



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
SINTESIS**

REALIZADO POR:

**François Risacher
Hugo Alonso
Carlos Salazar**

S.I.T. N° 51

Santiago, Enero de 1999

INDICE

	Páj.
I. OBJETIVOS DEL ESTUDIO	7
1. Introducción	7
2. Objetivos aplicados	7
3. Objetivos científicos	8
II. PRESENTACION DE LOS SALARES CHILENOS	9
1. Tipos de aportes	9
2. Tipos de lagunas	10
3. Tipos de salares	10
III. DESCRIPCION DE LAS CAMPAÑAS DE TERRENO	18
IV. METODOS DE ANALISIS	24
V. ANTECEDENTES GEOLOGICOS Y CLIMATOLOGICOS	26
1. Cuadro geológico	26
2. Rasgos geomorfológicos	28
3. Cuadro climático e hidrográfico	31
VI. EVOLUCION DE AGUAS EN CUENCAS CERRADAS	33
1. Precipitación de la calcita	33
2. Precipitación de sales de magnesio	34
3. Precipitación del yeso	34
4. Diagramas de evolución de aguas por evaporación	36
5. Determinación cualitativa de la vías evolutivas	39
6. Simulación cuantitativa de la evaporación	42
VII. RELACION ENTRE VIA EVOLUTIVA Y LITOLOGIA DE LA CUENCA ORIGEN DE LOS COMPONENTES	46
1. Alteración de rocas plutónicas y volcánicas	46
2. Alteración de rocas sedimentarias	47
3. Relación entre litología y vía evolutiva	48

VIII. CLASIFICACION DE AGUAS Y DIAGRAMAS	51
1. Diagramas triangulares	51
2. Diagramas circulares	52
3. Diagramas de barras. Calidad de aguas	53
IX. BALANCE HIDRICO DE LAS LAGUNAS	54
X. ORIGEN DE LOS COMPONENTES EN AGUAS DE CUENCAS CERRADAS DEL NORTE DE CHILE	57
1. Salinidad de las aguas de aporte	57
2. Relación Na / Cl	58
3. Relación Ca / SO ₄	58
4. Relación Na+Ca / Cl y Na+Mg / Cl	59
5. Otras relaciones entre cationes y aniones	61
6. Influencia del termalismo	61
7. Aportes atmosféricos	62
XI. EVOLUCION DE AGUAS EN CUENCAS CERRADAS DEL NORTE DE CHILE	65
1. Efecto de la precipitación de la calcita	65
2. Efecto de la precipitación de sales de magnesio	65
3. Efecto de la precipitación del yeso	66
4. Repartición de las aguas de aporte en las distintas vías evolutivas	67
5. Repartición geográfica de las aguas de aporte según sus vías evolutivas	68
XII. CALIDAD DE AGUA	72
1. Calidad de potabilidad	72
2. Calidad de riego	73
XIII. COMPOSICION ISOTOPICA DE LOS APORTES	75
XIV. BALANCE HIDRICO DE LAS LAGUNAS	78
XV. CONCLUSIONES	80
XVI. REFERENCIAS	82
ANEXOS :	
Vol.2 : ESTUDIOS DE CUENCAS - PRIMERA REGION	
Vol.3 : ESTUDIOS DE CUENCAS - SEGUNDA REGION	
Vol.4 : ESTUDIOS DE CUENCAS - TERCERA REGION	

AGRADECIMIENTOS

Un trabajo como el realizado ha sido posible gracias a la participación de varias instituciones, tanto públicas como privadas, y especialmente de las personas de ellas que hicieron, muchas veces, más de lo estrictamente obligatorio. El trabajo en terreno ocupó parte significativa del esfuerzo y para ello debió recurrirse al apoyo de organismos públicos y empresas privadas cuya respuesta a las peticiones de apoyo fueron concedidas sin mayores reparos. Desde el anónimo conductor de una motoniveladora que nos abrió camino en una cubierta de nieve que nos tenía aislados, hasta un gerente de empresa que acogió una petición de alojamiento, pasando por jefes de servicios y de departamentos hasta el nivel de personal subalterno, el apoyo encontrado fue significativo. A todos ellos expresamos nuestro agradecimiento. En la imposibilidad de nombrar a todos, vaya una breve relación. Institucionalmente se contó con la colaboración de los siguientes organismos y empresas: en orden cronológico:

- Ejército de Chile, I División (II Región)
- Compañía Minera Escondida (II Región)
- Codelco Chile, División Chuquibambilla (II Región)
- Compañía Minera Mantos Blancos (III Región)
- Corporación Nacional Forestal, CONAF (I Región)
- Compañía Minera Quiborax (I Región)
- Codelco Chile, División El Salvador (III Región)
- Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi (I Región)
- Compañía Minera Zaldívar (II Región)

Especial mención cabe hacer a la colaboración de Dirección General de Aguas a través de sus Oficinas Regionales de las Regiones Primera, Segunda y Tercera con una importante labor de coordinación y apoyo logístico, especialmente en los trabajos de terreno, en una zona de las características mencionadas.

Aproximadamente un tercio de los análisis (aniones) fueron realizados en el laboratorio químico del Centro de Geoquímica de la Superficie (CNRS) en Estrasburgo, Francia y el restante en el Laboratorio Ambiental de la Dirección General de Aguas.

Entre las personas que colaboraron en los trabajos de terreno, largo sería mencionar a cada una de ellas. Quienes conocen las dificultades de movilización en la difícil morfología donde se encuentran las cuencas estudiadas, comprenderán el importante rol de los choferes de los vehículos. Los guarda-parques de Conaf que han convertido su trabajo en una verdadera misión, ayudaron con el conocimiento de sus áreas silvestres y acogiéndonos con su hospitalidad. Los carabineros fronterizos estuvieron siempre dispuestos con su información y atentos al socorro en caso de emergencia. El personal de los campamentos de las empresas mineras, nos brindó su ayuda y amistad que pudimos gozar en las sobremesas del anochecer. Los lugareños que hicieron

de guías para llevarnos a aguadas desconocidas o el tránsito por huellas no marcadas, nos ahorraron mucho tiempo. A todos y cada uno de ellos vaya nuestro reconocimiento.

Finalmente cabe recordar que ninguna de las tres instituciones que desarrollaron este programa de Geoquímica de Aguas en Cuencas Cerradas, tiene fines de lucro. Como miembros de ellas, nos motivó el espíritu de investigar lo desconocido y contribuir al mejor conocimiento de ese escaso recurso que es el agua. Agradecemos a este espíritu motivador recibido de la ciencia y esperamos sirva a otros para continuar por este camino de búsqueda.

F.R., H.A., C.S.

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.

I. OBJETIVOS DEL ESTUDIO

1. Introducción

Las tres primeras regiones del norte de Chile cumplen con los dos requisitos fundamentales para el establecimiento de ambientes evaporíticos:

- la evaporación potencial es superior a la pluviosidad
- la presencia de cuencas cerradas

La altura media de precipitación pasa de algunos mm/año en la costa y el Valle Central hasta unos 300 mm/año en la Cordillera de los Andes. La evaporación potencial varía de 1000 a 2500 mm/año, esencialmente en función de la altura. Debido a este gradiente de aridez, existen dos grandes grupos de salares y lagos salados:

- *los salares de la costa y del valle central*. Son salares inactivos, fósiles, con costras de sales muy secas. Aquí se encuentran los yacimientos de nitratos y yodo.

- *los lagos salados y salares de la Cordillera de los Andes*. Son actualmente activos. Reciben aportes de agua de su cuenca de drenaje que se concentran por evaporación en lagunas superficiales donde precipitan sales evaporíticas.

En el mes de mayo de 1995, entre la Dirección General de Aguas, DGA, del Ministerio de Obras Públicas, la Universidad Católica del Norte, UCN, y el entonces Instituto Francés de Investigación Científica para el Desarrollo en Cooperación, ORSTOM, actualmente Instituto de Investigación para el Desarrollo, IRD, se firmó un Convenio de Cooperación para el estudio de geoquímica de aguas en cuencas cerradas de la Primera, Segunda y Tercera Regiones. En un Convenio anterior (1993) entre La UCN y ORSTOM se estudió la geoquímica de aguas en cuencas cerradas del Altiplano de la Segunda Región. Los resultados allí obtenidos se aportan para los objetivos propuestos. El estudio de las cuencas cerradas de la cordillera andina es altamente relevante, pues de ellas se extrae el agua no sólo para el uso urbano sino también para las principales faenas mineras. Considerando que las mayores inversiones anunciadas para Chile ocurrirán en la minería, los requerimientos de agua se verán notoriamente aumentados. Este estudio abarca solamente las cuencas que reciben agua, es decir 53 lagos salados y salares de la Cordillera. Los objetivos del programa son a la vez aplicados y científicos.

2. Objetivos aplicados.

- *Calidad de las aguas de aporte*. Los lagos salados y salares se constituyen en la base de equilibrio de las cuencas cerradas. Las napas subterráneas de las cuencas de drenaje se descargan preferencialmente en estas depresiones topográficas originando manantiales o vertientes que alimentan los salares. Se puede sacar fácilmente muestras de estos manantiales obviando así costosos sondeos, por lo menos en esta etapa de reconocimiento. Un primer objetivo consiste entonces en inventariar todos los manantiales que se vierten en las cuencas cerradas para tener una idea preliminar de la calidad química de las aguas subterráneas en las partes más altas de las cuencas de drenaje. Muchos manantiales surgen cerca de las orillas de los salares, lo que plantea

el problema de una posible contaminación de las aguas de aporte por las aguas saladas estancadas en el fondo de la cuenca.

- *Balance hídrico de las lagunas.* Las vertientes o manantiales surgen frecuentemente en varios puntos, o pueden ser difusos a lo largo de decenas o cientos de metros de la orilla, condición que dificulta fuertemente cuantificar los caudales aportados. Cuando alimentan una laguna superficial y salada permanente, la determinación del volumen de sus aportes es simple, requiriéndose establecer el balance hídrico de la laguna salada. El volumen anual de los aportes es igual al producto de la superficie de la laguna por la diferencia entre la lámina de agua de la evaporación potencial y de la pluviosidad. La precisión del balance es la misma que la de los datos meteorológicos que se encuentran en el Balance Hídrico de Chile y en los diversos Balances Hídricos Regionales.

- *Hidroquímica de las lagunas saladas.* Las lagunas superficiales de los salares constituyen verdaderos oasis que albergan ecosistemas complejos y variados, desde microorganismos que sirven de alimentos a los flamencos y otras aves, hasta mamíferos como vicuñas, guanacos y zorros, para los cuales los manantiales constituyen la única fuente de agua. Se propone entonces determinar la composición química de las principales lagunas de todos los salares para establecer la línea base de la calidad de las aguas, a objeto de evaluar efectos de casos de explotación de las napas subterráneas circundantes, o también en caso del establecimiento de faenas mineras en la cuenca.

3. Objetivos científicos

Gracias al gran número de análisis requeridos para cumplir con los objetivos aplicados, se puede dilucidar problemas de interés científico sobre el origen y el funcionamiento de estos salares.

- *Origen de las sales.* El término "sal" se refiere indistintamente a los componentes disueltos en las aguas diluidas y en las salmueras que derivan de ellas por evaporación, así también como a las sales que precipitan a partir de estas salmueras. Estos componentes pueden provenir de la alteración de rocas volcánicas y sedimentarias, de la redisolución de antiguas evaporitas, de la oxidación del azufre y de minerales sulfurados y de cuñas salinas. Se está dando un atención particular a la hidroquímica del arsénico, uno de los mayores contaminantes en el norte de Chile. Aquí cabe señalar una interacción con los objetivos aplicados. Si la alta salinidad de un agua de aporte proviene de una cuña salina, es probable que haya aguas de mejor calidad más arriba en la cuenca. Al contrario, si se establece que esta alta salinidad se debe a la redisolución de antiguas evaporitas por debajo de las formaciones volcánicas de la cuenca de drenaje, es probable que todo, o gran parte, de la napa subterránea de este sector de la cuenca sea afectado por esta contaminación natural.

- *Factores que controlan la hidrogeoquímica del salar.* Cada salar se caracteriza por un tipo de sal dominante: cloruro de sodio, sulfatos de sodio, sulfato de calcio... ¿ De dónde proviene esta variedad ? Para tratar este problema, un método consiste en simular la evaporación de las aguas de aporte según modelos informáticos basados en las leyes de la termodinámica. Se puede así comparar la evolución teórica de la composición química de las aguas con su evolución real.

Esta última se determina sacando un perfil de muestras de agua de concentración creciente desde las aguas de aporte hasta las salmueras más concentradas. Cualquier discrepancia entre la evolución teórica y la evolución real refleja una interacción entre soluciones y sedimentos no prevista por el modelo. Aquí también hay una relación con el monitoreo de los ambientes evaporíticos. La evaporación amplifica las interacciones entre las aguas diluidas y los sedimentos, las partículas eólicas, las sustancias antrópicas y otras. Una variación casi indetectable de la composición del agua inicial puede inducir cambios notorios en la composición de la salmuera final.

II. PRESENTACION DE LOS SALARES CHILENOS

Hay dos requisitos fundamentales para el establecimiento de ambientes evaporíticos:

- la evaporación potencial debe ser superior a la pluviosidad
- deben existir cuencas cerradas

La figura 1 presenta las isolíneas de precipitación y de evaporación potencial en el norte y centro de Chile. La figura 2 muestra la diferencia entre las precipitaciones y la evaporación. Un valor negativo indica un clima árido o semi-árido, mientras que un valor positivo corresponde a un clima húmedo. El límite pasa un poco más al sur de Santiago. Toda la parte del país ubicada al norte del límite cumple con la primera condición de existencia de salares o lagos salados. Sin embargo, el salar más meridional de Chile se encuentra mucho más al norte, a la altura de Copiapó (Laguna del Negro Francisco). Al sur de Copiapó, todas las cuencas son abiertas hacia el Pacífico. En la Cordillera chilena, las cuencas cerradas se encuentran solamente entre las latitudes de Arica y de Copiapó, es decir en las tres primeras Regiones. Hemos estudiado 52 cuencas cerradas cuyo listado y principales características morfológicas y climatológicas se encuentran en la tabla 1 y sus ubicaciones en las figuras 3, 4, 5 y 6.

1. Tipos de aportes a los salares y lagunas

Las salmueras y sales de los salares y lagunas saladas provienen de la evaporación de aguas de aporte. Por tanto, el estudio de un salar empieza en su cuenca de drenaje por el muestreo de sus aguas de aporte. De hecho, es el muestreo más importante para entender la hidroquímica y la geoquímica del salar. Se puede clasificar los aportes en cuatro tipos hidrológicos:

- las vertientes fluyentes (o manantiales corrientes) son salidas de agua bien localizadas donde el agua fluye visiblemente. Es posible medir su caudal. Se encuentran tanto en las orillas del salar como en las laderas de la cuenca. Puede existir varias vertientes fluyentes a lo largo de una orilla, muy cercanas una de la otra. Generalmente, tienen la misma composición química, y es suficiente muestrear una o dos para caracterizar el aporte por este lado de la cuenca.

- las vertientes difusas aportan aguas que escurren tan lentamente que no se puede apreciar su movimiento visualmente. No se observa una salida localizada, sino un escorrentía a lo largo de la orilla con una extensión que puede alcanzar varios cientos de metros. Muy raras veces se encuentran cuenca arriba. Es imposible medir un caudal. Cuando las aguas son diluidas, producen bofedales. Este tipo de vertiente es proclive a dos mecanismos de salinización:

= mezcla con una cuña salina del salar

= pre-evaporación a través de los sedimentos de la orilla. La napa subterránea, a muy poca profundidad, se evapora por capilaridad, se concentra y deposita sales eflorescentes a lo largo de la orilla.

- los ríos y riachuelos provienen de la unión de aguas de varias vertientes. No son muy comunes en zonas áridas, y son siempre de bajo caudal (unos litros a unos centenares de litros por segundo) en relación a los ríos de zonas húmedas. En muchos casos, se infiltran cuenca arriba alimentando napas subterráneas que se descargan luego en vertientes a las orillas del salar.

- las napas subterráneas constituyen las principales reservas de agua en los Andes del norte de Chile. Lastimosamente, son también las aguas más difíciles de muestrear. De hecho, las vertientes son los únicos puntos, muy escasos, de afloramiento de las napas. Para obtener muestras más representativas, hay que realizar costosos sondeos. Cerca de los bordes del salar, se puede alcanzar la napa por cateos o drenes.

2. Tipos de lagunas

Se puede distinguir tres tipos de lagunas en las cuencas del norte de Chile:

- las lagunas relativamente profundas (unos metros a unas decenas de metros), con fondo impermeable, se ahondan progresivamente del borde al centro y ocupan toda la depresión central de la cuenca (Lago Chungará, Lagunas Miscanti, Miñique, Laguna Verde). Su extensión no varía mucho a lo largo del año y su composición química es casi homogénea debido a los vientos que mezclan las aguas.

- las lagunas someras de unos centímetros hasta unos decímetros sobre la superficie del salar provienen de vertientes en la orilla. Su extensión es muy variable e irregular; hasta pueden secarse. La intensa evaporación produce un gradiente de salinidad muy marcado en el sentido de la escorrentía.

- los "ojos" provienen de la disolución de una costra de sal por aguas diluidas. Sus bordes son verticales o muy empinados, y sus profundidades pueden alcanzar varios metros. De hecho, se trata del afloramiento de la napa de salmuera que llena la porosidad de toda la costra. (Ejemplos: Imilac, Pedernales, Gorbea).

3. Tipos de salares

En el norte de Chile, la altura media de precipitación pasa de algunos mm/año en la costa y el Valle Central hasta unos 300 mm/año en la Cordillera de los Andes. La evaporación potencial varía de 1000 a 2500 mm/año, esencialmente en función de la altura. Debido a este gradiente de aridez, existen dos grandes grupos de salares:

- los salares de la costa y del Valle Central. Son salares inactivos, fósiles, con costras de sales muy secas. Aquí se encuentran los yacimientos de nitratos y yodo.

- los salares de la Cordillera de los Andes. Son actualmente activos. Reciben aportes de agua de su cuenca de drenaje que se concentran por evaporación en lagunas superficiales donde precipitan sales evaporíticas.

No es el objetivo de este estudio describir los sedimentos y sales de cada salar y proponer una clasificación morfológica. Para eso, remitimos el lector a los trabajos de Stoertz y Ericksen

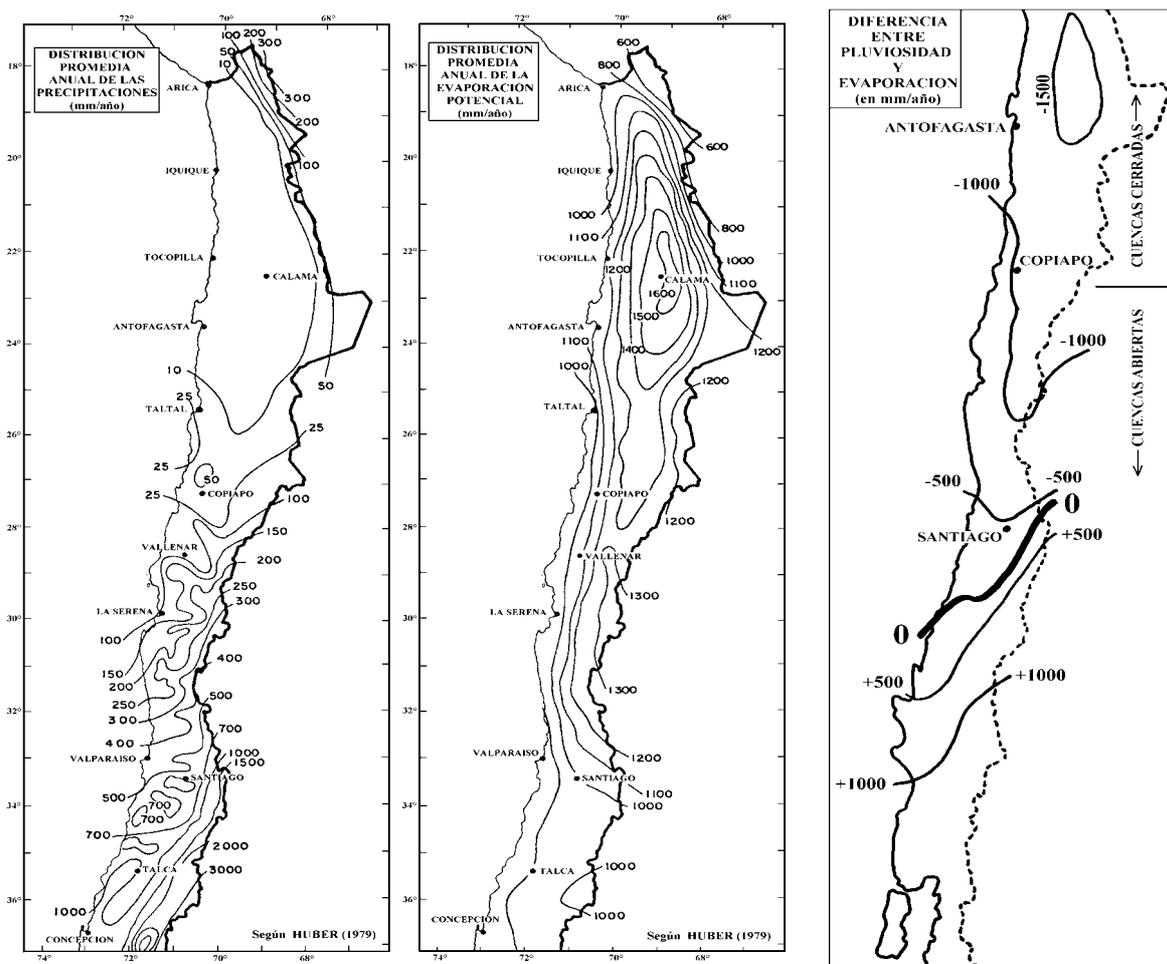
(1974) y de Chong (1984). En muy resumidas cuentas, se puede distinguir dos tipos de salares activos en la Cordillera:

- las costras de sales, porosas y permeables, contienen salmueras intersticiales, al contrario de las costras secas del Valle Central. Se trata de halita (NaCl) o de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). Se encuentran en la pre-Cordillera, a alturas inferiores a 3500 m. Como ejemplos, podemos nombrar los salares de Atacama, de Punta Negra, de Imilac, de Pedernales.

- los salares de tipo "playa" están constituidos de sedimentos salinos finos y casi impermeables sobre los cuales se extienden lagunas someras de extensión muy variable. A dentro de los sedimentos, entre unos decímetros y unos metros de profundidad, se encuentra una napa cautiva de salmuera sin conexión con las lagunas superficiales. Estos salares se encuentran en el Altiplano o en la alta Cordillera.

