = S(H_c - H_p) / (1 - C_{ap} / C_L) = 970\ 000$ m³/año = 30 l/s

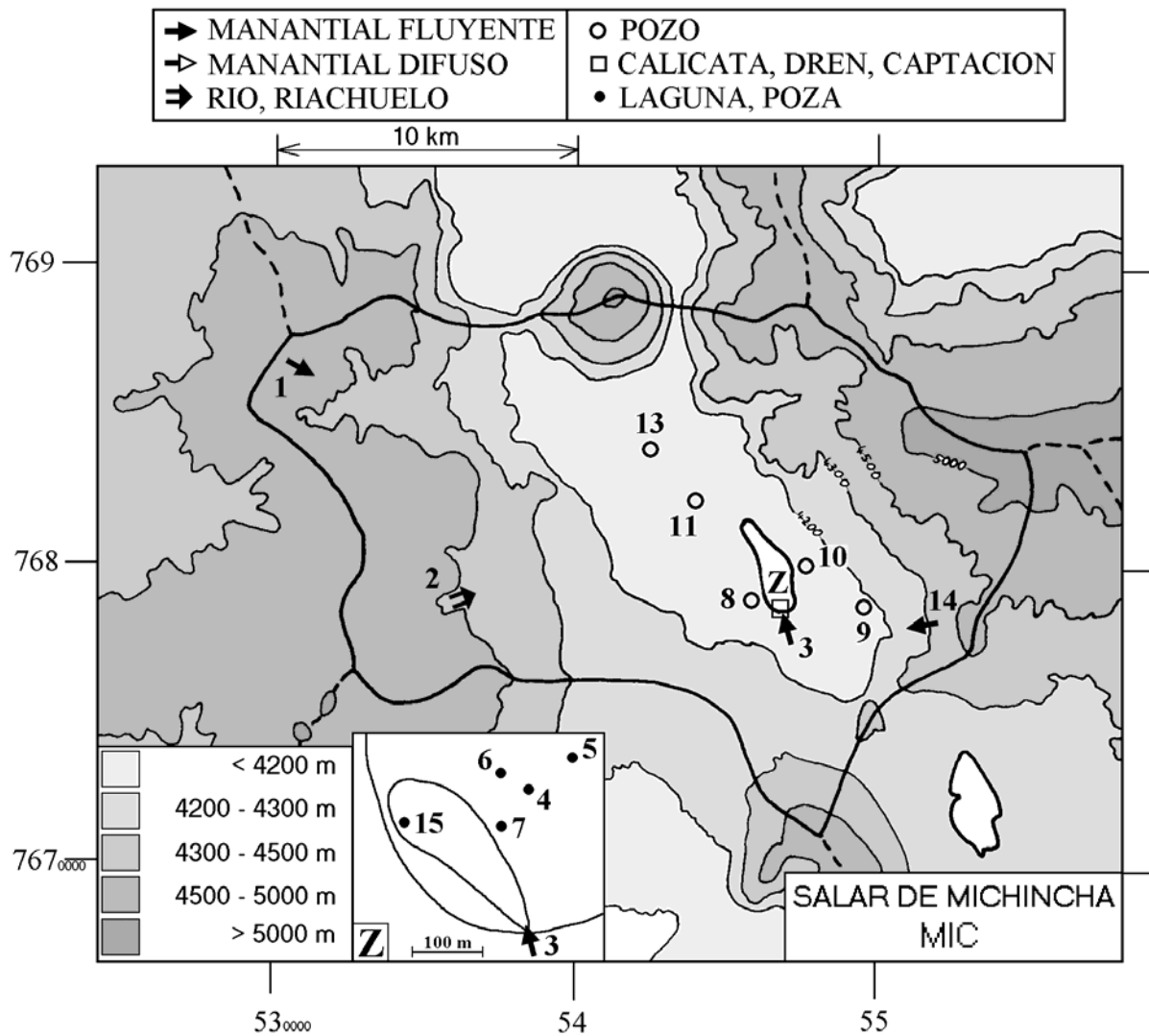
Volumen de infiltraciones : $V_i = S(H_c - H_p) / (1 - C_L / C_{ap}) = 124\ 000$ m³/año = 4 l/s

Repetimos que estos valores son especulativos. El volumen de 30 l/s representa un orden de magnitud del caudal promedio anual de la vertiente principal MIC-3 a la orilla sur del salar. Haciendo un calculo similar, pero utilizando la superficie más extensa, indicada en los mapas antiguos (alrededor de 2 km²), se obtiene un caudal anterior de unos 90 l/s. El deficit de

alimentación de la laguna asciende ya a unos 60 l/s. La explotación de las napas de la cuenca exige una adecuada gestión para no afectar la estabilidad de la laguna

Conclusiones.

Las aguas de aporte al salar de Michincha son diluidas y de composición química bastante homogénea en toda la cuenca. Las sales disueltas provienen de la alteración de rocas volcánicas con azufre. La alimentación principal parece provenir de la mitad oriental de la cuenca. La composición de los aportes, y sus vías evolutivas al evaporarse, reflejan más la litología volcánica de la parte oriental de la cuenca que la naturaleza más sedimentaria de su parte occidental. Las salmueras del salar son de un tipo poco común en el norte de Chile: Na-Mg / SO₄. La explotación de las napas en una cuenca relativamente pequeña, requiere un plan de manejo cuidadoso para no afectar el ambiente.



**SALAR DE MICHINCHA
MIC**

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
MIC-1	10/04/97	11 ^H 15	536599	7680576	4440	Manantial corriente
MIC-2	10/04/97	12 ^H 05	535983	7678749	4475	Riachuelo en bofedal (Quebrada Represa)
MIC-3	10/04/97	13 ^H 40	546885	7678449	4126	Manantial corriente MSW-2A
MIC-4	10/04/97	14 ^H 10	546858	7678645	4125	Laguna pequeña en bofedal
MIC-5	10/04/97	14 ^H 20	546918	7678706	4125	Poza de evaporación en bofedal
MIC-6	10/04/97	14 ^H 35	546833	7678650	4125	Poza de evaporación en bofedal
MIC-7	10/04/97	15 ^H 05	546823	7678587	4125	Poza de evaporación en bofedal
MIC-8	10/04/97	15 ^H 50	546362	7678702	4130	Napa (pozo hierro de observación M-17)
MIC-9	10/04/97	17 ^H 00	549639	7678952	4195	Napa (pozo hierro de observación M-21)
MIC-10	10/14/97	17 ^H 30	547482	7680168	4135	Napa (pozo hierro de observación M-15)
MIC-11	10/04/97	17 ^H 40	544037	7682084	4135	Napa (pozo hierro de observación M-5)
MIC-13	13/04/97	18 ^H 30	542288	7683652	4140	Napa (pozo P-1 en producción)
MIC-14	14/04/97	12 ^H 40	551332	7678225	4220	Manantial corriente
MIC-15	14/04/97	14 ^H 20	546709	7678603	4125	Laguna en bofedal