Varios salares son combinaciones complejas de estos dos tipos. Por ejemplo, el salar de Atacama está constituido de un núcleo de halita rodeada por una zona de limos salinos.

Fig.1: Isolíneas de precipitación y evaporación anuales en Chile (mm/año) **Fig.2:** Diferencias entre precipitaciones y evaporación potencial (mm/año)



CUENCA	CODIGO	UTM	UTM	ALT	ALT	TEMP	PREC	EVAP	STD	STD	AREA	AREA	AREA
		Este	Norte	Salar m	max m	media °C	mm/año	mm/año	min mg/l	max mg/l	Cuenca km ²	Salar km ²	Agua km ²
LAGUNAS COTACOTANI	COT	476988	7989400	4495	6342	1,9	379	1070	299	2002	119	6	6
LAGO CHUNGARA	CHR	483291	7980141	4530	6342	1,9	338	1230	47	1633	273	22,5	22,5
RIO LAUCA	LAA	478618	7960094	3892	6063	4,2	370	1200	108	784	2374	--	--
SALAR DE SURIRE	SUR	493409	7917016	4260	5780	2,7	250	1280	108	285000	574	144	9,5
SALAR DE PINTADOS	PIN	453522	7758321	980	5785	18,5	75	1630	199	365621	17150	377	0
LAGUNA LAGUNILLA	LGU	517041	7796703	3900	5190	4,6	150	1490	267	1276,0	129	0,2	0,15
SALAR DEL HUASCO	HCO	517286	7765144	3778	5190	5	150	1260	108	113093	1572	51	2,5
SALAR DE COPOSA	COP	533931	7711945	3730	5220	5	150	1300	119	330671	1116	85	5
SALAR DE MICHINCHA	MIC	545339	7679482	4125	5407	3,5	200	1620	94	62662	282	2,5	0,6
SALAR DE ALCONCHA	ALC	554862	7672107	4250	5407	3,5	200	1620	116	99361	128	3,8	0,75
SALAR DE CARCOTE	CAR	563834	7637546	3690	6176	5,8	125	1630	88	335536	561	108	3,5
SALAR DE ASCOTÁN	ASC	575486	7614623	3716	6023	5,8	125	1630	89	119853	1757	243	18
SALAR DE ATACAMA	ATA	593694	7442346	2300	6233	14	160	1800	243	339719	18100	3000	12,6
SALAR DE TARA	TAR	675975	7452204	4400	5816	0	150	1500	287	176486	2035	48	14
LAGUNA HELADA	HEL	692370	7447393	4300	5745	0	180	1500	118	308546	221	5,8	5,8
SALAR DE AGUAS CALIENTES 1	AC1	662575	7441846	4280	5370	1	150	1500	1359	122890	281	15	2,5
SALAR DE PUJSA	PSA	651100	7436725	4500	6046	1	150	1500	239	57578	634	18	5
SALAR DE LOYOQUES	LOY	675318	7427992	4150	5370	1	150	1500	163	242456	676	80	5
LAGUNA CHIVATO MUERTO	MUE	659275	7406975	4295	5109	0	200	1500	30916	97153	41	0,03	0,03
LAGUNA TRINCHERA	TRI	663325	7411400	4290	5060	0	200	1500	10830	10830	59	0,4	0,3
SALAR DE AGUAS CALIENTES 2	AC2	646508	7403746	4200	6046	1	150	1500	2530	13656	1168	134	9
LAGUNA LEJIA	LEJ	633488	7400550	4325	5924	1	150	1500	1273	70723	193	1,9	1,9
LAGUNA MISCANTI	MIS	625429	7374603	4120	5910	2	180	1500	217	5308	303	13,4	13,4
LAGUNA MIÑIQUE	MIN	623206	7371481	4120	5910	2	180	1500	3702	10912	27,5	1,6	1,6
SALAR DE LACO	LAC	660756	7362469	4250	5852	1	200	1500	636	24433	306	16,2	2,2
LAGUNA TUYAJTO	TUY	643875	7350675	4010	5852	1	180	1500	6572	131024	245	2,9	2,9
SALAR DE AGUAS CALIENTES 3	AC3	632834	7349378	3950	5910	1	150	1500	2491	25150	476	46	2,5

Tabla 1 (parte 1) : Características morfométricas y climatológicas de las cuencas cerradas del norte de Chile.

Los parámetros climáticos provienen del Balance Hídrico de Chile (DGA, 1987). La evaporación potencial medida en tanques evaporimétricos ha sido multiplicada por un coeficiente de embalse de 0,65 (Grilli et al., 1986). STD min y STD max son respectivamente la salinidad mínima y la salinidad máxima de las aguas encontradas en cada cuenca. El área de la cuenca corresponde a la superficie total : cuenca de drenaje y salar o laguna. El área del salar incluye las zonas secas (costras, playas) y las lagunas.

CUENCA	CODIGO	UTM	UTM	ALT	ALT	TEMP	PREC	EVAP	STD	STD	AREA	AREA	AREA
		Este	Norte	Salar m	max m	media °C	mm/año	mm/año	min mg/l	max mg/l	Cuenca km ²	Salar km ²	Agua km ²
SALAR DE CAPUR	CPR	624935	7353513	3950	5204	1	150	1500	6589	221804	137	27	0,9
SALAR DE IMILAC	IMI	521907	7325394	2949	3995	10	40	2000	565	90008	189	9,8	0,16
SALAR DE PUNTA NEGRA	PUN	511106	7275008	2945	6739	10	150	2000	196	233367	4263	250	0,1
SALAR DE AGUAS CALIENTES 4	AC4	537580	7236345	3665	6739	2	180	1630	851	341759	656	19,5	2
LAGUNA DE LA AZUFRETA	LAZ	548717	7225880	4250	5697	1	180	1630	3965	158854	393	7,7	3,5
SALAR DE PAJONALES	PAJ	515403	7220693	3537	5488	5	115	1350	11728	246674	1984	104	1,4
SALAR DE LA AZUFRETA	AZU	518310	7183345	3580	5488	3	120	1100	548	323473	214	3,3	0,02
SALAR DE AGUA AMARGA	AMA	516060	7173674	3558	5488	2	120	1100	7656	196672	863	23	0,04
SALAR DE GORBEA	GOR	534670	7190829	3950	5467	-1	140	1000	2846	296737	324	27	0,5
SALAR IGNORADO	IGN	537952	7180342	4250	5100	-2	140	1000	4043	97091	37,5	0,7	0,002
SALAR DE AGUILAR	AGI	508435	7141896	3320	5058	2	100	1100	177044	334882	589	71	0,0002
SALAR DE LA ISLA	ISL	535415	7159675	3950	5761	0	130	1000	6229	329693	858	152	2,4
SALAR DE LAS PARINAS	PAR	548733	7147213	3987	5761	0	140	1000	8907	333942	676	40	1,2
SALAR DE INFIELES	INF	495580	7127810	3520	5012	2	100	1100	1677	318744	293	6,7	0
SALAR GRANDE	GRA	527206	7121454	3950	5664	-2	130	1000	8277	129707	867	29	0,4
SALAR DE PEDERNALES	PED	489015	7079456	3370	6127	4	125	1200	85	326745	3620	335	0,6
SALAR DE LA LAGUNA	LGN	504447	7100302	3494	5373	3	120	1100	3288	20430	400	0,55	0,4
SALAR DE PIEDRA PARADA	PIE	524179	7086088	4150	5857	-2	140	1000	2908	82327	388	28	0,2
LAGUNAS DEL JILGUERO	JIL	533586	7081520	4150	6127	-2	140	1000	2925	19592	119	3,4	1,5
LAGUNAS BRAVAS	BRA	538885	7092780	4250	6080	-2	140	1000	2134	121494	545	10	10
LAGUNA DEL BAYO	BAY	541386	7081331	4250	6127	-2	140	1000	2432	4785	221	1,2	1,2
SALAR DE WHEELWRIGHT	WHE	537144	7047020	4220	6146	1	140	1000	1466	158739	466	6,3	4
LAGUNA ESCONDIDA	ESC	548431	7052360	4353	5918	-1	140	1000	2318	32315	194	3,8	3,5
SALAR DE MARICUNGA	MAR	492048	7008553	3760	6893	2	120	1100	144	331453	3045	145	6
LAGUNA VERDE	LAV	552857	7027152	4350	6893	1	170	1000	935	174581	1075	15	15
LAGUNA DEL NEGRO FRANCISCO	FRA	479723	6958882	4110	6052	-1	200	1000	130	327885	933	24,8	24,8

Tabla 1 (parte 2) : Características morfométricas y climatológicas de las cuencas cerradas del norte de Chile.

Los parámetros climáticos provienen del Balance Hídrico de Chile (DGA, 1987). La evaporación potencial medida en tanques evaporimétricos ha sido multiplicada por un coeficiente de embalse de 0,65 (Grilli et al., 1986). STD min y STD max son respectivamente la salinidad mínima y la salinidad máxima de las aguas encontradas en cada cuenca. El área de la cuenca corresponde a la superficie total : cuenca de drenaje y salar o laguna. El área del salar incluye las zonas secas (costras, playas) y las lagunas.

Fig.3 : Cuencas cerradas del Norte de Chile.

- 1 Lagunas Cotacotani
- 2 Lago Chungará
- 3 Río Lauca
- 4 Salar de Surire
- 5 Salar de Pintados
- 6 Laguna Lagunilla
- 7 Salar del Huasco
- 8 Salar de Coposa
- 9 Salar de Michincha
- 10 Salar de Alconcha
- 11 Salar de Carcote
- 12 Salar de Ascotan
- 13 Salar de Atacama
- 14 Salar de Tara
- 15 Laguna Helada
- 16 Salar de Aguas Calientes 1
- 17 Salar de Pujsa
- 18 Salar de Loyoques
- 19 Lag. Trinchera / Chivato Muerto
- 20 Salar de Aguas Calientes 2
- 21 Laguna Lejía
- 22 Laguna Miscanti
- 23 Laguna Miñiques
- 24 Salar del Laco
- 25 Laguna Tuyajto
- 26 Salar de Aguas Calientes 3
- 27 Salar de Capur
- 28 Salar de Imilac
- 29 Salar de Punta Negra
- 30 Salar de Aguas Calientes 4
- 31 Laguna de la Azufrera
- 32 Salar de Pajonales
- 33 Salar de Gorbea
- 34 Salar Ignorado
- 35 Salar de la Azufrera
- 36 Salar de Agua Amarga
- 37 Salar de Aguilar
- 38 Salar de La Isla
- 39 Salar de las Parinas
- 40 Salar Grande
- 41 Salar de los Infieles
- 42 Salar de Pedernales
- 43 Salar de la Laguna
- 44 Salar de Piedra Parada
- 45 Lagunas Bravas
- 46 Lagunas del Jilguero
- 47 Laguna del Bayo
- 48 Salar de Wheelwright
- 49 Laguna Escondida
- 50 Laguna Verde
- 51 Salar de Maricunga
- 52 Laguna del Negro Francisco

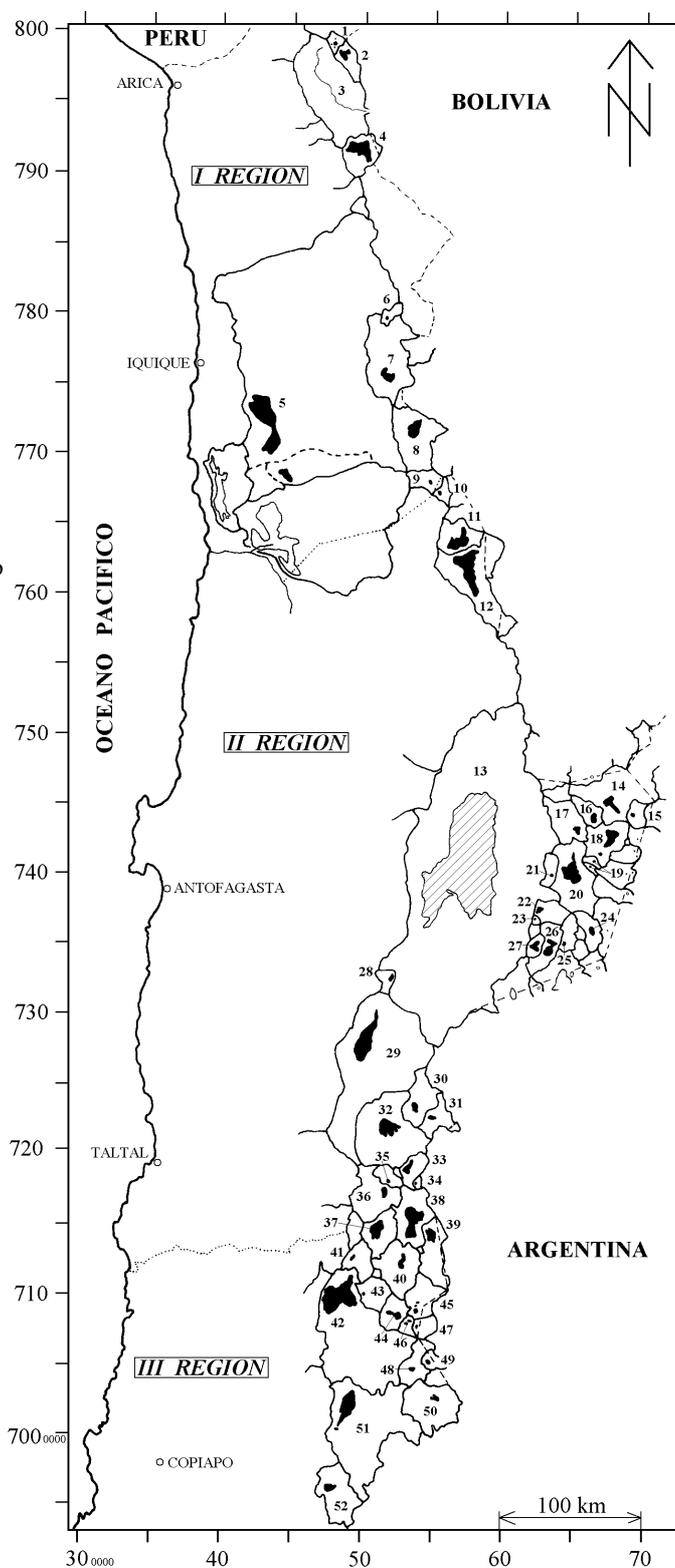
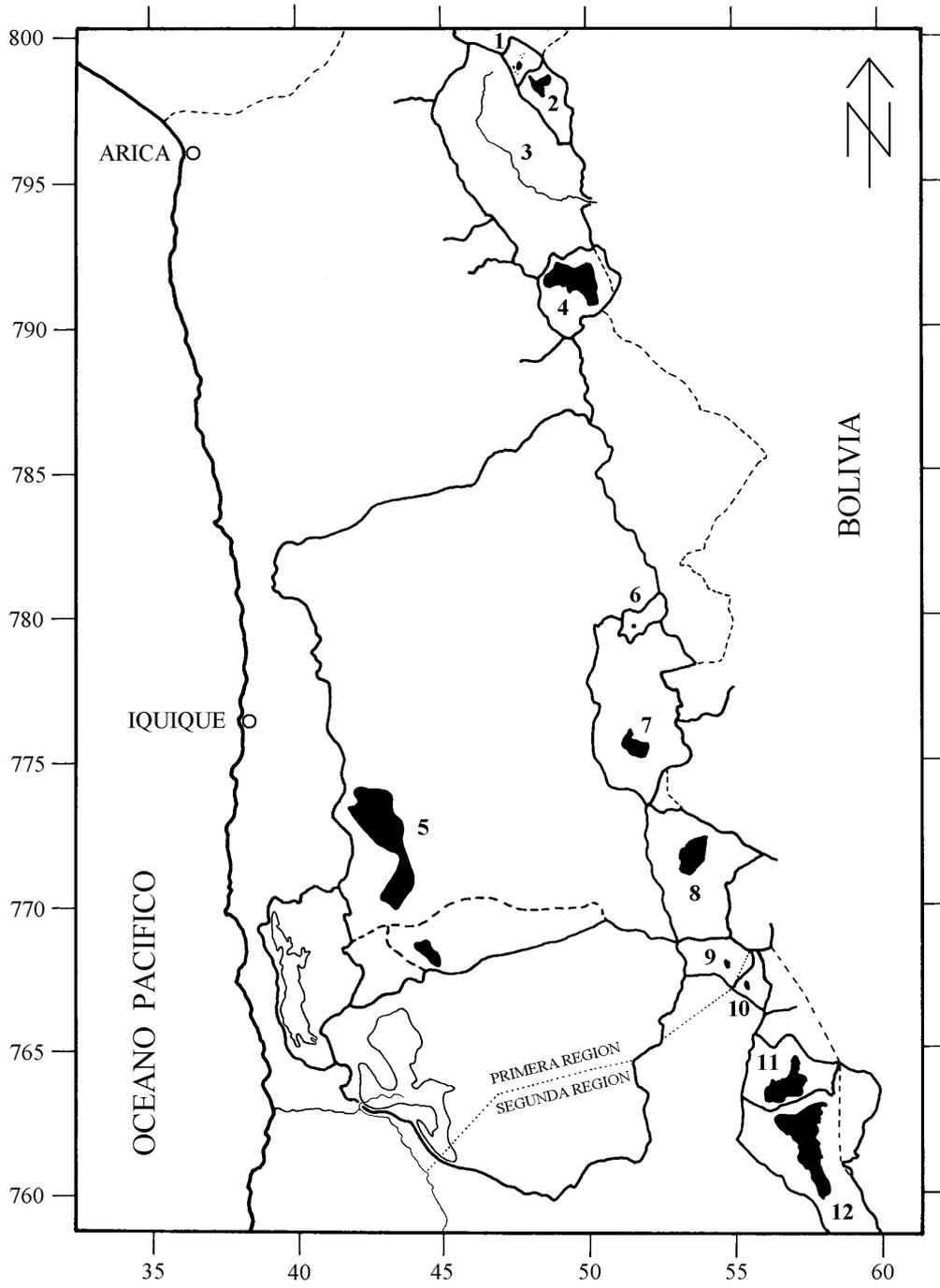


Fig.4 : Cuencas de la Primera Región



- | | | | |
|---|--------------------|----|--------------------|
| 1 | Lagunas Cotacotani | 7 | Salar del Huasco |
| 2 | Lago Chungará | 8 | Salar de Coposa |
| 3 | Río Lauca | 9 | Salar de Michincha |
| 4 | Salar de Surire | 10 | Salar de Alconcha |
| 5 | Salar de Pintados | 11 | Salar de Carcote |
| 6 | Laguna Lagunilla | 12 | Salar de Ascotan |

Fig.5 : Cuencas de la Segunda Región

- 9 Salar de Michincha
- 10 Salar de Alconcha
- 11 Salar de Carcote
- 12 Salar de Ascotan
- 13 Salar de Atacama
- 14 Salar de Tara
- 15 Laguna Helada
- 16 Salar de Aguas Calientes 1
- 17 Salar de Pujsa
- 18 Salar de Loyoques
- 19 Lag. Trinchera / Chivato Muerto
- 20 Salar de Aguas Calientes 2
- 21 Laguna Lejia
- 22 Laguna Miscanti
- 23 Laguna Miñiques
- 24 Salar del Laco
- 25 Laguna Tuyajto
- 26 Salar de Aguas Calientes 3
- 27 Salar de Capur
- 28 Salar de Imilac
- 29 Salar de Punta Negra
- 30 Salar de Aguas Calientes 4
- 31 Laguna de la Azufrera
- 32 Salar de Pajonales
- 33 Salar de Gorbea

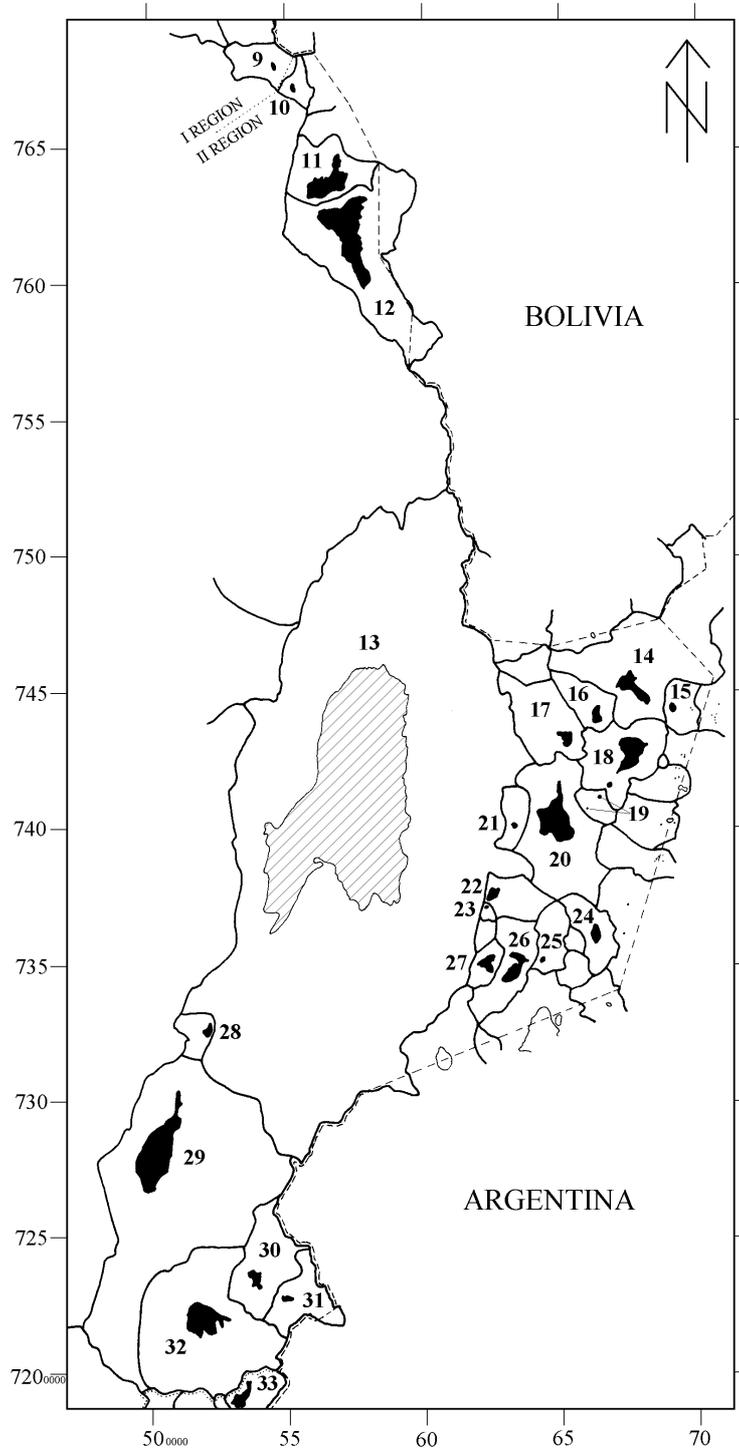
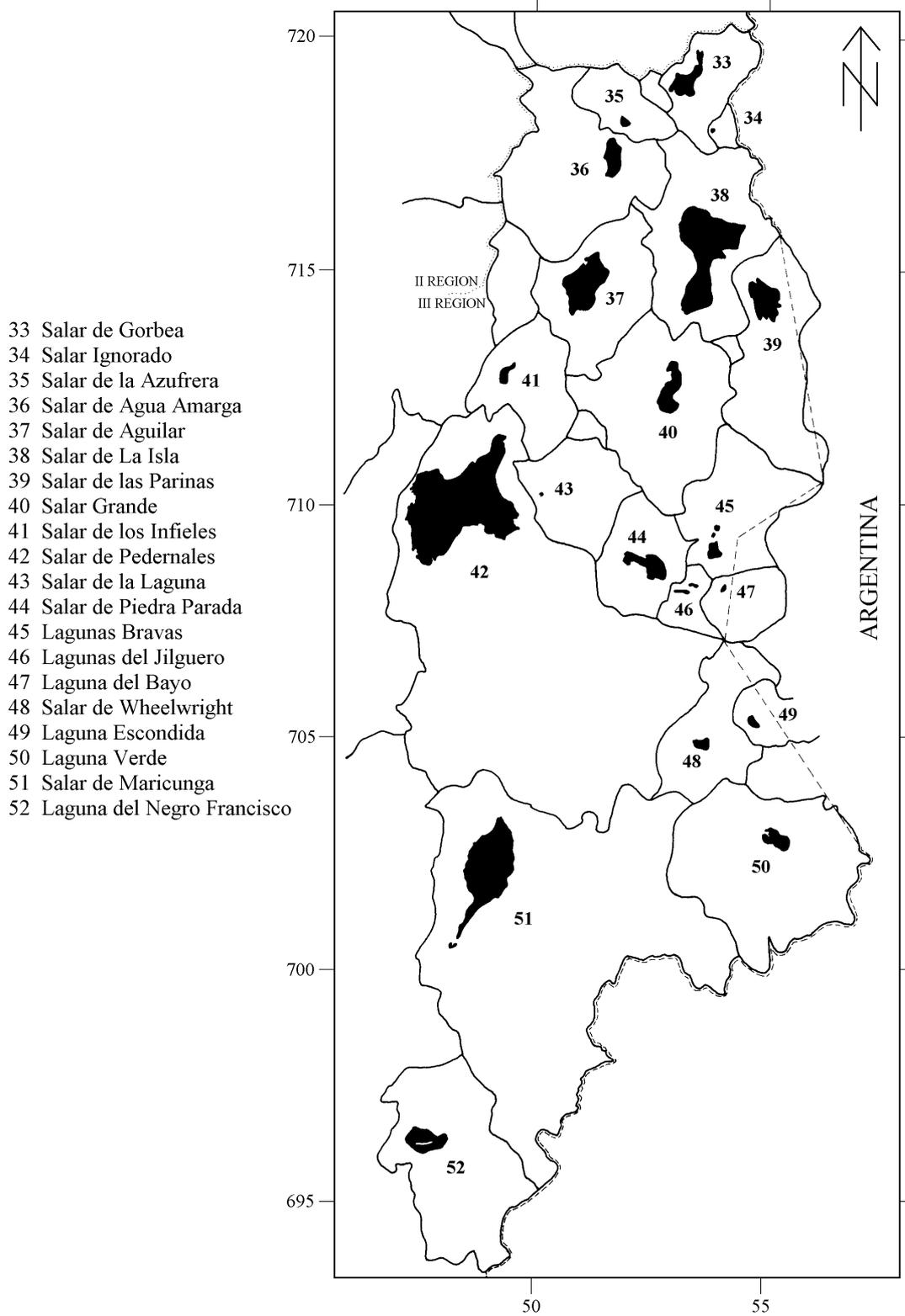


Fig.6 : Cuencas de la Tercera Región



III. DESCRIPCIÓN DE LAS CAMPAÑAS DE TERRENO

1. Primera campaña: salar de Atacama, II Región

Fecha: 30/05/93 al 4/06/93

Participantes: UCN y ORSTOM

Apoyo externo: ninguno

Vehículos: UCN (1)

Alojamiento: hostería San Pedro de Atacama

Análisis: laboratorio del Departamento de Química de la UCN.

Se muestrearon los 18 aportes superficiales más importantes al salar, los que se encuentran en los bordes norte y este de la cuenca. No se contempló el estudio hidroquímico del salar mismo. Debido a su gran interés económico, el salar de Atacama ha sido estudiado en detalle desde el año 1968. Recientes estudios de empresas mineras que explotan su salmuera, no son de uso público. Se puede mencionar dos trabajos principales en el aspecto hidroquímico. El primero es el de Moraga et al. (1974) que contiene 203 análisis de aguas del salar. El otro trabajo trata de la ubicación del núcleo por Ide (1978) donde se puede encontrar 388 análisis de las salmueras del núcleo. Una buena parte de esos muestreos fueron hechos mediante campañas en helicóptero y por sondeos. Por lo tanto, no se justificaba proseguir el estudio de las aguas del salar de Atacama mismo. Sin embargo, se presentó alguna dificultad en encontrar análisis a la vez completos y fiables de las aguas de aporte al salar, es decir las más diluidas de las vertientes de la cuenca.

2. Segunda campaña: salares del Altiplano de la II Región

Fecha: 05/10/93 al 15/10/93

Participantes: UCN y ORSTOM

Apoyo externo: I División de Ejército

Vehículos: Ejército (2)

Alojamiento: Campamento en ex boratera de salar de Loyoques y en escuela de Socaire.

Análisis: Laboratorio del Centro de Geoquímica de la Superficie de Estrasburgo, Francia.

El Altiplano de la II Región se extiende al este del salar de Atacama entre 4000 y 6000 m de altura. Es una zona de elevados volcanes que delimitan numerosas pequeñas cuencas cerradas ocupadas por lagunas y salares. Se reconoció 15 lagunas y salares:

- | | | |
|------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| - salar de Tara | - laguna El Chivato Muerto | - laguna Meñique |
| - laguna Helada | - laguna Trinchera | - salar de Aguas Calientes 3 |
| - salar de Aguas Calientes 1 | - salar de Aguas Calientes 2 | - salar de Talar |
| - salar de Pujsa | - laguna Lejía | - laguna Tuyajto |
| - salar de Loyoques | - laguna Miscanti | - salar de Laco |

Se recogió 60 muestras de aguas y salmueras.

3. Tercera campaña: salares de Punta Negra e Imilac, II Región

Fecha: 23/05/94 al 01/06/94

Participantes: UCN, DGA, ORSTOM

Apoyo externo: Minera Escondida

Vehículos: UCN (1)

Alojamiento: campamento Compañía Minera Escondida

Análisis: Laboratorio Ambiental DGA

Dos salares fueron estudiados en los cuales se extrajeron 24 muestras de aguas en el salar de Punta Negra y 9 en el salar de Imilac. Además se obtuvo otras 4 de aguas de aporte en el borde sur del salar de Atacama, lo que completó el muestreo de la primera campaña. El monitoreo de las aguas de estos salares es realizado de manera permanente por la Compañía Minera Escondida como parte de su programa de gestión ambiental.

4. Cuarta campaña: Pozos de salar de Ascotán, II Región

Fecha: 30/06/94 al 03/07/94

Participantes: UCN y ORSTOM

Apoyo externo: Codelco Chile, División Chuquicamata

Vehículos: ORSTOM (1)

Alojamiento: Campamento Pampa Perdiz (Codelco)

Análisis: Laboratorio Ambiental DGA

Esta corta campaña tuvo por finalidad el muestreo de los recién perforados pozos de agua de Codelco - Chuquicamata antes de su sellado con las bombas y tuberías. Se sacó 12 muestras de agua de pozos y en algunos de los manantiales vecinos.

5. Quinta campaña: salares de Ascotán y Carcote, II Región

Fecha: 04/10/94 al 12/10/94

Participantes: UCN, DGA, ORSTOM

Apoyo externo: Codelco Chile, División Chuquicamata

Vehículos: ORSTOM (1)

Alojamiento: Campamento Ascotán (Codelco)

Análisis: Laboratorio Ambiental DGA

En esta campaña, fueron colectadas 34 muestras de aguas del salar de Ascotán y 24 del salar de Carcote. De la cuenca de Ascotán se extrae agua para uso en la explotación del mineral de El Abra en el cual Codelco Chile tiene importante participación. Debido a la fragilidad de los ecosistemas de los salares andinos, el manejo de esos recursos hídricos ha obligado a esas empresas a una cuidadosa política de gestión para cumplir la legislación ambiental aplicable.

6. Sexta campaña: salares del sector sur de la III Región

Fecha: 08/05/95 al 22/05/95

Participantes: UCN, DGA, ORSTOM

Apoyo externo: Minera Mantos Blancos

Vehículos: ORSTOM (1) y DGA (1)

Alojamiento: Campamento Mina Marte (Mantos Blancos)

Análisis: Laboratorio Ambiental DGA

Tres salares fueron reconocidos:

- Salar de Maricunga con 27 muestras
- Laguna del Negro Francisco con 17 muestras
- Laguna Verde con 6 muestras

Aquí también se explota napas alrededor del salar de Maricunga, lo que podría tener algún efecto sobre la laguna Santa Rosa, apéndice sur del salar. Proyectos de aprovechar las napas de la cuenca de la laguna del Negro Francisco podrían llevar a un monitoreo más sistemático de las aguas de la laguna.

Esta campaña fue interrumpida por una fuerte nevada que nos inmovilizó durante cuatro días en el campamento. No se pudo seguir con el estudio del salar de Pedernales que había sido programado en esta campaña.

7. Séptima campaña: salar de Surire, I Región

Fecha: 07/08/95 al 16/08/95

Participantes: UCN, DGA, ORSTOM

Apoyo externo: Conaf y Compañía Minera Quiborax

Vehículos: ORSTOM (1) y DGA (1)

Alojamiento: Campamento Conaf en salar de Surire

Análisis: Laboratorio Ambiental DGA

Se tomó 24 muestras de aguas en el salar de Surire y otras 2 en la pequeña laguna Paquisa al norte del salar. El salar de Surire es un área silvestre protegida controlada por Conaf, que cuenta con una fauna variada y abundante, especialmente de camélidos. Es recomendable por tanto que sus aguas sean monitoreadas de manera programada. Esta campaña fue interrumpida por el volcamiento del vehículo de ORSTOM en el salar de Surire. Las lagunas Cotacotani y Chungará no pudieron ser estudiadas como estaba previsto haciéndolo posteriormente en la décima campaña.

8. Octava campaña: salares del sector central de la III Región

Fecha: 03/11/95 al 22/11/95

Participantes: DGA, UCN, ORSTOM

Apoyo externo: Codelco Chile, División El Salvador

Vehículos: ORSTOM (1) y DGA (2)

Alojamiento: Campamento La Ola (Codelco)

Análisis: Laboratorio del Centro de Geoquímica de la Superficie de Estrasburgo (CGS), Francia.

En esta campaña se estudió 8 lagunas y salares:

- Salar de Pedernales
- Salar de los Infieles
- Salar de La Laguna
- Salar de Piedra Parada
- Lagunas Bravas
- Lagunas del Jilguero
- Laguna del Bayo
- Salar Grande

Se extrajeron 79 muestras, siendo Pedernales el salar más importante con 30 de ellas. Esta campaña se caracterizó por la dificultad de acceso en varios de los salares y lagunas. No hay yacimientos mineros del tamaño de las Regiones Primera y Segunda, por tanto no presenta un buen desarrollo de carreteras. Los caminos muchas veces son simples huellas. Esta campaña ocupó mayor tiempo a fin de recuperar el tiempo perdido por los percances sufridos en las dos campañas anteriores.

9. Novena campaña: salares del sector norte de la III Región

Fecha: 13/03/96 al 29/03/96

Participantes: DGA, UCN, ORSTOM

Apoyo externo: ninguno

Vehículos: ORSTOM (1) y DGA (2)

Alojamiento: Campamento minero abandonado Hoschild en salar de la Azufrera

Análisis: Laboratorio Ambiental DGA con apoyo del Laboratorio CGS de Estrasburgo (SO₄)

En esta campaña se estudió 9 lagunas y salares:

- Salar de La Isla
- Salar de las Parinas
- Salar de la Azufrera
- Salar de Agua Amarga
- Laguna de la Azufrera
- Salar de Gorbea
- Salar Ignorado
- Salar de Pajonales
- Salar de Aguas Calientes 4

Se extrajo 81 muestras. El acceso a esos salares fue notablemente más fácil que en la misión anterior, aunque por no haber ninguna mina en actividad en la zona, la posible ayuda logística estaba muy reducida. Nos alojamos en un campamento abandonado (dos containers) de la empresa Hoschild a la orilla del salar de la Azufrera. Existen dos otras posibilidades de alojamiento: las cuevas en Plato de Sopa también a la orilla del salar de la Azufrera; o el campamento abandonado de la boratera del salar de Aguas Calientes 4. Se llega a este salar por un nuevo y excelente camino que no aparece en ningún mapa y que cruza el salar de Pajonales.

10. Décima campaña: Lagunas del norte de la I Región

Fecha: 27/05/96 al 31/05/96

Participantes: DGA, UCN, ORSTOM

Apoyo externo: Conaf

Vehículos: DGA (1)

Alojamiento: Hostería en Putre

Análisis: Laboratorio Ambiental DGA con apoyo del Laboratorio CGS de Estrasburgo (SO₄)

En esta campaña se estudió 2 lagunas y el Río Lauca:

- Lagunas Cotacotani
- Lago Chungará
- Río Lauca

Se extrajó 20 muestras. Se llega muy fácilmente a las lagunas Cotacotani y al Lago Chungará por el camino asfaltado internacional de Arica a Bolivia. Sin embargo, hay muy pocos caminos de tierra que permiten acercarse a las numerosas lagunitas de Cotacotani. Se sacó seis muestras (las más representativas) de la cuenca chilena del río Lauca. Aunque esta cuenca constituye una pequeña parte de la gran cuenca del salar boliviano de Coipasa, su importancia como reserva de agua para esa zona nos indujo a incluirla en el estudio. Se aprovechó esta misión para sacar dos muestras complementarias del salar de Surire cuyo estudio fue interrumpido el año anterior por un accidente automovilístico.

11. Undécima campaña: salares del sector sur de la I Región

Fecha: 28/08/96 al 13/09/96

Participantes: DGA, UCN, ORSTOM

Apoyo externo: ninguno

Vehículos: ORSTOM (1) y DGA (1)

Alojamiento: Hostería en Pica

Análisis: Laboratorio Ambiental DGA con apoyo del Laboratorio CGS de Estrasburgo (SO₄)

En esta campaña se estudió 3 salares:

- Salar de Pintados
- Salar del Huasco
- Laguna Lagunillas

Se extrajó 68 muestras de las cuales 40 corresponden al salar de Pintados. El programa inicial de esta misión abarcaba los salares del Huasco, Lagunillas, Coposa, Michincha y Alconcha. El primer día cayó una fuerte nevada en toda la cordillera norte imposibilitando el acceso a estos salares, lo que nos obligó a modificar el programa de trabajo. Se decidió entonces proceder al estudio de la cuenca del gran salar de Pintados en el Valle Central. Una vez acabado el trabajo en

Pintados y derretida la nieve, se pudo estudiar el Huasco y Lagunillas, quedando pendientes Coposa, Michincha y Alconcha las que se hicieron posteriormente en la trigésima campaña.

12. Duodécima campaña: salares de difícil acceso de la III Region

Fecha: 2/12/96 al 12/12/96

Participantes: DGA, UCN, ORSTOM

Apoyo externo: Codelco Chile, División El Salvador

Vehículos: ORSTOM (1) y DGA (1)

Alojamiento: Carpa y campamento Juncalito (Codelco, El Salvador)

Análisis: Laboratorio CGS de Estrasburgo

En esta campaña se estudió 3 salares:

- Salar de Aguilar
- Salar de Wheelwright
- Laguna Escondida

Son los tres salares de más difícil acceso que hemos encontrado en el norte de Chile. Es posible llegar a Aguilar bajando por la quebrada sur-oeste a partir del llano los Conitos. Al detener los vehículos antes de llegar a la orilla se continúa a pie, aprovechando antiguas huellas hasta el borde del salar. El camino para llegar en vehículo hasta Wheelwright sale por el norte de Laguna Verde, bordea el cerro Laguna Verde por el este y sigue por la quebrada del Camino. A 10 km del salar hay una fuerte bajada que no se puede remontar en vehículo para regresar. Para retornar, hay que subir 2,5 km por una quebrada hacia el norte, doblar al este para bordear el cerro Laguna Escondida por su ladera sur y después bajar por una quebrada hacia el sur y retomar el camino de ida. La laguna Escondida es inaccesible en vehículo. Se podría llegar en moto todo terreno por el lado argentino. Hemos bajado a pie por una quebrada al sur de la laguna. Para los tres salares es imprescindible un par de buenos vehículos de doble tracción. Se extrajeron 18 muestras de agua: 3 en Aguilar, 9 en Wheelwright y 6 en Escondida.

13. Trigésima campaña: salares del sur de la I Region y de la II Region

Fecha: 7/04/97 al 20/04/97

Participantes: DGA, UCN, ORSTOM

Apoyo externo: Empresa Minera Doña Inés de Collahuasi

Vehículos: ORSTOM (1) y DGA (1)

Alojamiento: Campamento Minero Collahuasi (I Region) y alojamiento en Toconao (II Region)

Análisis: Laboratorio Ambiental DGA con apoyo del Laboratorio CGS de Estrasburgo (SO₄)

En esta campaña estudiamos los últimos salares que quedaban pendientes del programa Geoquímica de Aguas en Cuencas Cerradas.

- Salar de Coposa (I Region)
- Salar de Michincha (I Region)

- Salar de Alconcha (II Region)
- Salar de Capur (II Region)

El límite entre las Regiones I y II pasa justo entre Michincha y Alconcha. Por su parte, Capur es un salar del Altiplano de la II Región al sur-este del salar de Atacama y que aparece a veces con el nombre de Talar en algunos mapas. Se recogieron 55 muestras de agua : 24 en Coposa, 14 en Michincha, 10 en Alconcha y 7 en Capur.

IV. METODOS DE ANALISIS

<u>Análisis realizados in situ:</u>		Unidad
Temperatura	termómetro de mercurio, termocupla con equipo digital	°C
Conductividad	conductímetro digital "WTW" con celda de 1 cm	µmhos/cm
Oxígeno disuelto	oxímetro digital "WTW"	mg/l O ₂
pH	pH-metros digitales Tacussel o Philips con electrodo combinado	

Análisis realizados en laboratorio:

	Laboratorio Ambiental DGA	CGS Estrasburgo UCN Antofagasta	
Densidad	picnómetro	picnómetro	g/ml
Alcalinidad	titulación potenciométrica	titulación potenciométrica	meq/l H ⁺
Cloruro	titulación complexométrica	cromatografía iónica	mg/l Cl
Sulfato	turbidimetría	cromatografía iónica	mg/l SO ₄
Nitrato	-----	cromatografía iónica colorimetría automatizada con sulfanilamida después de reducir a nitrito	mg/l NO ₃

Yodo	-----	Colorimetría automatizada del yodo como catalizador de la reacción redox $Ce^{IV} \leftrightarrow As^{III}$	mg/l I
Boro	colorimetría con azometina	colorimetría con azometina auto-analisador en CGS	mg/l B
Silicio	colorimetría con molibdato	colorimetría con molibdato auto-analisador en CGS	mg/l Si
Arsénico	espectrometría de absorción atómica, generación de hidruro	-----	mg/l As
Sodio	fotometría emisión	espectrometría de absorción atómica, llama	mg/l Na
Potasio	fotometría emisión	espectrometría de absorción atómica, llama	mg/l K
Litio	espectrometría de absorción atómica, llama	espectrometría de absorción atómica, llama	mg/l Li
Calcio	espectrometría de absorción atómica, llama	espectrometría de absorción atómica, llama	mg/l Ca
Magnesio	espectrometría de absorción atómica, llama	espectrometría de absorción atómica, llama	mg/l Mg

V. ANTECEDENTES GEOLOGICOS Y CLIMATICOS

1. Cuadro geológico.

Antecedentes. Los rasgos geológicos principales del Norte de Chile están dados por los grandes procesos tectónicos y volcánicos que han caracterizado su evolución geológica. Entre los estudios más relevantes se encuentran publicaciones de diversos autores como Bruggen (1950), Muñoz (1973), Harrington (1961), Ruiz (1965), Zeil (1964), Aubouin et al. (1972), Frutos y Tobar (1973), Mortimer (1973), Mortimer y Saric (1975), Frutos (1977), Ferraris (1979), Maksaev (1979), Lahsen (1982), Coira et al. (1982), Naranjo y Paskoff (1985), Reutter y Scheuber (1988), Bogdanic (1991), Stern y Mpodozis (1991), Reutter et al. (1991), Scheuber y Reutter (1992).

Relativos a cuencas cerradas que han originado salares parte de los cuales son objeto del presente estudio, se cuenta con trabajos de Ericksen (1963), Stoertz y Ericksen (1974), Ericksen (1979, 1981), Vila (1975, 1976), Van Moort (1985), Chong (1988). Más específicamente sobre algunos de ellos se dispone para el salar de Pintados a Vila (1976); para el salar de Atacama a Dingman (1965, 1967), Diaz et al. (1972), Moraga et al. (1974), Ide (1978), Dalannais (1979), Mardones (1986), Macellari et al. (1991), Bevacqua (1992), Alonso y Risacher (1996), Risacher y Alonso (1996); y para los salares de Ascotán y Carcote a Mardones (1977).

Respecto a la geoquímica de rocas como posible fuente de solutos a las aguas, se cuenta con varias publicaciones, entre ellas las de Guest (1969), Oyarzun (1971), Pichler y Zeil (1972), Campano y Guerra (1975), Campano et al. (1976), Deruelle (1978), Campano y Guerra (1979), Thorpe et al. (1979), Palacios y López (1979), Lopez (1982), Gardeweg et al. (1984), Ishihara et al. (1984), Guerra et al. (1988), Arias et al. (1991), Brown (1991), Worner et al. (1992).