**SALAR DE MICHINCHA
MIC**

NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
MIC-1	123,0	7,9	5,4	1,000	6,92	0,526	4,90	0,019	0,0036	21,9	0,43	0,238	10,8	0,00127	5,64	2,07	0,001	13,1	2,45
MIC-2	367,0	8,7	4,9	1,000	6,34	0,062	21,1	0,038	0,0013	128	na	0,584	16,9	0,00043	19,4	13,0	0,009	33,3	6,37
MIC-3	629,0	20,1	3,3	1,000	6,82	1,55	23,6	0,048	0,0053	197	na	0,735	40,0	0,0405	41,2	13,0	0,031	55,7	18,8
MIC-4	2660	24	na	1,001	8,59	3,47	140	0,196	0,022	1220	na	2,92	41,4	0,172	203	75,5	0,200	214	139
MIC-5	47100	20,3	6,0	1,055	8,69	10,7	6430	7,85	1,05	37600	na	59,1	14,6	1,69	8510	2130	5,90	898	6340
MIC-6	9240	22,5	21,7	1,008	8,90	4,96	742	0,700	0,138	5110	na	11,2	12,0	0,432	1020	325	0,902	409	751
MIC-7	18270	24	11,9	1,017	9,09	3,43	1780	1,75	0,244	11000	na	19,0	5,49	0,480	2510	422	1,90	1050	1340
MIC-8	480,0	10,5	na	1,000	7,87	1,50	18,1	0,045	0,0063	127	na	0,649	22,6	0,0019	34,5	18,1	0,039	25,4	18,5
MIC-9	469,0	21,4	na	1,000	8,60	0,852	25,1	0,061	0,014	136	na	1,60	7,50	0,00112	40,9	15,5	0,028	31,8	8,33
MIC-10	710,0	13	na	1,000	6,37	0,407	23,5	0,060	0,011	292	na	0,605	46,2	0,00846	33,4	12,1	0,017	68,6	25,0
MIC-11	172,0	7,9	na	1,000	6,27	0,514	10,2	0,046	0,0067	34,8	na	0,357	0,392	0,0001	14,7	6,88	0,008	10,2	3,16
MIC-13	295,0	10,9	na	1,000	7,81	0,620	14,1	0,052	0,0006	79,3	3,2	0,292	22,6	0,0124	14,7	6,30	0,013	19,9	12,3
MIC-14	131,0	10	6,0	1,000	7,67	0,355	5,57	0,035	0,0014	32,0	0,43	0,465	20,4	0,00388	4,39	4,46	nd	12,5	2,94
MIC-15	3150	16,6	7,4	1,001	8,33	5,69	185	0,443	0,091	1300	na	5,25	12,9	0,316	297	94,2	0,230	196	166

T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l.

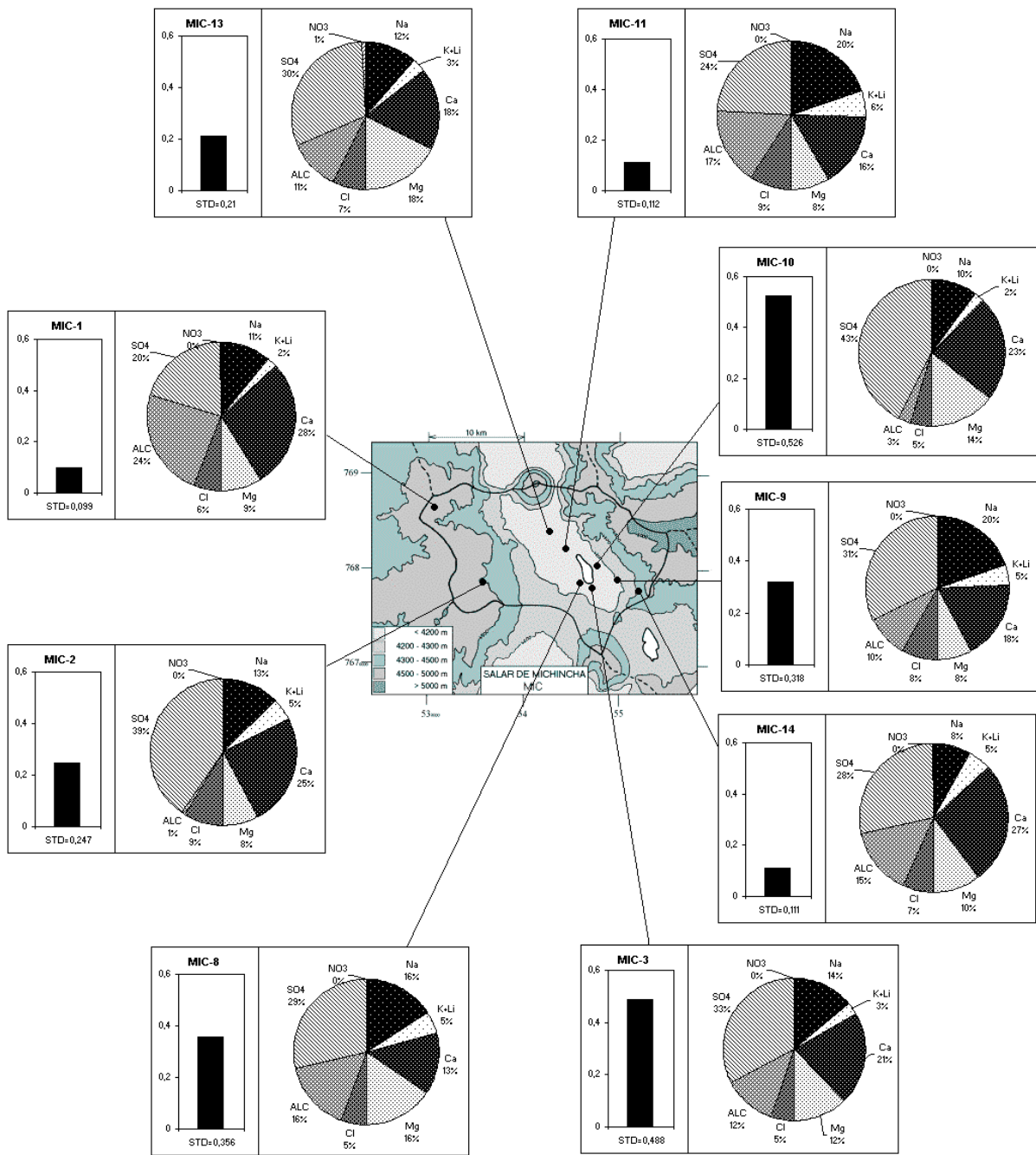
CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