Tectónica y magmatismo. Existe una relación entre tectonismo y magmatismo en el Norte de Chile. Reutter y Scheuber (1988) y Scheuber y Reutter (1992) presentan para el Ciclo Orogénico Andino entre los 21° y 25° S, una evolución del magmatismo desde el Lias con el desarrollo secuencial, de oeste a este, de cuatro arcos magmáticos. Ellos están relacionados con la convergencia de placas y la erosión tectónica de este margen continental.

Arco magmático del Jurásico - Cretácico Inferior. Ubicado en el área de la actual Cordillera de la Costa donde, sobre un basamento continental de rocas del Paleozoico Superior y en un ambiente marino somero, ocurrió la erupción de lavas y tobas andesíticas y la intrusión de plutones de tipo diorítico dominante. Esta extrusión de material ígneo se acompañó de subsidencia de similar cantidad de material cortical, lo que supone un régimen de distensión.

Arco magmático del Cretácico Medio. Se implantó en la actual ubicación del Valle Longitudinal. Las pocas dataciones geocronológicas disponibles (Rb/Sr, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, K/Ar) dan edades desde 104 a 83 Ma. Este volcanismo de carácter calco-alcalino yace sobre sedimentos del

trans-arco anterior y está cubierto por las formaciones más recientes del Valle Longitudinal. Es afectado por la tectónica distensiva hasta el Cretácico Medio en que aparece una fase compresiva que origina fuertes deformaciones.

Arco del Cretácico Superior–Paleogeno. Se localizó en la actual Precordillera que puede ser caracterizada como una cadena afectada por tectónica de compresión que produjo intensos plegamientos y fallas (Chong y Reutter, 1985). Se observa en ella un sistema de fallas paralelas al orógeno a las que a lo largo, se asocian movimientos transcurrentes. El material ígneo, (tobas, lavas, ignimbritas) se depositó sobre rocas paleozoicas y cretácicas. Tectónicamente se caracteriza por movimientos compresivos que también afectaron a la amplia zona de trans-arco. El efecto de la tectónica de arco magmático es observable en la Precordillera donde las rocas del basamento (sedimentarias, plutónicas y metamórficas del Precámbrico al Paleozoico) están incorporadas a esas estructuras. La deformación ocurrió en el Eoceno Superior y Oligoceno Inferior, simultánea al magmatismo y procesos mineralizadores (yacimientos de cobre de Chuquicamata, por. ej.).

Arco magmático del Mioceno-Holoceno. Las lavas e ignimbritas de este arco, el más extenso de todos, sobreyacen sobre rocas paleozoicas a oligocénicas. La cadena volcánica originada constituye la actual Cordillera Occidental, aunque el volcanismo de esta edad podría haberse extendido hacia el Altiplano y aún hasta la Cordillera Oriental, a través de la reactivación de fallas transversales descritas por Salfity (1985). La relación entre tectónica y volcanismo puede inferirse, entre otros, por el alineamiento de los volcanes a lo largo de los sistemas de fractura. Considerando las estructuras de las áreas adyacentes a la Cordillera Occidental en el Altiplano de Chile, Bolivia y Argentina y su relación con volcanismo, podría inferirse que toda el área desde la Cordillera Occidental hasta el borde occidental de la Cordillera Oriental, pertenecen tectónicamente a este arco magmático.

Volcanismo Cenozoico. En este último arco magmático cabe una particular referencia al volcanismo del Cenozoico Superior más relacionado a la geología que interesa al presente trabajo. En el Mioceno Inferior se inicia el volcanismo Cenozoico Superior ligado a períodos compresivos y distensivos. Este volcanismo ocurre en dos etapas. Una en el Mioceno, de tipo fisural, con ignimbritas riolíticas a dacíticas intercaladas con lavas andesíticas que han formado el plateau riolítico. Posteriormente otra, de tipo central, de edad plio-pleistocénica, con lavas dacíticas a riolíticas y estrato-volcanes andesíticos a dacíticos. Este material volcánico junto a sedimentos continentales, se depositó sobre rocas del Mesozoico y Cenozoico Inferior muy plegadas y erosionadas. (Lahsen, 1982). Este mismo autor presenta en ese trabajo la estratigrafía y estructura de las principales secuencias volcánicas.

Al decrecimiento de la actividad volcánica sigue un intenso período erosivo que genera la depositación de sedimentos clásticos y evaporíticos, estos últimos favorecidos por condiciones climáticas de alta aridez. El levantamiento de la Cordillera de la Costa a fines del Oligoceno cerró el paso al material producido por la erosión de la Precordillera y Cordillera Andina

2. Rasgos geo-morfológicos

La evolución estructural del borde occidental-sur de América del Sur está relacionada a la tectónica de bloques originada por deformaciones en la corteza de la Placa Sudamericana debido al esfuerzo producido por la subducción bajo ella de la Placa de Nazca. Puede definirse como un caso de margen continental activo que se mantiene desde el Carbonífero Superior. Esta evolución se desarrolló por una sucesión de etapas de compresión y distensión, cuyo resultado fue la formación de grandes bloques estructurales caracterizados por una serie de horst y graben de orientación norte-sur. A este proceso tectónico se le relaciona episodios volcánicos, especialmente recientes, que junto a la aridez climática han conformado los rasgos morfológicos dominantes.

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

En resumen, la morfología del Norte de Chile es el producto de eventos tectónicos, del volcanismo y su evolución oeste-este y de la aridez. A continuación se describe someramente los rasgos morfológicos principales (Fig 7).

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

Depresión Central o Valle Longitudinal. Tectónicamente es un graben que configura una cuenca elongada en sentido norte-sur ubicada entre la Cordillera de la Costa y la Precordillera. que ha constituido el nivel de base para el drenaje y el material de erosión proveniente desde el oriente y en el cual se han intercalado volcanitas, principalmente ignimbritas. Este material provino de la erosión del arco tectónico del Paleógeno, ubicado en la actual Precordillera, y posteriormente por material ígneo y sedimentario del arco magmático actual del Mioceno-Holoceno (Jensen, 1992). Bruggen (1950) propuso la denominación de Formación Riolítica dentro de la cual otros autores han propuesto nombres de formaciones más locales Esta unidad morfológica conforma un plano depositacional interrumpido por cerros y pequeños cordones

montañosos. Aproximadamente entre los 22°30' y 19°30'S se extiende en un relieve suave denominado Pampa del Tamarugal, constituida por sedimentos continentales y lavas riolíticas.

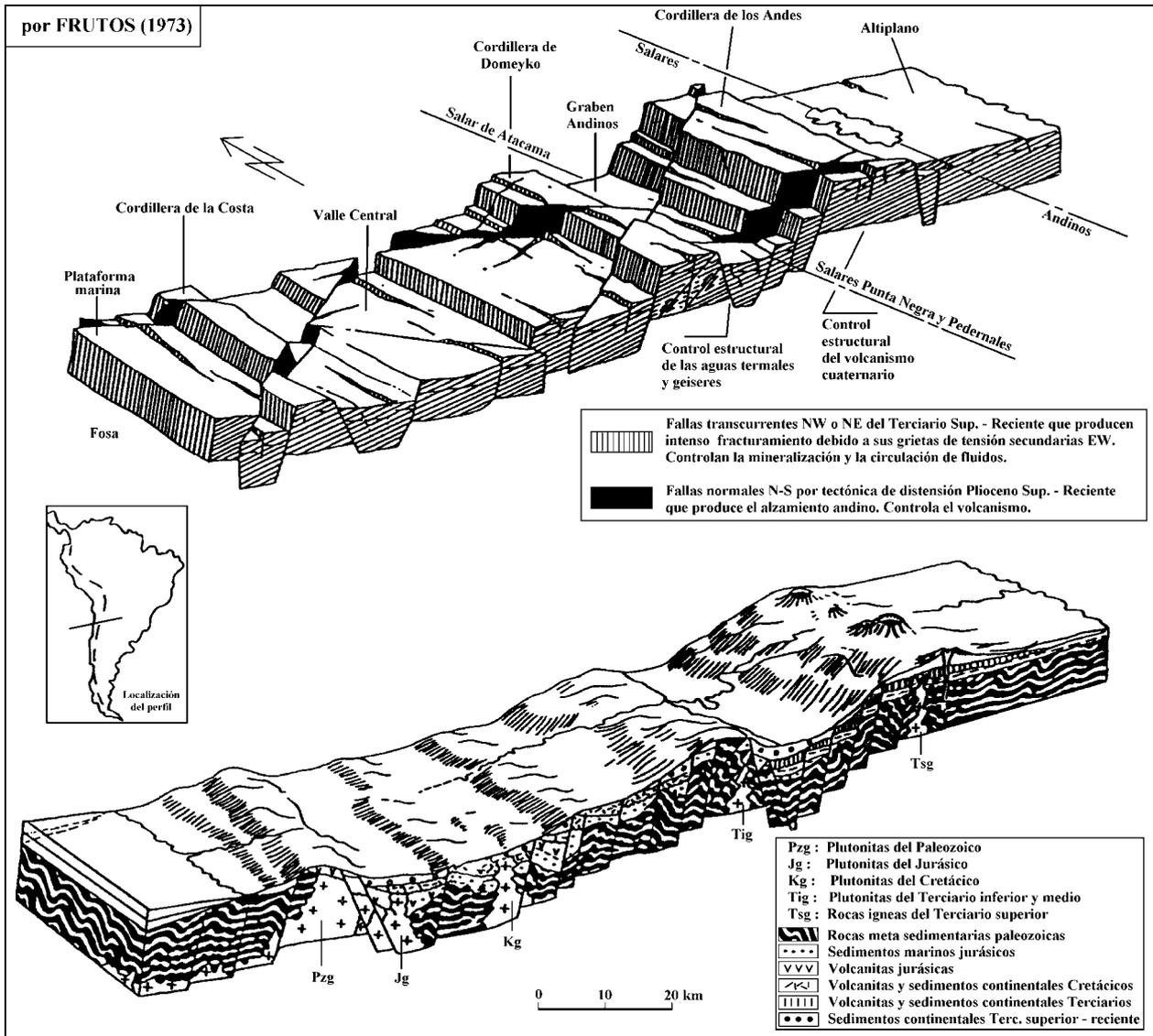


Fig.7 : Perfil geológico y estructural a través de los Andes del norte de Chile.

Hacia el sur aparecen serranías transversales. La presencia en el borde occidental de la Depresión Central de depositaciones salinas y horizontes de diatomeas son evidencia de la existencia de antiguos lagos que allí se asentaron debido a su basculamiento hacia el oeste. Esta inclinación puede constatarse en el salar de Pintados cuyo borde oriental aparece más elevado.

En la Pampa del Tamarugal Jensen (1992) describe de norte a sur varias unidades litoestratigráficas : En el sector Pampa Oxaya, la formación Azapa (Salas et al., 1966), subyaciendo a la Formación Oxaya, la que se correlaciona en su parte inferior con la Formación Riolítica y Altos de Pica. En el sector Pampa Tana, describe varias unidades con material

sedimentario y volcánico; en el sector Altos de Pica, la formación del mismo nombre (Galli y Dingman, 1962); en el sector Sierra de Moreno, las formaciones Sichal e Ichuno (Maksaev, 1978); en el sector salar de Lllamará, la unidad de Hilaricos (Jensen, 1992) y Formación Quillagua (Rieu, 1975).

En la Segunda Región, el Valle Central presenta una forma diferente. La Pampa del Tamarugal se extiende hasta la latitud de Calama donde la cuenca de este nombre es diferente en geología, presentando depósitos lacustres de calizas y diatomitas y depósitos volcánicos. Más al sur aparecen, cortando la continuidad, serranías transversales como las sierras de Moctezuma, El Tigre y Cuevitas.

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

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

Cordillera de los Andes o Cordillera Occidental. Este horst tectónico conforma un relieve impresionante que se extiende mucho más al este del territorio chileno. El Altiplano o Puna es una extensa meseta de 4000 m de altura media que se extiende en el nor-este de Chile, nor-oeste de Argentina, sur-este de Perú y mitad occidental de Bolivia. Está compuesta de rocas sedimentarias, volcánicas e intrusivas con edades desde el Paleozoico al Cuaternario. Está flanqueada al este por la Cordillera Oriental y al oeste por la Cordillera Occidental. En Chile está constituida por un basamento volcano-sedimentario del Terciario. En el Altiplano al oriente de Arica, Salas et al., (1966) denominan Formación Putani a unos 500 m de sedimentos continentales de probable edad Oligoceno. Ella estaría correlacionada con la Formación Coro-Coro en Bolivia, con la cual también se correlacionarían las formaciones San Pedro y Tambores en la cuenca del salar de Atacama (Mortimer y Saric, 1975).

En discordancia sobre la Formación San Pedro, hacia el este, se encuentra la Formación Riolítica (Bruggen, 1950) que comienza a formarse en el Mioceno Inferior, sobre la cual aparecen los estrato-volcanes andesíticos o Formación Andesítica, de edad Mioceno Medio, aunque su buena preservación sugiere edad cuaternaria. Ambas formaciones estarían genética y químicamente relacionadas (Pichler y Zeil, 1972). Por otra parte, Zeil y Pichler (1967) atribuyen el origen del magma de las riolitas a fusión del sial de la corteza superior mientras que el de las andesitas se habría originado por fusión parcial de la corteza inferior. El activo volcanismo producido por la

efusión de estas lavas permitió la formación de cuencas cerradas intermontanas cuyo nivel de base dio origen a lagunas y salares.

En síntesis, los principales rasgos fisiográficos de las zonas estudiadas son el resultante de una tectónica de bloques y del volcanismo reciente. A ellos se agrega el efecto de la aridez climática extrema que preservó la morfología al minimizar la erosión.

3. Cuadro climático e hidrográfico

Climatología. La evolución climática indica que aunque la zona estudiada está entre las más áridas del planeta y lo ha sido así desde el Mioceno Medio, hay evidencias de cierta actividad pluvial durante el Plioceno, Pleistoceno y Cuaternario, así como de una glaciación pleistocénica. El levantamiento de los Andes Centrales durante el Oligoceno y Mioceno fue un factor que hizo de barrera a las precipitaciones desde el Amazonas estabilizando el anticiclón del Pacífico.

En cuanto al régimen de los procesos erosivos, Alpers y Brimhall (1988) utilizando información geocronológica, paleotopográfica y balance de masa en el mineral de cobre La Escondida, Segunda Región, concluyen para el Mioceno un régimen de erosión del orden de 100 m/millón de años en esa área. Por su parte, Scholl et al. (1970) estiman una denudación del orden de 20 a 40 m/millón años entre los 29° y 33° S para los pasados 6 a 17 millones de años.

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

La información meteorológica disponible es insuficiente, particularmente en la alta cordillera andina. La evaporación desde superficies de agua y desde suelos es muy alta, con valores entre 1500 a 2500 mm / año. La precipitación anual media cerca de los 4000 m de altura, varía entre 200 a 300 mm, lo cual explica, al comparar con la evaporación, la alta aridez. Los años lluviosos pueden tener hasta tres veces la precipitación de un año seco. Las temperaturas máximas medias diarias oscilan entre 10 y 20 °C y las medias mínimas, unos pocos grados bajo 0°C. Una fuente de información disponible para los distintos parámetros del balance hídrico por cuencas, está en el Balance Hidrológico Nacional, de la Dirección General de Aguas, MOP (para la II Region, consultar Grilli et al., 1986).

Hidrografía. Siguiendo el criterio de Klohn (1972) basado en gran parte en Fuenzalida (1950), pueden considerarse varios grupos de sistemas hidrográficos:

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

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

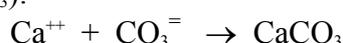
(3) Cuencas abiertas con esorrentía permanente. En la I Región, son los ríos Lluta, San José, Codpa, Camarones y Tana, en la II Región el río Loa y en la III Región los ríos Copiapó y Huasco

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

VI. EVOLUCION DE AGUAS EN CUENCAS CERRADAS

1. Precipitación de la calcita

El modelo de evolución de la composición química de aguas por evaporación fue establecido por Garrels y Mackenzie (1967), Hardie y Eugster (1970) y Eugster y Hardie (1978). Cuando un agua se evapora, sus componentes disueltos se concentran y precipitan una secuencia de minerales en el orden de sus solubilidades crecientes. Debido a su baja solubilidad, el primer mineral que precipita es la calcita (CaCO_3):



Durante la precipitación de la calcita, el producto de actividad iónica se mantiene constante e igual al producto de solubilidad de la calcita:

$$(\text{Ca}^{++}) \times (\text{CO}_3^{=}) = K_{\text{calcita}}$$

(Ca^{++}) y ($\text{CO}_3^{=}$) son las actividades de los iones calcio y carbonato. A bajas salinidades, las concentraciones varían como las actividades; el producto de las concentraciones del calcio y del carbonato se mantiene aproximadamente constante:

$$[\text{Ca}^{++}] \times [\text{CO}_3^{=}] \approx \text{Constante}$$

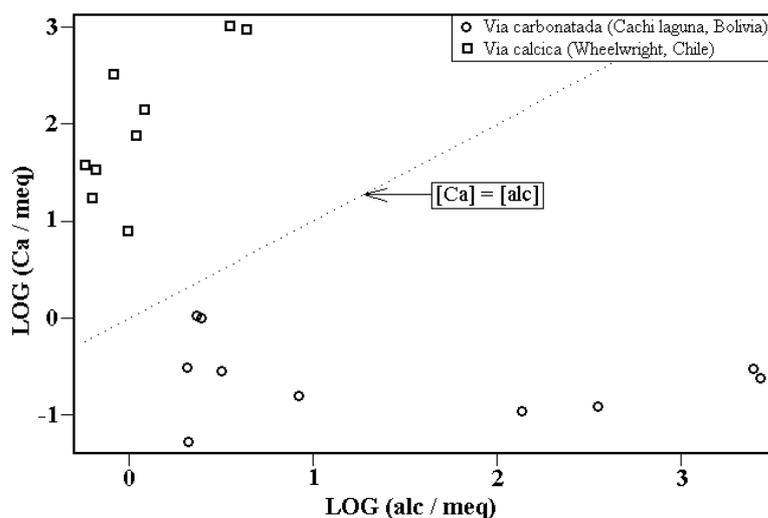
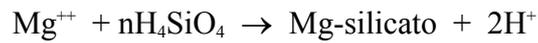


Fig.8 : Relación entre alcalinidad y calcio en un salar de vía carbonatada y en un salar de vía cálcica

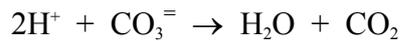
Eso implica que el calcio y el carbonato no pueden concentrarse conjuntamente cuando precipita la calcita. Si la concentración de uno de los dos aumenta, entonces la concentración del otro debe bajar. Este simple mecanismo induce dos vías evolutivas para las soluciones evaporíticas (Fig.8). Si en el agua inicial hay más carbonato que calcio, la solución al evaporarse, se enriquecerá en carbonatos y se empobrecerá en calcio. Así se llega a salmueras alcalinas de carbonatos de sodio de pH superior a 10, de tipo general $\text{Na} / \text{CO}_3\text{-Cl}$. Si al contrario hay más calcio que carbonato en el agua de aporte, la solución se concentrará en calcio a expensa del carbonato, produciendo salmueras neutras de pH inferior a 9.

2. Precipitación de sales de magnesio

Después de la calcita, precipitan silicatos o carbonatos de magnesio, sales también muy poco solubles. En la vía alcalina, el aumento del pH induce muy a menudo la formación de silicatos de magnesio (Wollast et al., 1968; Badaut y Risacher, 1983; Jones, 1986; Guven, 1988), según la reacción general:



Dos protones aparecen por cada ión magnesio consumido, los cuales neutralizan parte del carbonato y bicarbonato:



La concentración de la solución en carbonato puede así volverse inferior a la concentración del calcio, lo que desvía la solución de la vía alcalina hacia una vía sulfatada. En caso de precipitación de carbonato de magnesio (magnesita), el consumo de CO_3 por este mineral también puede permitir que la concentración del carbonato se vuelva inferior a la del calcio, y desviar así la solución hacia una vía sulfatada (Fig.9).

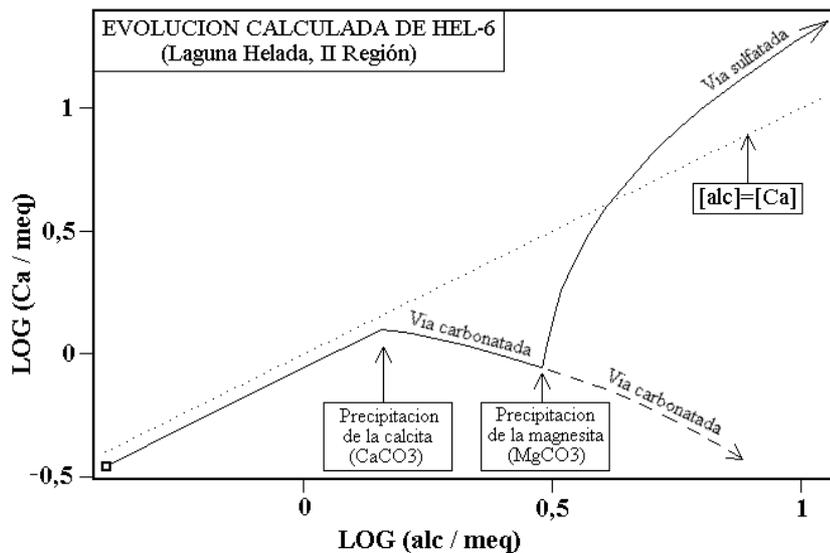
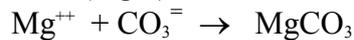


Fig.9 : Cambio de evolución de la vía carbonatada hacia la vía sulfatada alcalina por causa de la precipitación de una sal de magnesio.

De hecho, que sean silicatos o carbonato de magnesio los que precipitan, el efecto sobre la vía evolutiva es el mismo.

3. Precipitación del yeso

En la vía neutra, el siguiente mineral que casi siempre precipita es el yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$):



Aquí también rige el mismo mecanismo que para la calcita. El producto de actividades debe quedar constante e igual al producto de solubilidad del yeso:



En soluciones poco salinas, las actividades varían como las concentraciones y la actividad del agua (H₂O) es poco inferior a uno. En primera aproximación, el producto de las concentraciones del calcio y del sulfato se mantiene constante:

$$[Ca^{++}] \times [SO_4^{--}] \approx \text{Constante}$$

Si al principio de la precipitación del yeso hay más sulfato que calcio, entonces la solución se concentrará en sulfato y se empobrecerá en calcio, obteniéndose salmueras sulfatadas de tipo general Na / SO₄-Cl. Si al contrario hay más calcio que sulfato cuando empieza a precipitar el yeso, es el calcio que se concentrará hasta producir salmueras cálcicas de tipo Na-Ca / Cl. Hay que bien tener en cuenta que las concentraciones en Ca⁺⁺ y SO₄⁻⁻ que se consideran no son las del agua inicial, sino las del agua ya evaporada al principio de la precipitación del yeso. Puede haber más calcio que sulfato en el agua de aporte, pero que por efecto de la precipitación de la calcita, la concentración del calcio se vuelva inferior a la del sulfato cuando empieza a precipitar el yeso. Este mecanismo está ilustrado en la figura 10 con aguas de aporte de los salares de Michincha y de Punta Negra. Las dos aguas iniciales MIC-1 y PUN-24 tienen más calcio que sulfato. Durante la precipitación de la calcita, el trayecto evaporatorio de MIC-1 se curva y cruza la recta equimolar Ca = SO₄. Al empezar la precipitación del yeso, la solución contiene más sulfato que calcio y evoluciona hacia la vía sulfatada. Al contrario el trayecto evaporatorio de PUN-24 muestra una leve curvatura al precipitar la calcita y no logra cruzar la recta equimolar. Al precipitar el yeso, la solución sigue la vía cálcica.

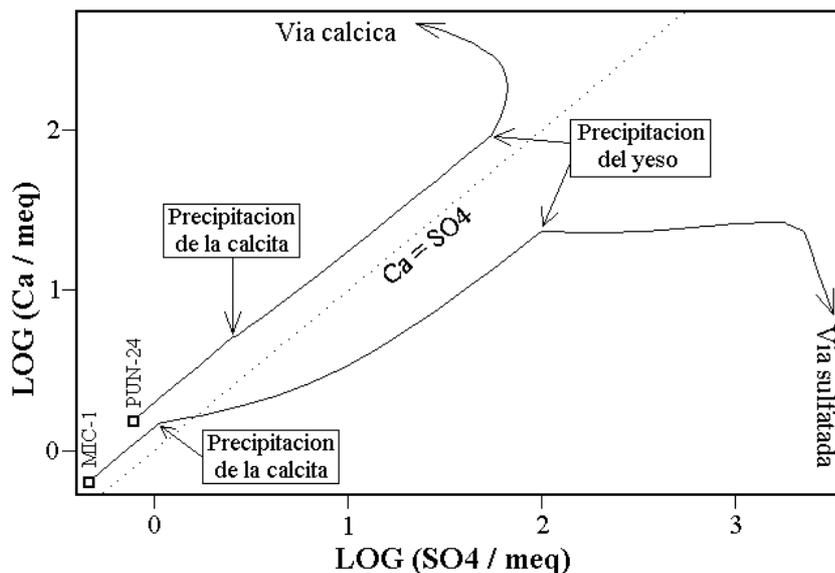


Fig.10 : Ejemplos de trayectos evaporatorios de las vías evolutivas sulfatadas y cálcicas.

Las dos vías evolutivas producidas por la precipitación del yeso se observan perfectamente en las soluciones del salar de Atacama (análisis de Moraga et al., 1974). En un diagrama Ca versus SO₄, los puntos se disponen según una T inclinada (Fig. 11). El pie de la T corresponde a aguas no saturadas en yeso y la barra transversal a aguas saturadas en este mineral.

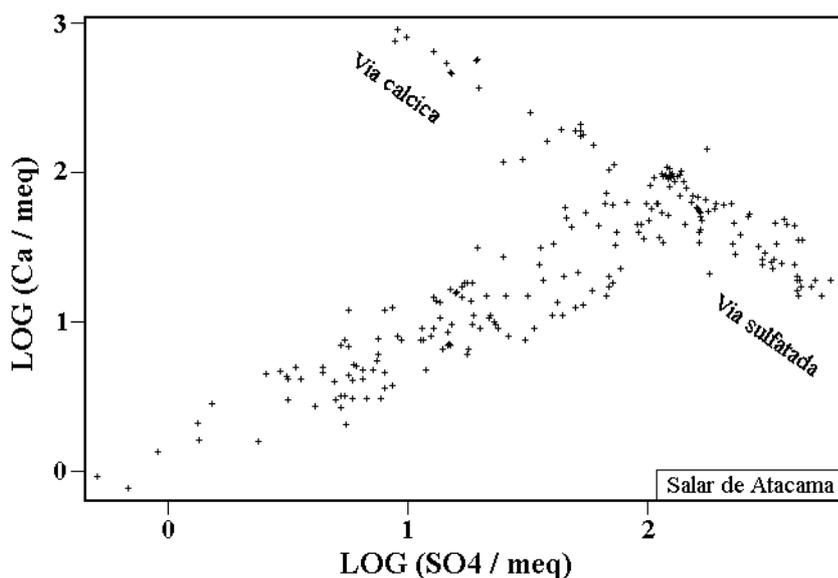


Fig.11 : Relación Ca versus SO₄ en las aguas del salar de Atacama mostrando las dos vías evolutivas: sulfatada y cálcica.

4. Diagramas de evolución de aguas por evaporación

Toda la discusión queda resumida en las figuras 12 y 13. La precipitación de los tres minerales fundamentales, calcita, silicatos de magnesio y yeso, determina cinco vías evolutivas:

- vía carbonatada: la precipitación de silicatos de magnesio no logra desviar la evolución del agua debido a su alta proporción de carbonato y bicarbonato.

- vía sulfatada directa: la precipitación de silicatos de magnesio cambia la vía carbonatada hacia una salmuera sulfatada, pero sin precipitar el yeso. Es una vía poco común, puesto que implica límites muy estrictos a las concentraciones de Ca y SO₄.

- vía sulfatada alcalina: la solución empieza su evolución por la vía carbonatada pero la precipitación de silicatos de magnesio corta esta vía, permitiendo al calcio concentrarse hasta llegar a la precipitación del yeso. A este punto, el sulfato predomina sobre calcio y se llega a una salmuera sulfatada.

- vía sulfatada neutra: la solución empieza su evolución por la vía neutra hasta llegar a la precipitación del yeso y después sigue una vía sulfatada.

- vía cálcica: la solución tiene siempre más calcio que sulfato y, después de precipitar el yeso, llega a una salmuera cálcica.

No está representado el trayecto que empieza por la vía carbonatada y termina por la vía cálcica ni tampoco el que empieza por la vía cálcica y termina por la vía carbonatada.. Ningún agua del norte de Chile sigue tales trayecto. Puede que sean químicamente imposibles.

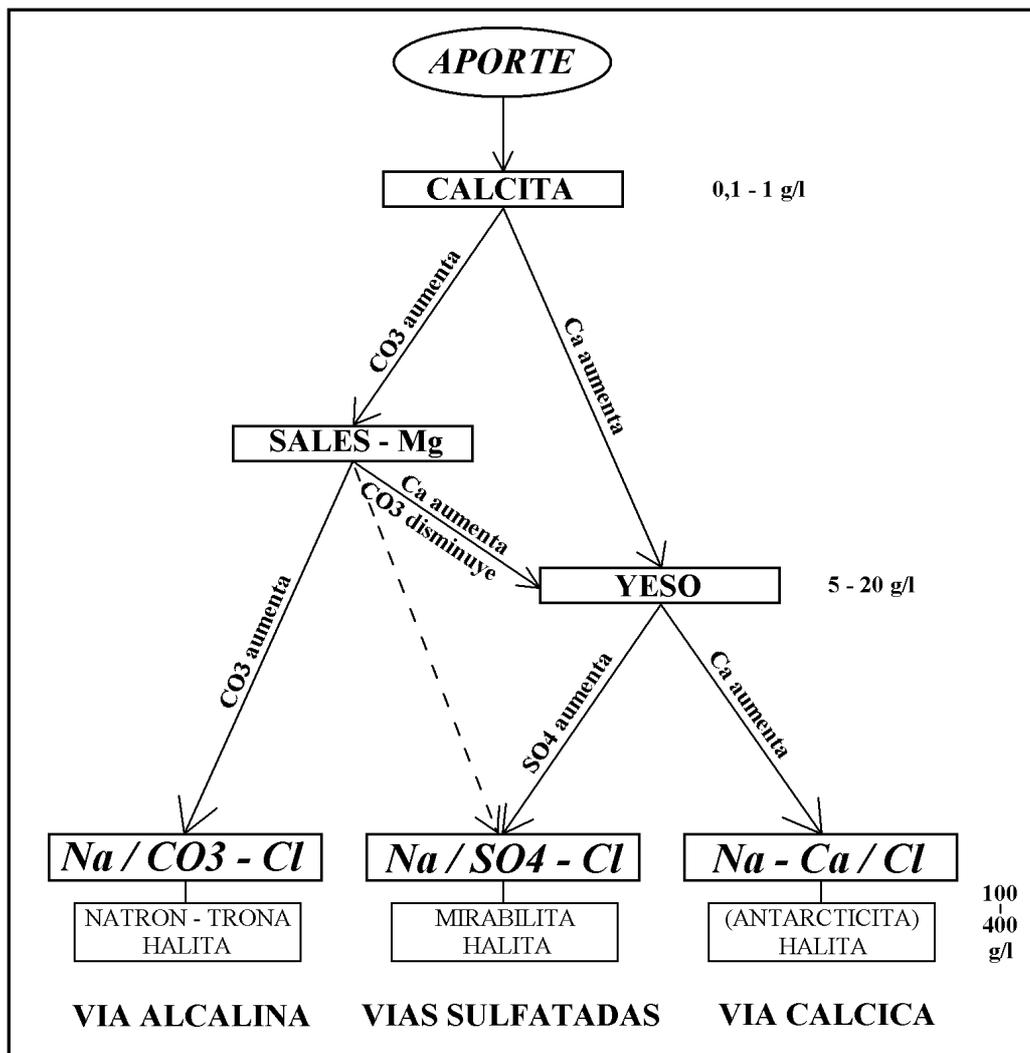


Fig.12 : Diagrama de evolución de las aguas por evaporación (según Hardie y Eugster, 1970).

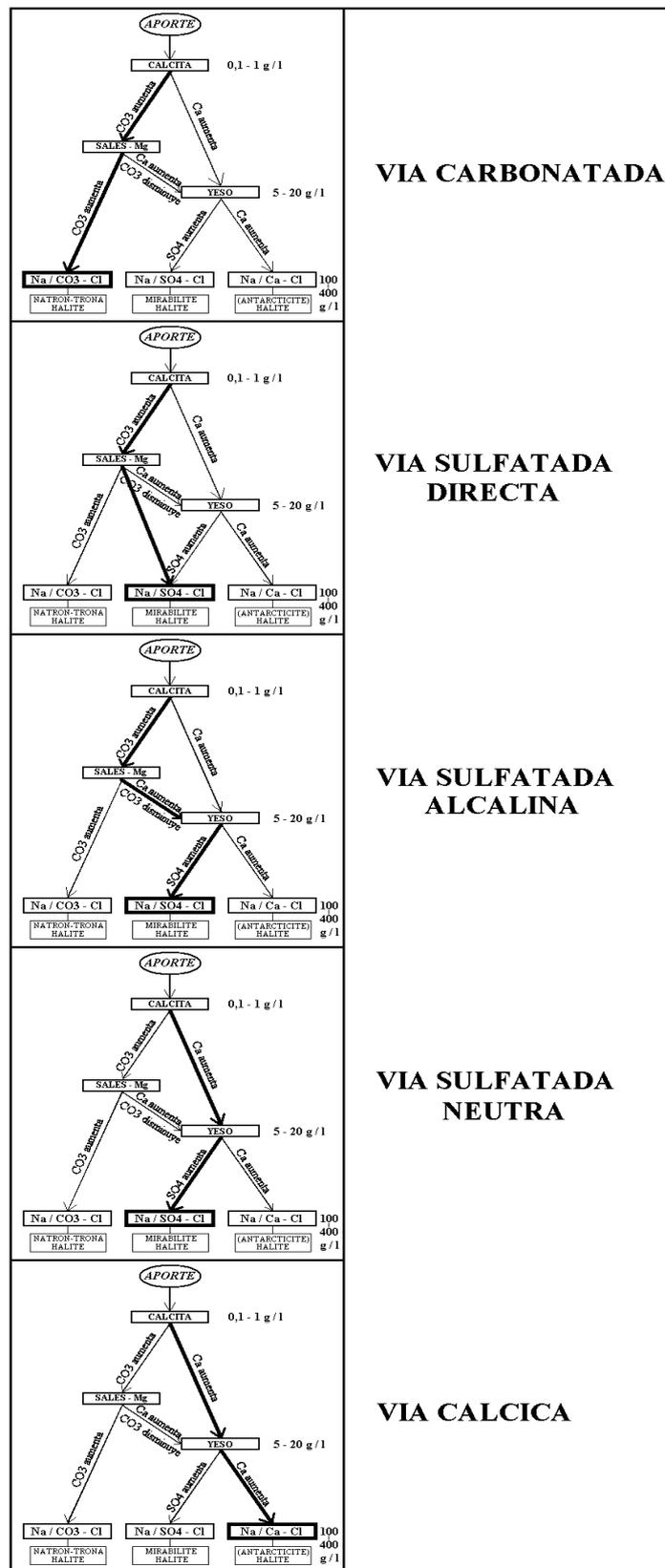


Fig.13 : Vías evolutivas observadas en salares del norte chileno.

Las cinco vías evolutivas llegan a tres mega-tipos, o familias, de salmueras:

- tipo carbonatado: Na / CO₃-Cl
- tipo sulfatado: Na / SO₄-Cl
- tipo cálcico: Na-Ca / Cl

Los tres componentes que caracterizan cada familia no son los únicos presentes en las salmueras, ni siquiera los más concentrados. Por ejemplo, en el tipo carbonatado puede haber más sulfato que carbonato; en el tipo cálcico la concentración en magnesio puede superar la del calcio. Pero estos componentes no intervienen en las respectivas vías evolutivas: el sulfato no juega ningún papel en la vía carbonatada y tampoco el magnesio en la vía cálcica.

Lo que determina la vía evolutiva que sigue un agua que se evapora es la composición inicial del agua de aporte. Una ligera variación de las concentraciones iniciales de los componentes puede cambiar la vía evolutiva y producir salmueras drásticamente distintas. La evaporación amplifica considerablemente las pequeñas diferencias iniciales. Se puede clasificar las aguas diluidas según la vía evolutiva que siguen cuando se evaporan. Para un estudio de aguas en regiones húmedas, donde no hay lagos salados ni salares, un tal enfoque es de poco interés. Al contrario, en zonas áridas esta clasificación permite correlacionar aguas de salinidad y composición muy distintas de acuerdo a su vía evolutiva. No se considera solamente las concentraciones de los componentes, como en las clasificaciones tradicionales, sino también sus cambios cuando el agua se evapora.

Esta presentación de la evolución de aguas por evaporación es muy didáctica, pero de muy difícil aplicación práctica. Por ejemplo, hemos considerado solamente el carbonato CO₃; pero en las aguas hay también bicarbonato HCO₃. La pregunta surge en como determinar la vía evolutiva de un agua a partir de su análisis químico. Hay dos maneras de proceder: una cualitativa y rápida que no necesita medios informáticos y una cuantitativa que utiliza un programa computacional.

5. Determinación cualitativa de las vías evolutivas

Este método se basa en la noción de alcalinidad (Stumm y Morgan, 1970; Al-Droubi et al., 1980; Dickson, 1981). La alcalinidad mide la reserva alcalina de la solución disponible para neutralizar ácidos fuertes:

$$[\text{alc}] = [\text{CO}_3^-] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{OH}^-] + [\text{boratos}] + [\text{silicatos}] - [\text{H}^+]$$

Las concentraciones están en miliequivalentes por litro. La ecuación del balance eléctrico de la solución se escribe:

$$\begin{aligned} [\text{Na}^+] + [\text{K}^+] + [\text{Li}^+] + [\text{Ca}^{++}] + [\text{Mg}^{++}] + [\text{H}^+] \\ = [\text{Cl}^-] + [\text{SO}_4^{--}] + [\text{NO}_3^-] + [\text{CO}_3^{--}] + [\text{HCO}_3^-] + [\text{OH}^-] + [\text{boratos}] + [\text{silicatos}] \end{aligned}$$

Combinando las dos ecuaciones se obtiene otra formulación de la alcalinidad:

$$[\text{alc}] = \{[\text{Na}^+] + [\text{K}^+] + [\text{Li}^+] + [\text{Ca}^{++}] + [\text{Mg}^{++}]\} - \{[\text{Cl}^-] + [\text{SO}_4^{--}] + [\text{NO}_3^-]\}$$

La alcalinidad aparece así como la diferencia (en miliequivalentes) entre la suma de los cationes de bases fuertes y la suma de los aniones de ácidos fuertes.

Consideremos una solución que se evapora precipitando primero la calcita. Podemos escribir:

$$[\text{alc}] - [\text{Ca}^{++}] = \{[\text{Na}^+] + [\text{K}^+] + [\text{Li}^+] + [\text{Mg}^{++}]\} - \{[\text{Cl}^-] + [\text{SO}_4^{--}] + [\text{NO}_3^-]\}$$

Si la calcita precipita sola, ningún componente del lado derecho de la ecuación está afectado. Cada uno se concentra libremente. Si ponemos el subíndice "o" para las concentraciones iniciales y llamamos F el factor de concentración (razón entre el volumen de agua inicial y el volumen residual), obtenemos para cada componente del lado derecho una relación: del tipo : $[\text{Na}^+] = F \times [\text{Na}^+]_o$. Se obtiene:

$$[\text{alc}] - [\text{Ca}^{++}] = F \times \left[\{[\text{Na}^+]_o + [\text{K}^+]_o + [\text{Li}^+]_o + [\text{Mg}^{++}]_o\} - \{[\text{Cl}^-]_o + [\text{SO}_4^{--}]_o + [\text{NO}_3^-]_o\} \right]$$

El término a la derecha de la ecuación es una constante que depende exclusivamente de las concentraciones iniciales de los componentes. En el agua inicial, antes de empezar la precipitación de la calcita, tenemos $[\text{alc}] = [\text{alc}]_o$ y $[\text{Ca}^{++}] = [\text{Ca}^{++}]_o$ y $F=1$. De ahí:

$$[\text{alc}]_o - [\text{Ca}^{++}]_o = \{[\text{Na}^+]_o + [\text{K}^+]_o + [\text{Li}^+]_o + [\text{Mg}^{++}]_o\} - \{[\text{Cl}^-]_o + [\text{SO}_4^{--}]_o + [\text{NO}_3^-]_o\}$$

y entonces:
$$[\text{alc}] - [\text{Ca}^{++}] = F \times ([\text{alc}]_o - [\text{Ca}^{++}]_o)$$

$[\text{alc}]_o - [\text{Ca}^{++}]_o$ es una constante que puede ser positiva o negativa, según los valores en miliequivalentes de la alcalinidad y de la concentración en calcio del agua inicial. El factor de concentración F crece conforme se va evaporando el agua.

- si $[\text{alc}]_o - [\text{Ca}^{++}]_o > 0$, entonces $F \times ([\text{alc}]_o - [\text{Ca}^{++}]_o)$ es positivo y creciente durante la precipitación de la calcita. El término $[\text{alc}] - [\text{Ca}^{++}]$ es, por ende, también positivo y creciente. Es decir que la diferencia entre la alcalinidad y el calcio aumenta cuando precipita la calcita. La solución sigue la vía carbonatada donde aumenta la alcalinidad y disminuye el calcio.

- si $[\text{alc}]_o - [\text{Ca}^{++}]_o < 0$, entonces $F \times ([\text{alc}]_o - [\text{Ca}^{++}]_o)$ y $[\text{alc}] - [\text{Ca}^{++}]$ son negativos y crecientes durante la precipitación de la calcita. La diferencia entre el calcio y la alcalinidad aumenta. La solución sigue la vía neutra donde aumenta el calcio y disminuye la alcalinidad.

Veamos lo que pasa cuando precipitan conjuntamente la calcita y sales de magnesio a partir de una agua que sigue la vía carbonatada. El proceso es similar que para la calcita sola. Podemos escribir:

$$[\text{alc}] - [\text{Ca}^{++}] - [\text{Mg}^{++}] = F \times \left[\{[\text{Na}^+]_o + [\text{K}^+]_o + [\text{Li}^+]_o\} - \{[\text{Cl}^-]_o + [\text{SO}_4^{--}]_o + [\text{NO}_3^-]_o\} \right]$$

y:
$$[\text{alc}] - [\text{Ca}^{++}] - [\text{Mg}^{++}] = F \times ([\text{alc}]_o - [\text{Ca}^{++}]_o - [\text{Mg}^{++}]_o)$$

- si $[\text{alc}]_o - [\text{Ca}^{++}]_o - [\text{Mg}^{++}]_o > 0$, entonces $[\text{alc}] - [\text{Ca}^{++}] - [\text{Mg}^{++}]$ es positivo y creciente durante la precipitación de la calcita y de los Mg-silicatos. La diferencia entre la alcalinidad y

Ca+Mg aumenta cuando precipitan los dos minerales. La solución prosigue la vía carbonatada, donde aumenta la alcalinidad, hasta llegar a una salmuera alcalina.

- si $[alc]_o - [Ca^{++}]_o - [Mg^{++}]_o < 0$, entonces $[alc] - [Ca^{++}] - [Mg^{++}]$ es negativo y creciente durante la precipitación de la calcita y de sales de magnesio. La diferencia entre Ca+Mg y la alcalinidad aumenta cuando precipitan los dos minerales. La solución se desvía de la vía carbonatada hacia las vías sulfatadas.

Veamos ahora lo que pasa cuando la solución llega a la precipitación del yeso por la vía inicial neutra ("Ca aumenta" o $[Ca] > [alc]$). Hemos visto que el agua sigue ya sea la vía sulfatada neutra o bien la vía cálcica. No se puede comparar las concentraciones de Ca y SO₄ del agua inicial, puesto que la precipitación de la calcita puede bajar la concentración del calcio por debajo de la del sulfato. Hay que comparar las concentraciones de Ca y SO₄ al principio de la precipitación del yeso. Para eso hay que utilizar un programa de simulación computacional de la evaporación que calcula la composición de la solución que se evapora. Sin embargo, existe un metodo mucho más simple. La figura 14 muestra la relación entre el calcio y la suma de la alcalinidad y del sulfato en todas las aguas de aporte de los salares chilenos estudiados.