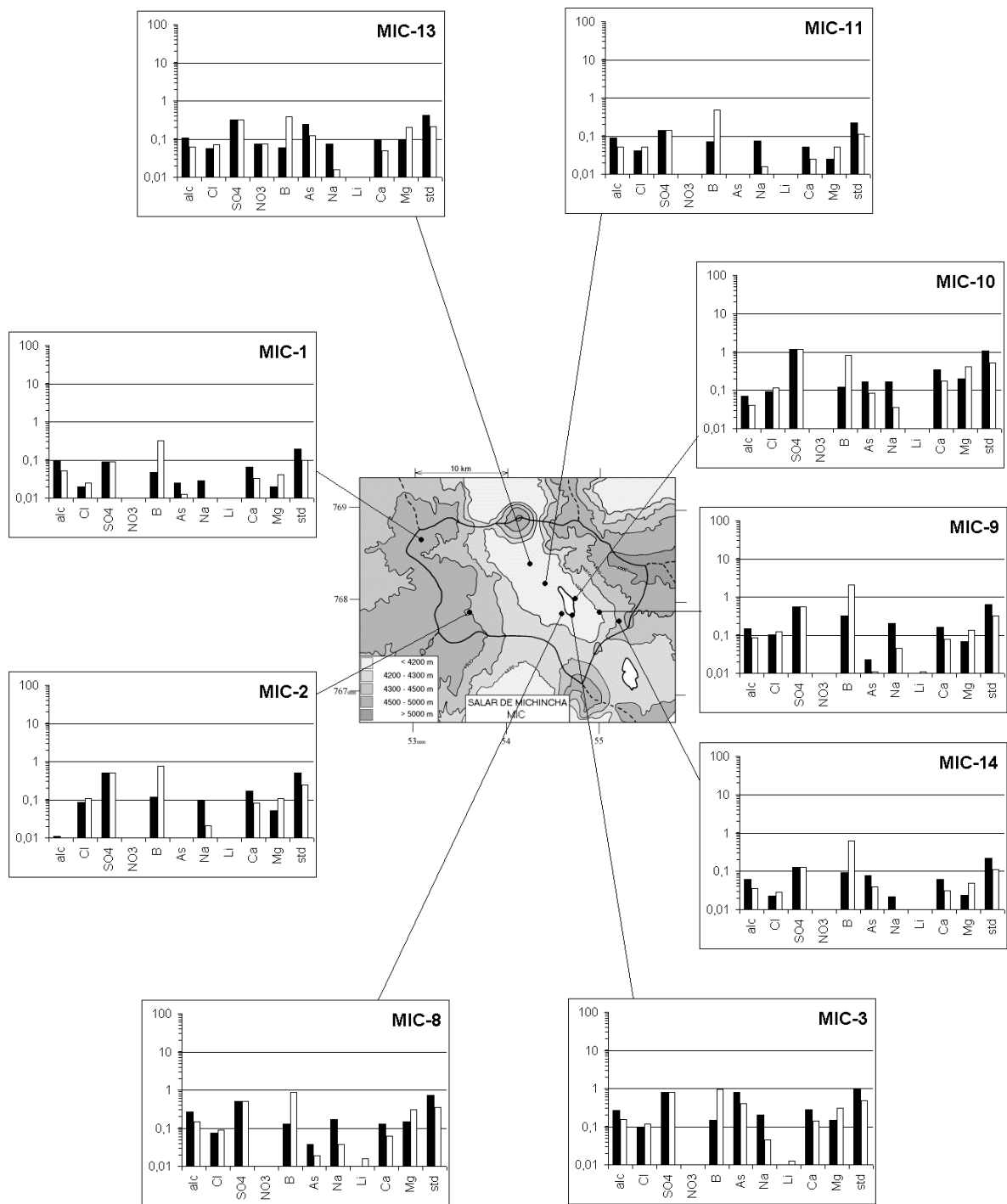
NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF. %	NUMERO	$\delta^{18}O$	δ^2H
MIC-1	99,03	32,0	0,0	7,9	1,154	1,127	2,4	MIC-1	-12,9	-100
MIC-2	246,9	3,78	0	3,4	3,360	3,316	1,3	MIC-3	-13,29	-100
MIC-3	487,7	94,6	0,06	22	6,454	6,314	2,2			
MIC-4	2243	168	16,1	0,57	32,85	32,82	0,1			
MIC-5	62668	238	116	0,44	992,3	975,7	1,7			
MIC-6	8689	165	50,8	0,24	134,9	132,3	1,9			
MIC-7	18368	55,1	39,7	0,05	282,5	283,4	0,3			
MIC-8	355,9	90,3	0,42	2,2	4,761	4,651	2,3			
MIC-9	318,1	45,9	1,62	0,17	4,452	4,399	1,2			
MIC-10	526,0	24,8	0	18	7,242	7,148	1,3			
MIC-11	112,1	31,4	0	34	1,582	1,528	3,5			
MIC-13	210,4	37,2	0,12	1,1	2,808	2,721	3,1			
MIC-14	110,7	21,4	0,06	0,88	1,171	1,185	1,2			
MIC-15	2603	315	13,3	2,1	38,76	37,90	2,3			