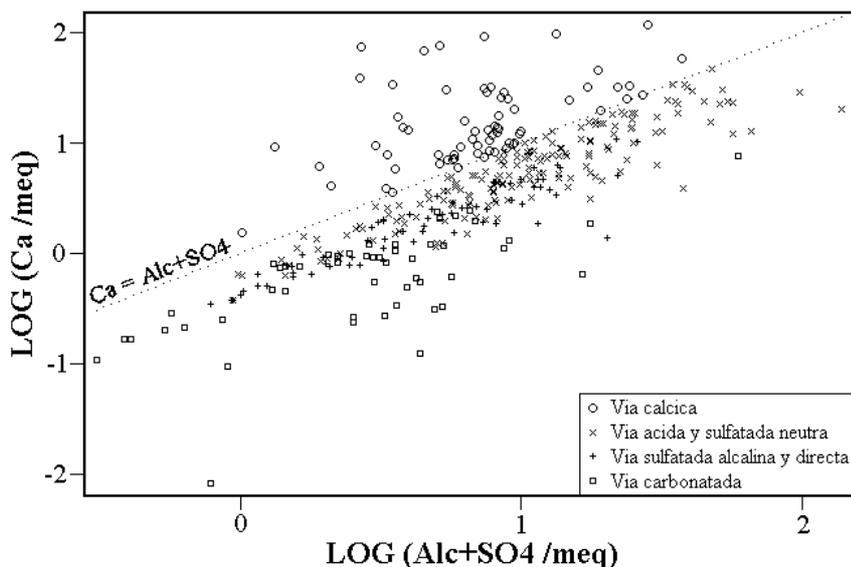


Fig.14 : Relación entre Ca y alc+SO₄ en las aguas de aporte de los salares chilenos.

Las aguas están diferenciadas de acuerdo a su vía evolutiva calculada por simulación computacional. Se observa que la recta $Ca = alc + SO_4$ separa exactamente las aguas de vía cálcica de las de vías sulfatadas. Eso significa que la razón $(alc + SO_4) / Ca$ del agua inicial permite determinar si el agua seguirá la vía cálcica o la vía sulfatada neutra cuando precipite el yeso. No se puede demostrar rigurosamente esta regla. Cuando la razón está muy cerca de uno, puede haber indecisión, dependiendo si la evaporación se hace en sistema abierto (los minerales precipitados no pueden redisolverse) o en sistema cerrado (los minerales pueden redisolverse). En sistema cerrado, la calcita precipitada al principio de la evaporación puede redisolverse más luego y proveer calcio durante la formación del yeso. Tales casos indecisos son muy escasos.

RESUMEN:

$[alc] > [Ca]$ y $[alc] > [Ca] + [Mg]$	====>	vía carbonatada
$[alc] > [Ca]$ y $[alc] < [Ca] + [Mg]$	====>	vía sulfatada alcalina o directa
$[alc] < [Ca]$ y $[alc] + [SO_4] > [Ca]$	====>	vía sulfatada neutra
$[alc] < [Ca]$ y $[alc] + [SO_4] < [Ca]$	====>	vía cálcica

Este enfoque es muy simple. El calculo de solamente tres razones (alc/Ca , $alc/(Ca+Mg)$ y $(alc+SO_4)/Ca$, en miliequivalentes) del agua de aporte permite determinar la vía evolutiva. La distinción entre vía sulfatada alcalina y vía sulfatada directa es de poca relevancia. Las dos son muy vecinas y tienen el mismo significado geoquímico: son aguas diluidas que han drenado terrenos volcánicos con poco azufre.

6. Simulación cuantitativa de la evaporación

Son programas computacionales sofisticados que calculan exactamente la composición química de un agua que se evapora y determinan los minerales que precipitan. Los algoritmos son basados sobre las leyes del equilibrio termodinámico (Helgeson et al., 1969; Fritz, 1975; Pitzer, 1979; Harvie y Weare, 1980; Harvie et al, 1984). Las composiciones calculadas son por supuesto teóricas. Corresponden a un agua que se evapora en una pileta sin interacción con sedimentos y polvos eólicos, sin actividad biológica, sin mezclas con otras aguas y sin ninguna sobresaturación de los minerales que precipitan. Es una situación ideal que raras veces se encuentra en la naturaleza. Sin embargo, este enfoque da una referencia base sobre la evolución del agua. Cualquier divergencia entre la composición real y la composición calculada de un agua que se evapora refleja algún proceso geoquímico o biológico no previsto por el modelo. A pesar de todas las interferencias posibles durante la evaporación de un agua, el modelo computacional sigue a menudo de manera sorprendente la evolución real de la solución. Eso se debe en gran parte a que las interferencias tienen poco peso en soluciones salobres y saladas. Para modificar de manera notable las concentraciones de un componente ya relativamente concentrado, se necesita grandes cantidades de material extraño. Las mayores divergencias ocurren al principio de la evaporación cuando las aguas son todavía muy diluidas. En Bolivia, por ejemplo, se ha observado que la adición de azufre eólico en aguas de aporte modificaba la vía carbonatada hacia vías sulfatadas (Risacher y Fritz, 1991).

La utilización de estos programas es delicada. Hay que bien definir las condiciones iniciales. Por ejemplo, si se desea simular la evaporación de un agua termal que sale a 50°C, hay que modificar la temperatura inicial del agua ya que en contacto con la atmosfera el agua se enfriará rápidamente. Se puede utilizar la temperatura promedia anual de la zona. Pero a bajas temperaturas las aguas diluidas y salobres se congelan y no se evaporan mucho. Hay más evaporación en verano que en invierno. Otro parámetro importante que se debe ajustar al principio de la simulación es la concentración en CO₂ de la solución inicial. Aguas subterráneas

pueden tener altos contenidos de CO_2 disuelto, en particular las aguas termales. Una vez en contacto con la atmósfera, pierden rápidamente su CO_2 en exceso, lo que induce un aumento del pH y de la concentración en carbonato $\text{CO}_3^{=}$ a expensas del bicarbonato HCO_3^- . Esto produce generalmente una sobresaturación de la solución inicial en calcita; la solución no está en equilibrio termodinámico. El programa debe precipitar el exceso de calcita. Varios otros problemas pueden ocurrir al principio de la simulación. Una vez arregladas todas las condiciones iniciales, no hay más problemas para el desarrollo del cálculo que puede demorar entre una y tres horas, dependiendo de las salinidades iniciales y finales y también de la velocidad del computador.

Una vez calculada la composición química de un agua evaporada por simulación computacional, hay que compararla con la composición real de las aguas del salar. Las composiciones calculadas nunca igualan exactamente las concentraciones efectivamente observadas. Ocurren varios procesos no previstos en el modelo computacional:

- consumo de componentes disueltos por organismos vivos, como ser sílice por diatomeas, calcio y carbonato en las carapazones.
- la fotosíntesis, al consumir CO_2 disuelto, aumenta el pH de las aguas en hasta dos unidades, pudiendo precipitar carbonato de calcio.
- el boro y el potasio se adsorben sobre arcillas
- los cationes pueden intercambiarse en las arcillas
- difusión de sales desde aguas intersticiales en sedimentos del fondo de las lagunas
- depositación de material eólico sobre las lagunas
- las solubilidades de los minerales dependen de la temperatura; pero la simulación se hace a temperatura constante; en realidad las variaciones diarias y anuales alcanzan fácilmente 30°C .
- los minerales no siempre precipitan justo cuando llegan a saturación; muchas veces las aguas de lagunas están sobresaturadas con los minerales poco solubles (calcita, silicatos de magnesio, magnesita)
- mezclas de diferentes aguas. Es la causa principal de divergencia para las aguas salobres y saladas. Los demás procesos afectan sobre todo aguas diluidas; mientras más diluidas, más afectadas son.

A estos procesos hay que agregar la imprecisión o el desconocimiento de ciertos parámetros termodinámicos, en particular sus variaciones en función de la temperatura. Por otra parte, no se sabe modelar la química del boro en salmueras neutras. A pesar de todas estas limitaciones, el modelo computacional no se ajusta tan mal a la realidad. De hecho, el modelo establece una línea base cuyas divergencias con las composiciones reales permiten detectar ciertos procesos geoquímicos o hidroquímicos que ocurren en las lagunas y salares.

La idea es comparar la composición real de las lagunas con las composiciones de sus aportes evaporados por simulación computacional. El problema es como comparar composiciones químicas que abarcan una docena de componentes. Es casi imposible hacerlo gráficamente. Se ha escogido un método estadístico derivado de la prueba chi-cuadrado. El resultado de la simulación es un conjunto de análisis que van desde el agua inicial hasta una salmuera de salinidad total siempre superior a la salinidad de la laguna estudiada. Se compara el análisis de la laguna con la

composición calculada de misma salinidad total, o también se puede interpolar una composición entre dos composiciones calculadas cuyas salinidades encuadran la salinidad de la laguna. Comparamos entonces las concentraciones L_1, L_2, \dots, L_N de los N componentes de la laguna con las concentraciones A_1, A_2, \dots, A_N del aporte evaporado de misma salinidad. La prueba de chi-cuadrado da una medida de la discrepancia entre los dos grupos de datos:

$$\chi^2 = (L_1 - A_1)^2 / A_1 + (L_2 - A_2)^2 / A_2 + \dots + (L_N - A_N)^2 / A_N$$

La aplicación directa de esta fórmula presenta un gran inconveniente en caso de composiciones de aguas concentradas. Los componentes mayores (Na, Cl) tienen un peso numérico mucho más importante que los componentes menores. Por ejemplo, si las concentraciones del sodio son $L = 100\,000$ mg/l y $A = 98\,000$ mg/l el término $(L-A)^2/A$ vale 40. Ahora si las concentraciones de la sílice son 100 y 98 mg/l el término $(L-A)^2/A$ vale 0,04. Para que todos los componentes tengan el mismo peso, vamos a aplicar una fórmula ligeramente adaptada de la prueba del chi-cuadrado utilizando las diferencias porcentuales:

$$\delta = |L - A| / (L + A) / 2$$

Comparamos estas diferencias con el vector nulo. En efecto, dos aguas son rigurosamente idénticas cuando todas las diferencias δ son nulas. En el ejemplo anterior, los dos pares de concentraciones tienen el mismo $\delta = 0,02$. Sin embargo, no se puede aplicar estrictamente la fórmula del chi-cuadrado con valores nulos porque implicaría divisiones por cero. Comparamos entonces los δ con una constante ε muy pequeña. Obtenemos:

$$\chi^2 = (\delta_1 - \varepsilon)^2 / \varepsilon + (\delta_2 - \varepsilon)^2 / \varepsilon + \dots + (\delta_N - \varepsilon)^2 / \varepsilon$$

$$\varepsilon \cdot \chi^2 = (\delta_1 - \varepsilon)^2 + (\delta_2 - \varepsilon)^2 + \dots + (\delta_N - \varepsilon)^2$$

Si $\varepsilon \rightarrow 0$, definimos un nuevo coeficiente:

$$\Phi^2 = \varepsilon \cdot \chi^2 = \delta_1^2 + \delta_2^2 + \dots + \delta_N^2$$

La suma de los δ^2 aumenta con el número de componentes. Para poder comparar grupos de aguas con diferentes números de componentes, hay que dividir la suma por el número de componentes N. Se llega entonces a la fórmula final:

$$\varphi^2 = (\delta_1^2 + \delta_2^2 + \dots + \delta_N^2) / N$$

Es el coeficiente de chi-cuadrado adaptado (o modificado) que aplicamos en los estudios individuales de cuencas cerradas. Lo llamamos también coeficiente de desviación. Su rango teórico va de 0 (concordancia perfecta) a 4 (discrepancia extrema), puesto que el valor máximo posible para δ es de 2. Sin embargo, en la práctica, los coeficientes de las aguas más dispares no sobrepasan 2. Un valor inferior a 0,1 indica una buena similitud entre las dos aguas: la laguna proviene en su mayor parte de la evaporación del aporte considerado. Un valor superior a 0,5 sugiere que no hay mucha relación entre la laguna y el aporte.

Dentro de los procesos que ocasionan una divergencia entre el modelo y la realidad, hemos citado la sobresaturación de algunos minerales en las aguas de lagunas. Se puede resolver este problema calculando la composición que tendría el agua de la laguna después de haber precipitado los minerales sobresaturados. Se compara la composición modificada de la laguna con el resultado de la simulación.

Por otra parte, la alcalinidad incluye los boratos. En salmueras, pueden constituir hasta los tres cuartos de la alcalinidad. La simulación computacional no toma correctamente en cuenta los boratos en salmueras neutras. Las alcalinidades calculadas son muchas veces muy inferiores a las reales. Si se tomará en cuenta la alcalinidad en el calculo del chi-cuadrado, el coeficiente tendría un valor elevado sugiriendo que no hay relación entre las aguas comparadas. Puesto que esta diferencia es explicada y sistemática, no incluimos la alcalinidad en el calculo del chi-cuadrado; sin embargo, presentamos siempre los valores de las alcalinidades reales y calculadas.

Veamos un ejemplo de calculo. La tabla 2 compara la composición de la salmuera FRA-4 de la Laguna del Negro Francisco con la composición de la vertiente evaporada FRA-10E.

	SALMUERAS		δ L-A /(L+A)/2	δ^2
	REAL (L)	SIMULADA (A)		
pH	7,50	6,89	0,085	0,0072
Alc	88,5	8,36	1,655	2,738
Cl	171000	158000	0,079	0,0062
SO4	30700	40400	0,273	0,0745
B	2130	1590	0,290	0,0843
Si	12,5	7,83	0,459	0,211
Na	85300	76900	0,104	0,0107
K	11400	13100	0,139	0,0193
Li	916	584	0,443	0,196
Ca	349	392	0,116	0,0135
Mg	16000	19400	0,192	0,0369

Tabla 2 : Ejemplo de comparacion de dos aguas por el metodo del chi-cuadrado modificado.

El coeficiente de desviación: $\varphi^2 = (\delta_{pH}^2 + \delta_{Alc}^2 + \delta_{Cl}^2 + \dots + \delta_{Mg}^2) / N$ vale 0,309 (N = 11). Este valor relativamente elevado sugiere que no hay mucha relación entre las dos aguas. Sin embargo, se nota la enorme diferencia entre las alcalinidades y el peso mayor de este componente en el calculo del coeficiente de desviación. Se nota también la concentración muy elevada en boro: más de 2 g/l. La alcalinidad elevada de la salmuera real se debe a los boratos. Si se excluye la alcalinidad del calculo de φ^2 , se obtiene un coeficiente de desviación de 0,066, lo que indica un buena concordancia entre las dos soluciones.

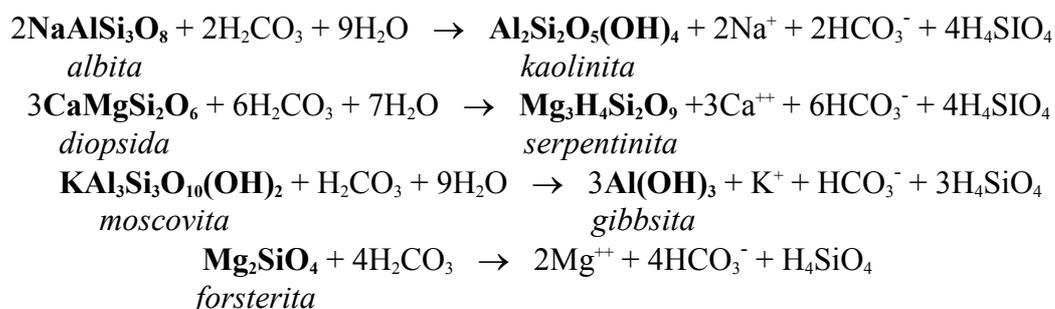
VII. RELACION ENTRE VIA EVOLUTIVA Y LITOLOGIA DE LA CUENCA ORIGEN DE LOS COMPONENTES

1. Alteración de rocas plutónicas y volcánicas

Consideremos una cuenca de drenaje ideal constituida exclusivamente de rocas plutónicas (granito) o volcánicas perfectamente puras, es decir formadas exclusivamente de silicatos de Na, K, Mg, Ca. Las aguas de lluvia al caer sobre la cuenca van disolviendo el gas carbónico de la atmósfera:

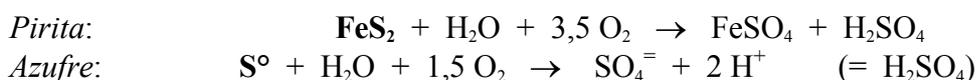


Las aguas de lluvia contienen ácido carbonico que es el principal agente de alteración meteórica de las rocas. Los silicatos se alteran según reacciones del tipo:



La alteración de silicatos por aguas de lluvia produce minerales secundarios con liberación de cationes y de sílice disuelta. Puesto que en silicatos puros no hay cloruro ni sulfato, el único anión que balancea las cargas positivas de los cationes es el bicarbonato HCO_3^- que proviene del gas carbónico de la atmósfera. Las aguas de alteración son del tipo: Na-K-Ca-Mg / HCO_3^- . Sus salinidades son muy bajas: generalmente inferiores a 200 mg/l. Por otra parte, la acidez de las aguas de alteración queda neutralizada ya que los cationes reemplazan los iones H^+ y por tanto el pH puede elevarse. Cuando estas soluciones se evaporan y se concentran, solamente pueden precipitar minerales carbonatados: calcita (CaCO_3), magnesita (MgCO_3), gaylussita ($\text{Na}_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), trona ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{NaHCO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), natron ($\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$), dentro de los más comunes. Las aguas de alteración siguen la vía carbonatada llegando a salmueras carbonatadas con pH entre 10 y 11.

Las rocas volcánicas o plutónicas raras veces son perfectamente puras. Contienen mineralizaciones, inclusiones fluidas y azufre, que proveen cloruro y sulfato. El bicarbonato puede ya no ser el anión principal. De particular importancia es la oxidación de sulfuros y del azufre:



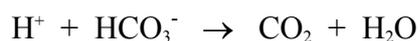
La oxidación del azufre y de los sulfuros produce ácido sulfúrico. Las aguas ácidas de lixiviación alteran fuertemente los silicatos. Por ejemplo, la alteración de la albita se escribe:



Es una reacción similar a la producida por el ácido carbonico, pero con sulfato en vez de bicarbonato. Aquí también los protones están reemplazados por cationes, lo que neutraliza parte de la acidez. La salinidad de aguas de alteración sulfatadas es más elevada que la de aguas de lixiviación carbonatadas. Puede superar el gramo por litro. El ácido carbónico es muy débil y su concentración muy baja en aguas de lluvia, puesto que depende de la concentración del gas carbónico de la atmósfera. Su acidez es muy rápidamente neutralizada por la alteración de silicatos. Al contrario, el ácido sulfúrico es un ácido fuerte; su concentración depende de los sulfuros y azufre presentes en las formaciones litológicas. La alteración de silicatos puede no ser suficiente para neutralizar todos los iones H^+ producidos por la oxidación de sulfuros o azufre. Las aguas de lixiviación pueden quedar ácidas, con pH inferiores a 4. La salinidad de tales aguas ácidas puede llegar a varios gramos por litro.

Las aguas de alteración que han adquirido sulfato por oxidación de azufre o de sulfuros siguen al evaporarse una de las tres vías evolutivas sulfatadas representadas en la figura 13. La vía precisa va a depender de la proporción entre bicarbonato y sulfato en el agua de alteración.

- si la adición de sulfato es mínima, el agua seguirá la vía carbonatada
- si la adición de sulfato es algo más importante y hay poco calcio, el agua seguirá la vía sulfatada directa o la vía sulfatada alcalina
- si la adición de sulfato es muy importante, la concentración en bicarbonato puede bajar considerablemente (en aguas de lixiviación ácidas ya no quedan especies carbonatadas). El exceso de protones que no han sido neutralizados por la alteración de silicatos va a eliminar parte del bicarbonato:



Tales aguas siguen la vía sulfatada neutra, puesto que al principio de la evaporación la concentración del bicarbonato se ha vuelto inferior a la del calcio. Pero la concentración del calcio es generalmente muy inferior a la del sulfato, anión mayor, lo que induce la vía sulfatada neutra.

La concentración del sulfato es proporcional a la intensidad del proceso de oxidación de sulfuros o del azufre. La vía sulfatada neutra indica una lixiviación de mineralizaciones o de azufre más importante que la vía sulfatada directa. También la salinidad de las aguas de lixiviación aumenta con la intensidad de la oxidación. La salinidad de las aguas de aporte aumenta desde las que siguen la vía carbonatada (50-200 mg/l) hasta las que siguen la vía sulfatada neutra (500-1500 mg/l).

2. Alteración de rocas sedimentarias

Hemos tratado hasta ahora de rocas plutónicas o volcánicas constituidas de silicatos con mineralizaciones sulfuradas o con azufre, caso muy común en los Andes Centrales. Veamos

ahora lo que pasa en cuencas con formaciones sedimentarias. Las rocas sedimentarias tienen composiciones más variadas que las rocas volcánicas o plutónicas.

<u>TIPO DE ROCA</u>	<u>COMPOSICIÓN QUÍMICA</u>
Rocas detríticas:	
- arenas	SiO ₂
- areniscas	SiO ₂
- arenas feldespáticas	SiO ₂ y silicatos
Rocas biogénicas:	
- calizas marinas	CaCO ₃
- diatomeas, radiolaritas	SiO ₂
- carbón	C
Rocas de alteración meteórica:	
- arcillas	silicatos
- arcillitas	silicatos
Rocas químicas:	
- sílex, pedernal	SiO ₂
- calizas químicas	CaCO ₃
- dolomita	CaMg(CO ₃) ₂
- yeso	CaSO ₄ ·2H ₂ O
- anhidrita	CaSO ₄
- halita	NaCl

Tabla 3 : Composición química de las principales rocas sedimentarias

La tabla 3 presenta la composición química de las rocas sedimentarias más comunes. La mayor parte fueron depositadas en un ambiente salino, marino o continental. Componentes solubles (cloruros, sulfatos) quedan retenidos como iones adsorbidos sobre minerales arcillosos o disueltos en agua salina intersticial (White et al., 1963). Por esta razón, rocas poco alterables constituidas de sílice o arcillas pueden proveer notables cantidades de componentes sin relación con su composición química. Por otra parte, es notoria la predominancia del calcio en las rocas sedimentarias cuyas aguas de alteración lo tienen generalmente en altas concentraciones de calcio. Al evaporarse muy a menudo siguen la vía cálcica.

La salinidad de aguas de terrenos sedimentarios es generalmente elevada. Depende de la solubilidad de los minerales lixiviados y de la abundancia de las impurezas. Raras veces es inferior a 500 mg/l y puede llegar a varios gramos por litro en caso de lixiviación de sales evaporíticas.

3. Relación entre litología y vía evolutiva

La tabla 4 resume la relación entre litología de la cuenca y vía evolutiva. Los valores de salinidad de las aguas de alteración son ilustrativos; puede haber mucha variación, en particular para las aguas de rocas sedimentarias. La figura 15 muestra la distribución de todas las aguas de aporte de

las cuencas cerradas estudiadas. Se observa claramente el aumento de salinidades desde las aguas de vía carbonatada hasta las de vía cálcica.