Análisis de oxígeno-18 y deuterio

Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.

S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l); DIF.% = diferencia en %





MAPA GEOLOGICO
Y
VIAS EVOLUTIVAS

MIC

Q : *Cuaternario*. Sedimentos fluviales, lacustres, glaciales, eólicos aluviales, coluviales y laháricos.

TQ2 : *Plioceno - Pleistoceno*. Coladas, tobas y brechas andesíticas y basálticas con intercalaciones de sedimentitas detríticas.

Tmp2 : *Mioceno - Plioceno*. Ignimbritas riolíticas y riodacíticas con intercalaciones sedimentarias.

Tm2 : *Mioceno*. Tobas riolíticas y dacíticas, coladas andesíticas y dacíticas.

KT : *Cretácico sup. - Terciario inf.* Coladas y brechas andesíticas y riolíticas, tobas e ignimbritas dacíticas y riolíticas, con intercalaciones de lutitas, calizas, areniscas y conglomerados continentales.

Ki2 : *Cretácico inf.* Coladas y brechas andesíticas, dacíticas, riolíticas y traquíticas; tobas, ignimbritas e intercalaciones sedimentarias.

JKTg : *Jurásico sup. - Terciario inf.* Rocas plutónicas e hipabisales.

Jdm : *Jurásico (Dogger - Malm)*. Areniscas, areniscas calcáreas, calizas, margas, lutitas, conglomerados y cherts. Desarrollo de facies evaporíticos en el Jurásico sup. de la Cordillera de los Andes.