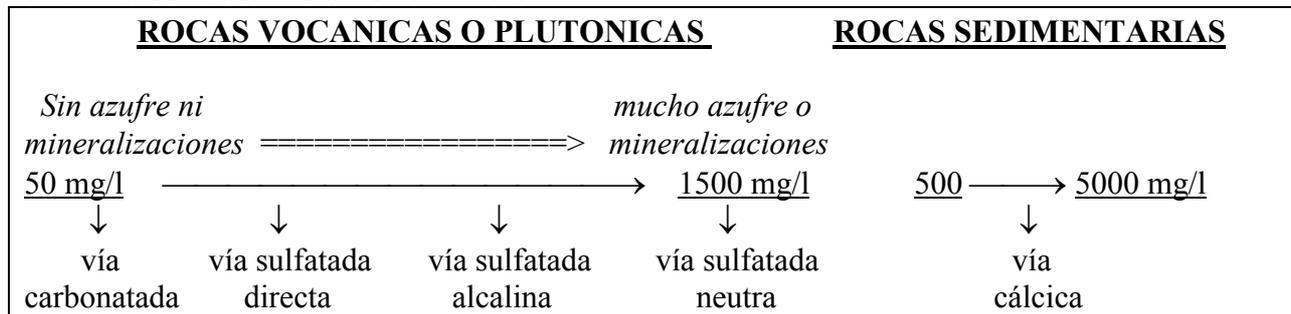


Tabla 4 : Relación entre la litología de la cuenca y las vías evolutivas

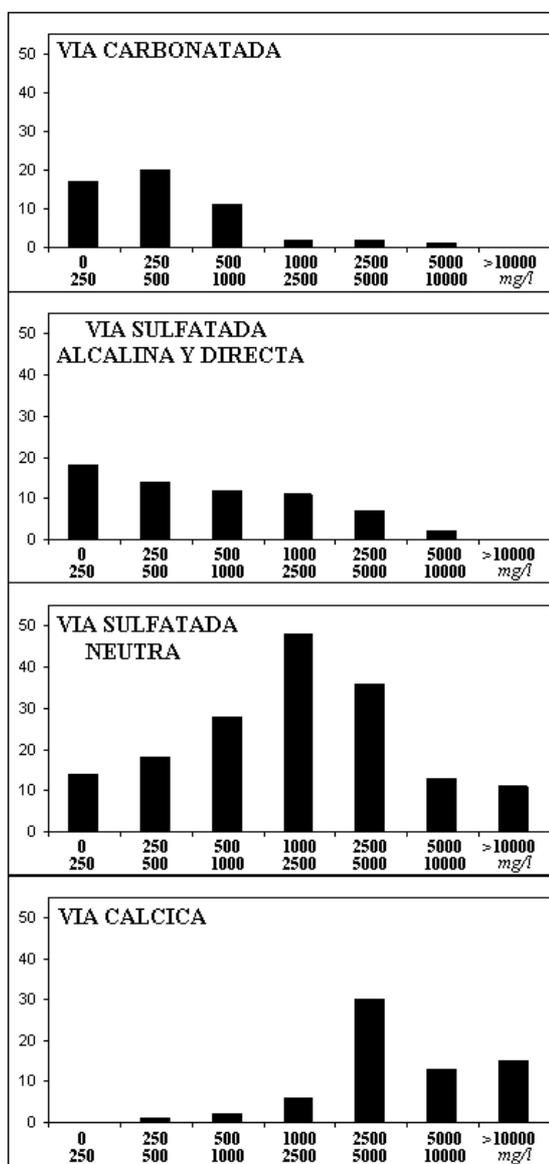
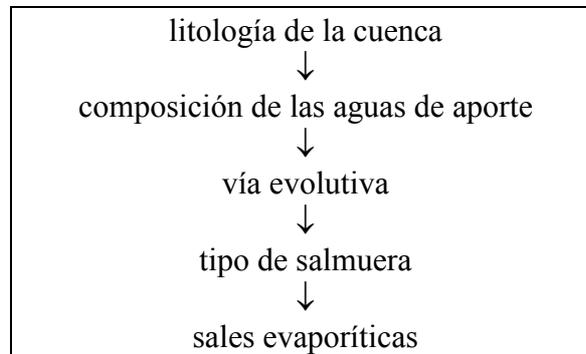


Fig.15 : Histogramas de salinidades de las aguas de aporte agrupadas según sus vías evolutivas

Es posible sintetizar en el siguiente esquema la relación entre la litología de una cuenca cerrada y la naturaleza de las sales evaporíticas que precipitan en su salar.



Hemos tratado hasta ahora casos de cuencas con litología relativamente uniforme. Pero ocurren también varias cuencas que contienen a la vez formaciones volcánicas y sedimentarias. Cuando las distintas formaciones están bien separadas en la cuenca, cada una de ellas provee aguas de alteración que reflejan la litología de su sector. Es el caso de la cuenca del salar de Atacama, constituida al este por formaciones volcánicas de la Cordillera de los Andes y al oeste por terrenos en gran parte sedimentarios de la Cordillera de Domeyko. Sin embargo, en otras cuencas, hay yuxtaposición de formaciones volcánicas y sedimentarias o también formaciones volcano-sedimentarias con mezclas de fragmentos volcánicos y sedimentarios. En estos casos, por supuesto, la relación entre litología y vía evolutiva se vuelve muy compleja. Generalmente no se conocen con precisión las distribuciones espaciales de cada formación, ni los acuíferos, lo que hace muy difícil relacionar la composición de las aguas de aporte con la litología. En estos casos, la vía evolutiva puede reflejar la influencia del componente litológico principal de la cuenca.

La lixiviación de antiguas evaporitas puede aumentar considerablemente la salinidad de un agua de aporte sin modificar su vía evolutiva. Consideremos un antiguo nivel de halita (NaCl) recubierto por formaciones volcánicas sin mineralizaciones ni azufre. Un agua que lixivía estas formaciones pertenece a la vía carbonatada, pero su salinidad puede llegar a varios gramos por litro debido a su alto contenido en Na y Cl. En la práctica, se razona a la inversa: si se encuentra un agua salada de vía evolutiva carbonatada, eso indica la existencia de antiguas evaporitas recubiertas por rocas volcánicas poco mineralizadas.

VIII. CLASIFICACION DE AGUAS Y DIAGRAMAS

1. Diagramas triangulares.

Para clasificar un agua según su composición química, hay que fijar límites, según ciertos criterios, a las concentraciones de los componentes. Los tipos químicos así definidos son en parte arbitrarios especialmente cuando las concentraciones están cerca de los límites. En este estudio hemos utilizado la clasificación de Eugster y Hardie (1978). Los componentes considerados para la clasificación son:

- para los cationes: Na+K+Li, Ca y Mg
- para los aniones : Cl, SO₄ y HCO₃ (+ CO₃)

Se representan en diagramas triangulares (Fig.16) y en formulaciones. Algunas raras veces, presentamos también el diagrama triangular: Na, K+Li, Ca+Mg. Los límites escogidos son 5% y 25%:

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

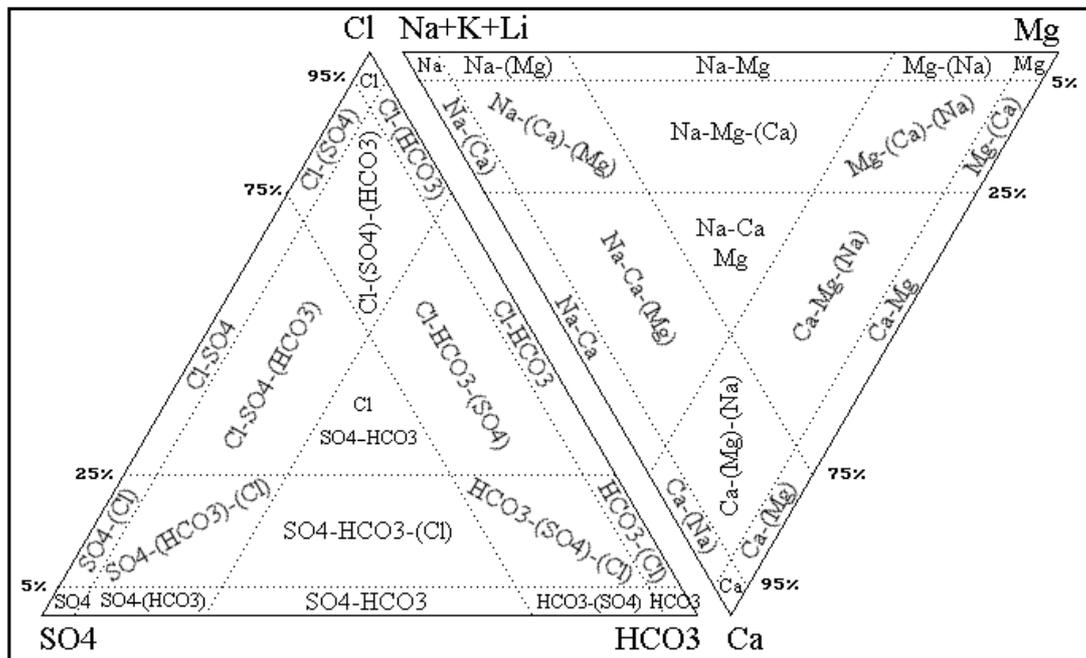


Fig.16 : Tipos químicos de aguas basados sobre límites a 5% y 25% de las concentraciones en miliequivalentes.

Cuando varios componentes están dentro del mismo rango de concentración, aparecen en la formulación desde el más concentrado hasta el menos concentrado. Varios sectores de los diagramas triangulares están divididos en subsectores por las bisectrices del triángulo, pero sin ser trazados en los diagramas. Por ejemplo: Na-Mg y Mg-Na; Na-Ca-(Mg) y Ca-Na-(Mg). La formulación de un tipo químico aparece de la siguiente manera:

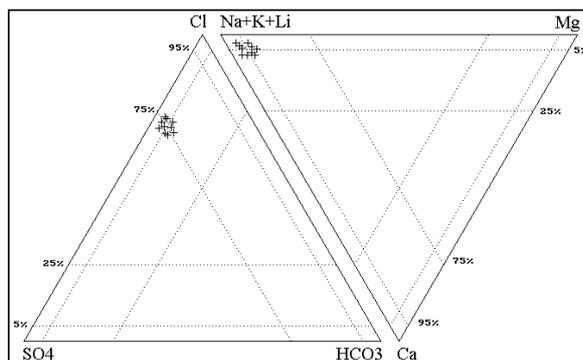
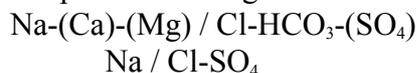


Fig.17 : Grupo homogéneo de aguas arbitrariamente divididas en tipos químicos distintos.

Este tipo de clasificación puede delimitar grupos ficticios de aguas dentro de un grupo homogéneo. La figura 17 muestra el caso de un grupo homogéneo de aguas con cuatro composiciones catiónicas y cuatro aniónicas. Combinandolas, se puede llegar hasta 16 tipos químicos, lo que no tiene mucho sentido. Cambiando los límites a 10 y 30%, todas las aguas pertenecerían a un solo tipo químico. Por eso, en este estudio, no nos atenderemos fijamente a tipos químicos predefinidos.

2. Diagramas circulares

Para cada salar, la composición química de todas las aguas de aporte está representada en diagramas circulares. Hemos escogido este tipo de diagrama no convencional por dos razones:

- es el más fácil de implementar con softwares comunes
- otros diagramas más convencionales disponibles en softwares especializados en aguas están destinados a aguas diluidas de salinidad generalmente inferior a un gramo por litro (1000 mg/l). Las aguas de aporte en los salares del norte de Chile tienen salinidades desde 50 mg/l hasta 80 000 mg/l.

Los diagramas circulares son representaciones porcentuales (Fig.18). Se divide verticalmente el círculo por un diámetro en dos partes iguales. Los aniones están en el semi-círculo izquierdo y los cationes en el semi-círculo derecho. Cada componente está representado por un sector de superficie proporcional al porcentaje de su concentración en miliequivalentes por litro. Los porcentajes indicados están redondeados a números enteros: 0% significa en realidad inferior a 1%.

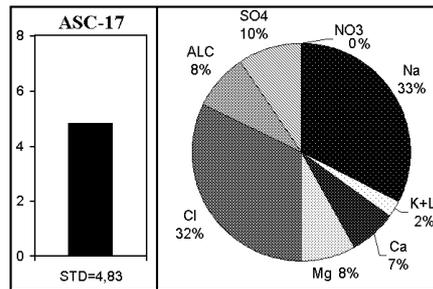


Fig.18 : Ejemplo de diagrama circular usado en los estudios individuales de salares

Las representaciones porcentuales tienen un inconveniente, pues no indican las concentraciones absolutas. Dos aguas de salinidad muy distintas pueden tener el mismo diagrama porcentual. Por eso hemos presentado al lado del diagrama circular la salinidad total del agua en gramos por litro. La escala es la misma para todas las aguas de un mismo salar y corresponde al agua de aporte más salada de la cuenca.

3. Diagramas de barras; calidad de aguas.

La calidad de todas las aguas de aporte de cada cuenca está representada en diagramas de barras (Fig.19).

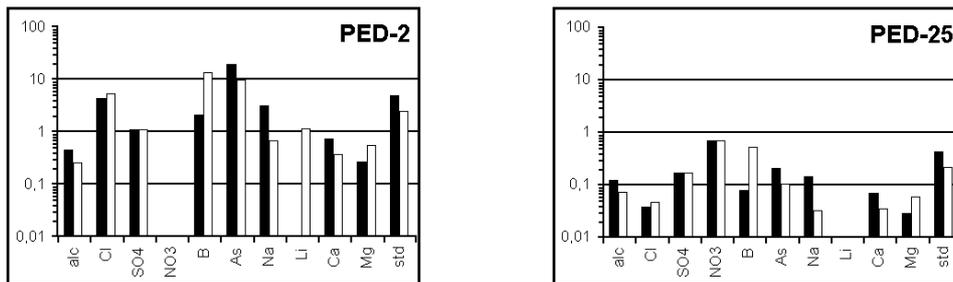


Fig.19 : Ejemplos de diagramas de calidad de agua usados en estudios individuales de salares

	<u>POTABLE</u>	<u>RIEGO</u>
HCO₃ (Alc)	350	600
Cl	250	200
SO₄	250	250
NO₃	44	44
B	5	0,75
As	0,05	0,10
Na	200	900
Li	---	2,5
Ca	200	400
Mg	125	60
STD	500	1000

Tabla 5 : Concentraciones máximas permisibles en mg/l para aguas potabla y aguas de riego

La altura de las barras es igual a la razón entre la concentración del componente y la concentración máxima autorizada por la norma. Se ha utilizado principalmente las normas chilenas, complementándolas con valores de las normas de Canada, Estados Unidos y de la FAO (Tabla 5). Las barras negras corresponden a la norma de potabilidad y las barras blancas a la norma de riego. Un valor inferior a uno indica que la concentración del componente está dentro de la norma, y sobre uno, su concentración la excede. En los ejemplos de la figura 19, la concentración de todos los componentes de PED-25 está por debajo de las dos normas. Es un agua apta para cualquier uso. Al contrario, PED-2 es un agua con capacidad de uso limitado. Debido a las altas salinidades de numerosas aguas de aporte, no es posible usar una escala aritmética para la altura de barras. Con una escala logarítmica, desde 0,01 hasta 100, se puede representar todas las aguas de aporte de todas las cuencas en la misma escala, lo que facilita considerablemente la visualización de los diagramas.

IX. BALANCE HIDRICO DE LAS LAGUNAS

Los estudios hidrogeológicos publicados sobre el norte de Chile presentan con frecuencia los balances hídricos de las cuencas. Para poder establecerlos con cierta precisión, se necesita muchos datos difíciles de obtener ya que las mediciones de sus parámetros son escasas o irregulares en el tiempo. Presentamos aquí un enfoque más limitado, pero más fácil de establecer, como es el balance hídrico de lagos y lagunas.

Consideremos una laguna permanente en una cuenca cerrada bajo clima árido. Recibe agua por la cuenca de drenaje (vertientes, ríos, napas subterráneas), y también por las precipitaciones directas sobre el espejo de agua. Pierde agua por evaporación desde la superficie y también por infiltraciones en el fondo de la laguna (Fig.20). No se considera transpiración por vegetación en los bordes. Sean:

- S : superficie de la laguna (en m^2)
- H_e : altura de evaporación potencial (en $m/año$)
- H_p : altura de las precipitaciones (en $m/año$)
- $V_e = SH_e$: volumen de agua evaporada desde la superficie (en $m^3/año$)
- $V_p = SH_p$: volumen de precipitaciones sobre la superficie (en $m^3/año$)
- V_{ap} : volumen de los aportes por la cuenca de drenaje (en $m^3/año$)
- V_i : volumen de las infiltraciones (en $m^3/año$)
- C_{ap} : concentración promedio de un componente conservativo de los aportes (g/l)
- C_L : concentración promedio de ese componente conservativo en la laguna (g/l)

Si la laguna es permanente y de superficie promedia estable de un año al otro, entonces los aportes igualan las pérdidas:

$$\begin{aligned} V_{ap} + V_p &= V_e + V_i \\ V_{ap} + SH_p &= SH_e + V_i \end{aligned}$$

Se obtiene el balance hídrico de la laguna:

$$V_{ap} = S(H_e - H_p) + V_i$$

Las lagunas del norte de Chile se suponen en equilibrio dinámico, es decir que la concentración de sus componentes químicos es estable y no aumenta con los años. Todos los componentes que entran en la laguna o son consumidos por minerales, o participan a procesos biológicos o se infiltran por el fondo. En lagunas poco profundas, las cantidades de sales disueltas corresponden a unos centenares o unos miles de años de alimentación, un tiempo muy corto a escala geológica. Si no estuvieran en equilibrio dinámico, significaría que ocurrió algún evento climático hace poco tiempo a partir del cual la laguna empezó a variar su concentración. Sin embargo, el actual clima en el norte chileno no ha variado notablemente desde por lo menos 10 000 años.

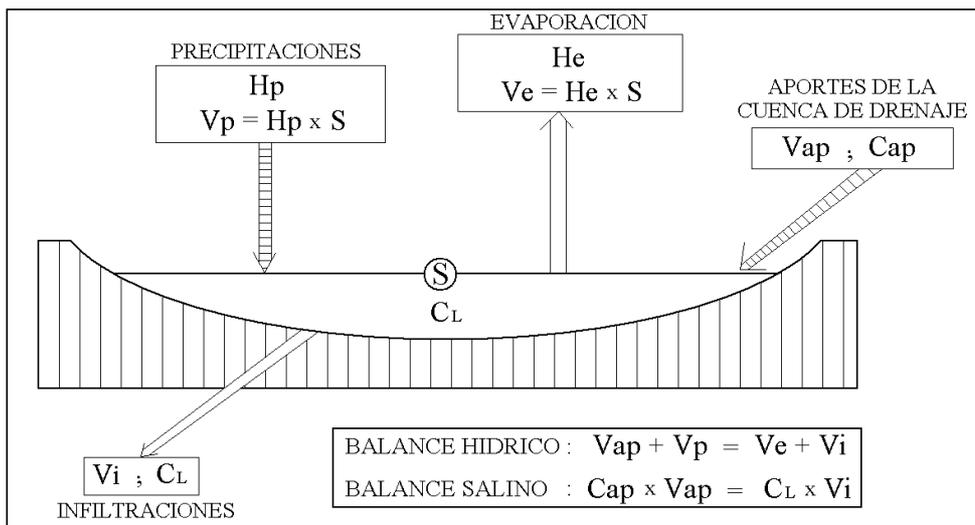


Fig.20 : Balance hídrico y balance salino de una laguna en una cuenca cerrada en clima árido.

Consideremos un componente conservativo, es decir que no participa en ninguna precipitación de mineral, ni entra en ningún proceso biológico. Se pierde solamente por las infiltraciones. Es el caso del cloruro hasta la precipitación de la halita en salmueras concentradas y del litio a todas salinidades. Cada año entra una cantidad $V_{ap}C_{ap}$ (C_{ap} = concentración promedio en los aportes) de este componente y se pierde por infiltración V_iC_L (C_L = concentración en el lago). En caso de equilibrio dinámico, obtenemos el balance salino de la laguna:

$$V_{ap}C_{ap} = V_iC_L$$

Los dos balances constituyen un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas: V_{ap} (volumen de los aportes por la cuenca) y V_i (volumen de las infiltraciones). Resolviendolo, se obtiene:

$$\begin{aligned} V_{ap} &= S(H_e - H_p) / (1 - C_{ap}/C_L) \\ V_i &= S(H_e - H_p) / (C_L/C_{ap} - 1) \end{aligned}$$

Los parametros S , H_e , H_p , C_{ap} , C_L , son relativamente faciles de conseguir. La superficie de la laguna se mide en mapas topográficos o en fotografías aéreas; la evaporación potencial y la altura de precipitaciones se obtienen en registros meteorológicos; las concentraciones de los aportes y de la laguna necesitan una campaña de muestreo. Mientras más completo el muestreo, más precisos los balances hídrico y salino.

Formulación simplificada: El balance salino puede escribirse: $C_L/C_{ap} = V_{ap}/V_i$. La razón entre aportes e infiltraciones es igual a la razón entre la concentración en la laguna y en los aportes de los componentes conservativos. Por ejemplo, si la concentración en cloruro es de 0,1 g/l en los aportes y 100 g/l en la laguna, entonces el volumen de infiltraciones corresponde solamente a la milésima parte de los aportes por la cuenca. Por regla general, mientras más amplio es el intervalo de concentraciones entra aportes y laguna, más reducidas son las infiltraciones. En salares y lagos salados, el volumen de las infiltraciones es casi siempre despreciable en relación al volumen de los aportes: $V_i \ll V_{ap}$. En este caso la fórmula del balance hídrico se simplifica:

$$V_{ap} = S(H_e - H_p)$$

Para estimar el volumen de aportes desde la cuenca de drenaje, basta conocer la superficie de la laguna y los parámetros climáticos de la zona. Si las infiltraciones son casi siempre despreciables en el balance hídrico, no lo son en absoluto en el balance salino puesto que son ellas las que determinan la salinidad de la laguna.

Se puede establecer el balance hídrico (con o sin las infiltraciones) para una laguna completa o para pequeñas lagunitas esparcidas a lo largo de las orillas de los salares. En el primer caso, se obtiene el volumen de aportes de toda la cuenca; en el segundo caso se determina el caudal entrante de la vertiente o del río que alimenta la pequeña lagunita.

Coefficiente de escorrentía: Lo definimos como la razón entre el volumen de agua que entra en la laguna [$V_{ap} = S(H_e - H_p)$] y el que cae sobre la cuenca de drenaje [$V_{dr} = S_{dr} \times H_p$]:

$$C_{esc} = V_{ap} / V_{dr} = S/S_{dr} \times (H_e/H_p - 1)$$

Se desprecia la infiltraciones, pues se trata de un coeficiente relacionado al balance hídrico. Aquí también muy pocos parámetros son necesarios para determinar este coeficiente.

X. ORIGEN DE LOS COMPONENTES EN AGUAS DE CUENCAS CERRADAS DEL NORTE DE CHILE

1. Salinidad de las aguas de aporte

La característica que probablemente más diferencia las aguas de aportes en las cuencas del norte de Chile en relación a aguas del centro o del sur del país es el amplio rango de sus salinidades, que van desde 50 mg/l hasta 80 000 mg/l. Hemos visto durante nuestro estudio que las aguas de alteración de rocas volcánicas sin mineralizaciones ni azufre tienen una salinidad comprendida entre 50 y 500 mg/l. Estudios de aguas de alteración de rocas volcánicas ácidas en Estados Unidos dieron una salinidad promedio de 210 mg/l (D.E. White et al., 1963; A.F. White et al., 1980). En Bolivia, Risacher y Fritz (1991) encontraron un promedio de 202 mg/l para aguas de alteración de andesitas. Las salinidades pueden aumentar por encima de 1000 mg/l si hay presencia de azufre o de mineralizaciones. En cuanto a la alteración de rocas sedimentarias, hemos visto también que la salinidad de sus aguas de alteración puede alcanzar 1000 a 2000 mg/l.

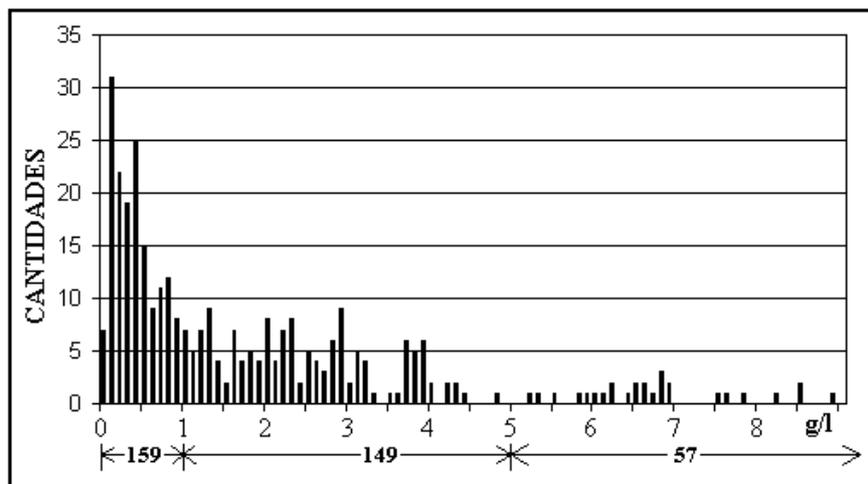


Fig.21 : Histograma de salinidades de aguas de aporte.

La figura 21 muestra un histograma de salinidades de las aguas de aporte hasta 9 g/l. Hemos encontrado 159 aportes con una salinidad inferior a 1 g/l. La mayor frecuencia corresponde a aguas entre 100 y 200 mg/l de salinidad. Hay 149 aportes salobres, con salinidades entre 1 y 5 g/l y 57 aportes salados entre 5 y 80 g/l. Se nota que las mayores frecuencias corresponden a salinidades de aguas de alteración de rocas volcánicas sin mineralizaciones ni azufre. Sin embargo, hay más aportes salobres y salinos que diluidos (el histograma puede ser engañoso a primera vista). La pregunta es de donde proviene la elevada salinidad de la mayor parte de los aportes.

2. Relación Na / Cl

La figura 22 muestra la relación entre Na y Cl en miliequivalentes por litro (meq/l) en aguas de aporte con alto contenido en estos dos componentes más comunes. Se distingue nítidamente dos grupos de aguas:

- un grupo de aguas con concentraciones en Cl inferiores a 200 mg/l (5,6 meq/l), cuyos puntos están diseminados por encima de la recta de equimolaridad (más exactamente de "equivalencia") $\text{Na} = \text{Cl}$. Son aguas de alteración de rocas volcánicas.

- otro grupo de aguas cuyos puntos se encuentran alineados sobre, o muy cerca, de la recta equimolar $\text{Na} = \text{Cl}$. Cabe notar que para obtener concentraciones equimolares en Na y Cl, hay que disolver cloruro de sodio puro, (halita NaCl). Este tipo de aguas de alteración han lixiviado antiguas costras salinas recubiertas por formaciones geológicas más recientes.

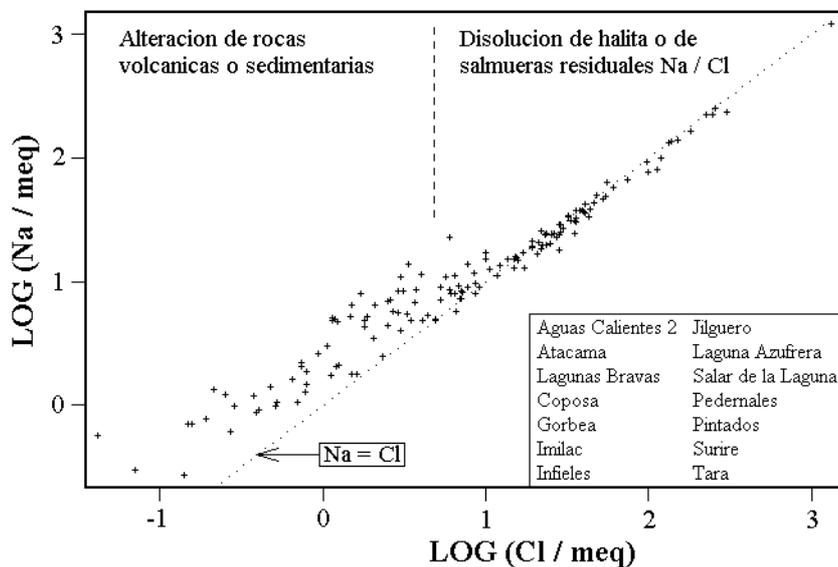


Fig.22 : Relación entre sodio y cloruro en aguas de aporte

3. Relación Ca / SO₄

La figura 23 presenta la relación entre Ca y SO₄ de algunos salares cuyas aguas de aporte están relativamente concentradas en estos dos componentes. Los puntos representativos están diseminados a cada lado de la recta equimolar $\text{Ca} = \text{SO}_4$. Su recta de regresión está muy cerca de la recta equimolar, y el coeficiente de correlación es de 0,93. Eso sugiere una redisolución de sulfato de calcio por aguas de aporte diluidas. Las aguas de alteración han lixiviado yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) o anhidrita (CaSO_4) de antiguas evaporitas en la cuenca de drenaje. Los puntos están más dispersos que en la relación entre Na y Cl. Esto se debe a que los sulfatos de calcio son sales poco solubles, al contrario del cloruro de sodio. Las cantidades de Ca y SO₄ aportadas no son tan elevadas como para ocultar las concentraciones iniciales, no equimolares, obtenidas por alteración de rocas.

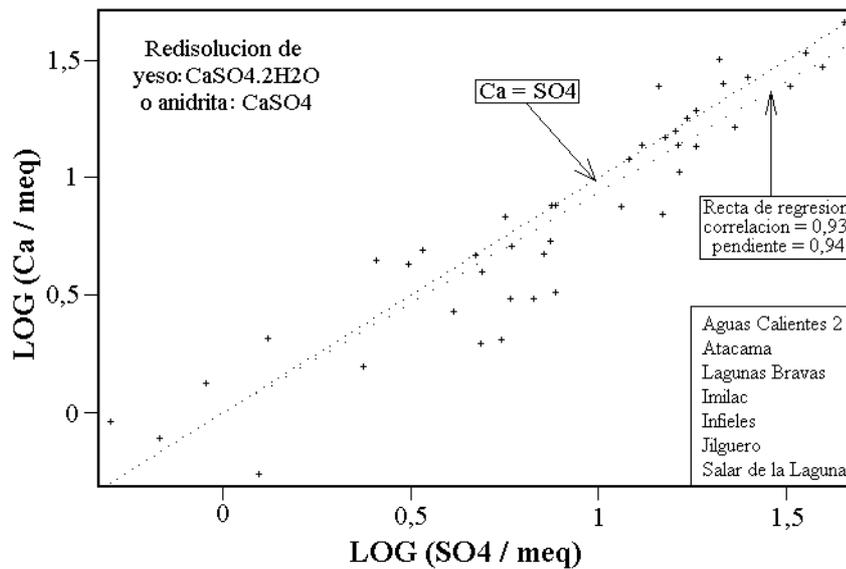


Fig.23 : Relación entre Ca y SO_4 en aguas de aporte de algunos salares

Aparece entonces que las altas salinidades de varias aguas de aporte se debe a la redisolución de cloruro de sodio y sulfato de calcio de antiguas evaporitas recubiertas por formaciones geológicas más recientes. Estas dos sales son los principales constituyentes de la Cordillera de la Sal, en la cuenca del salar de Atacama cuyas aguas de aporte aparecen en los dos gráficos de las figuras 22 y 23.

4. Relación $\text{Na}+\text{Ca} / \text{Cl}$ y $\text{Na}+\text{Mg} / \text{Cl}$

Pero además existen otras sales evaporíticas y salmueras residuales asociadas a las antiguas evaporitas. Para detectar otros aportes evaporíticos hay que buscar relaciones equimolares entre combinaciones de varios constituyentes, como por ejemplo entre Na y $\text{Cl}+\text{SO}_4$ o $\text{Na}+\text{Mg}$ y Cl. No se debe combinar demasiados componentes, pues es evidente que la suma de todos los cationes iguala la suma de todos los aniones. Si se combina los dos cationes mayores con los dos aniones mayores, es natural obtener una relación casi equimolar, sin que eso signifique una redisolución de sales constituidos por estos cuatro componentes. En el estudio individual de los salares, se ha puesto varias veces en evidencia una relación $\text{Na}+\text{Ca} = \text{Cl}$, y con menos frecuencia una relación $\text{Na}+\text{Mg} = \text{Cl}$.

La figura 24 muestra la relación $\text{Na}+\text{Ca}$ versus Cl en aguas de aporte de varios salares. La diferencia entre los dos tipos de aguas de aporte es muy nítida.

- las aguas cuyos puntos están diseminados por encima de la recta equimolar $\text{Na}+\text{Ca} = \text{Cl}$ son aguas de alteración de rocas volcánicas o sedimentarias.

- las aguas cuyos puntos se encuentran alineados sobre la recta equimolar han redissuelto cloruro de sodio y de calcio. Existe una sal evaporítica de cloruro de calcio, la antarctica ($\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Sin embargo, esta sal cristaliza solamente a muy baja temperatura (-40°C) como lo indica su nombre. Se encuentra en ambientes más fríos que en los Andes Centrales y no se ha

detectado en esos salares. Lo que sí puede existir, son salmueras residuales de tipo Na-Ca / Cl que salinizan aguas diluidas aportando estos tres componentes mayores.

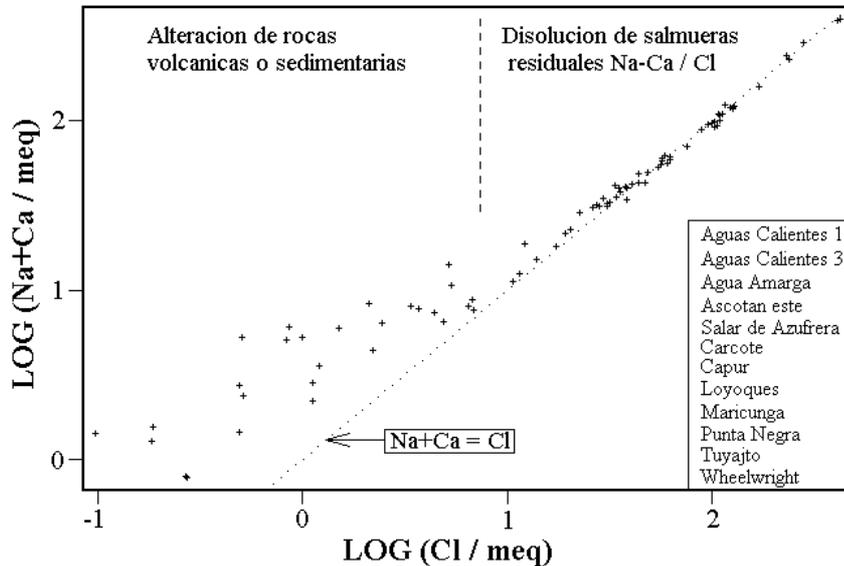


Fig.24 : Relación entre Na+Ca y Cl en aguas de aporte de algunos salares

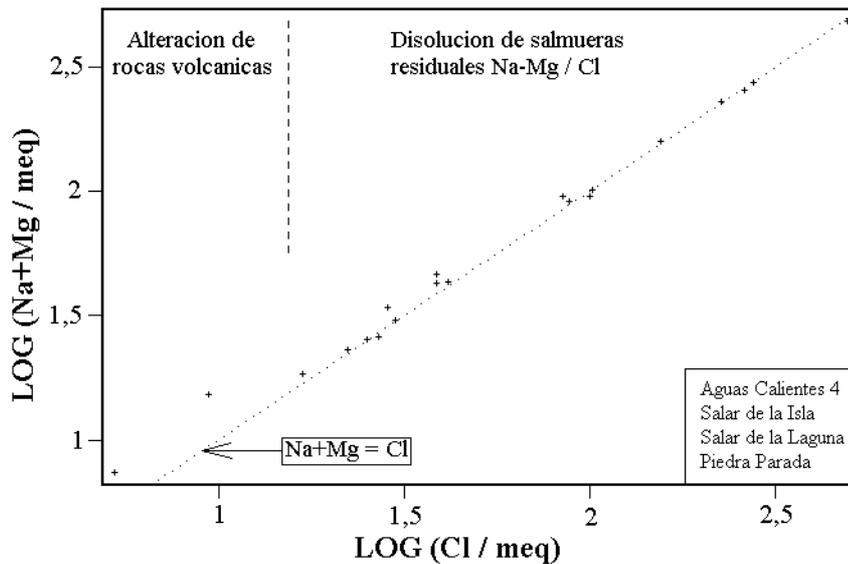


Fig.25 : Relación entre Na+Mg y Cl en aguas de aporte de algunos salares

La figura 25 muestra una salinización similar de aguas diluidas por salmueras residuales de tipo Na-Mg / Cl. Hemos encontrado solamente cuatro salares con esta característica. Aquí también no se puede tratar de redisolución de sales, ya que el cloruro de magnesio (bischofita: $MgCl_2 \cdot 6H_2O$) es una sal extremadamente soluble que no precipita en los Andes Centrales por las mismas razones de requerir muy bajas temperaturas.

5. Otras relaciones entre cationes y aniones

La salinización de las aguas de aporte se hace casi siempre por estos cuatro tipos de sales o salmueras: (Na / Cl), (Ca / SO₄), (Na+Ca / Cl), (Na+Mg / Cl). Cabe notar que también pueden existir salmueras residuales de tipo Na / Cl que tienen el mismo efecto que la sal cristalizada sobre las aguas diluidas. Se ha detectado algunos casos de salinización por otros componentes:

- por sales Na-Ca / SO₄ en una vertiente del salar de Coposa
- por sales o salmueras Na / CO₃-Cl-SO₄ en una vertiente cerca del río Astaburuaga en la cuenca de la laguna del Negro Francisco.
- por sales Ca-Mg / SO₄ en las vertientes del salar de Gorbea
- por sales o salmueras Na / Cl-SO₄ en vertientes de Laguna Verde y del salar de Punta Negra.

6. Influencia del termalismo

La Cordillera del Norte de Chile presenta una intensa actividad geotermal ligada al volcanismo plio-cuaternalio (Lahsen, 1976). No es fácil precisar la temperatura a partir de la cual se puede considerar una agua como termal. Schoeller (1962) define como termal un agua cuya temperatura es superior de 4°C a la temperatura promedio de la atmósfera. Heath (1983) sugiere un aumento de solamente 2 °C. Por otra parte, las vertientes y napas muestreadas se escalonan entre 1500 m y 4800 m de altura. La temperatura promedio de la atmósfera disminuye de 20°C a 1500 m de altura hasta -2,5°C a 4800 m (Grilli et al., 1986). Un tercio de las vertientes fluyentes y de las napas subterráneas tienen una temperatura superior a 20°C, y por tanto pueden ser consideradas como termales. En realidad la proporción debe ser superior, puesto que tenemos mucho más muestras por encima de 3000 m.

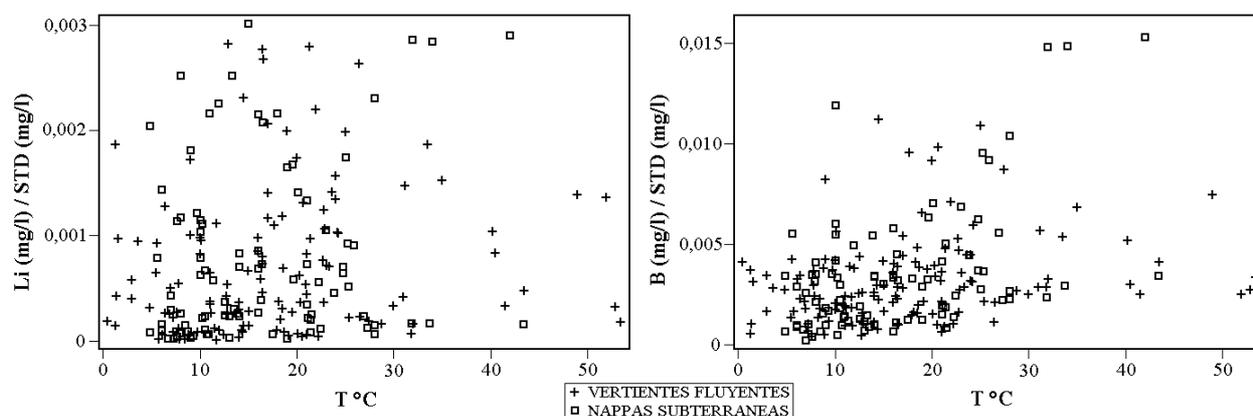


Fig.26 : Concentración relativa a la salinidad de Li y B en función de la temperatura del agua.

Hemos buscado relaciones entre la temperatura y los componentes disueltos de las vertientes fluyentes y de las napas subterráneas. Las aguas casi estancadas y en contacto con la atmósfera de las vertientes difusas no tienen temperaturas representativas de las aguas profundas. No hemos encontrado relación clara entre termalismo y composición de las aguas. Varios autores atribuyen un origen termal al litio y al boro (Chowdhury et al., 1974; White et al., 1976; Berthold y Baker, 1976; Smith, 1976). La figura 26 presenta la concentración porcentual (relativa a la salinidad

total) del litio y del boro en las aguas de vertientes fluyentes y napas. No aparece un aumento nitido de las concentraciones con la temperatura. Las tres aguas de contenido porcentual más elevado en boro provienen de la misma napa del salar de Ascotán (ASC-1, 3 y 15). También tienen un alto contenido en litio. Siendo estas aguas salobres, no se puede descartar un aporte por antiguas evaporitas o salmueras residuales. Risacher y Fritz (1991) observaron la misma ausencia de relación entre termalismo y composición de aguas en el vecino Altiplano boliviano. Por otra parte, hay que señalar el muy bajo contenido porcentual del magnesio en las aguas termales del sector de Mamiña en la cuenca del salar de Pintados (ver el estudio individual). No se explica esta anomalía.

7. Aportes atmosféricos

En las cuencas cerradas de la alta Cordillera chilena, las precipitaciones ocurren principalmente como nieves. En particular, no llueve casi nunca en la Cordillera de la III Región. Durante las campañas de terreno, se muestreó 9 nieves, 2 frescas, aprovechando las nevadas, y 7 antiguas, depositadas varias semanas o meses antes. Ubicaciones y análisis están presentados en la tabla 6. La composición química de las precipitaciones (lluvias o nieves) depende de varios factores (hay una buena discusión en Carroll, 1962):

- sales llevadas por los vientos en las áreas de formación y de desplazamiento de las nubes. Por ejemplo, las lluvias de verano sobre el Atiplano boliviano y la alta Cordillera chilena ("invierno" boliviano) tienen una composición sulfatada cálcica que refleja la composición de las aguas de la cuenca amazónica.

- sales eólicas de las zonas mismas donde caen las precipitaciones (sales recicladas). Las primeras precipitaciones limpian la atmósfera de gran parte del polvo en suspensión y por tanto están más cargadas en sales que las precipitaciones ulteriores del mismo evento pluvial.

- en caso de nevada, la capa de nieve se carga en sales eólicas durante varias semanas o meses mientras se derrite. Las aguas derretidas se infiltran y aportan una cierta cantidad de sales en las napas subterráneas.

Tenemos muy pocas muestras de nieve para poder emprender un estudio detallado de estos mecanismos. Sin embargo, se puede hacer algunas observaciones en cuanto a la importancia de los aportes en sales llevadas por las capas de nieve hacia las napas subterráneas. En la figura 27 se presenta las concentraciones de los principales componentes en las aguas de nieve y en los aportes. Se observa que las concentraciones de Na, K, Ca, Mg, Cl, SO₄ e I en aguas de nieve son muy inferiores a las concentraciones en los aportes. Las cantidades de los principales componentes aportados por las nieves son despreciables en relación a aquellas originadas por la alteración de rocas y la disolución de antiguas evaporitas. Sin embargo, hay dos notorias excepciones: el arsénico y el nitrato. La concentración de estos dos componentes en aguas de nieve es del mismo orden que en los aportes diluidos no afectados por la redisolución de antiguas evaporitas. Las concentraciones porcentuales de As y NO₃ (As/Salinidad y NO₃/Salinidad) son netamente más elevadas en las capas de nieve que en las aguas de aporte. El origen eólico de estos componentes en las nieves es obvio. Puesto que las concentraciones en las nieves y en los aportes son similares, es muy probable que el arsénico y el nitrato en las napas subterráneas de la Cordillera tengan, en gran parte, el mismo origen eólico. Eso no impide un aporte adicional por alteración de rocas, en particular para el arsénico, pero este proceso no es predominante.

Tabla 6 : ANALISIS DE NIEVES

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
NEV-1	11/05/95	11 ^H 15	493825	6990125	4150	Nieve antigua (MAR)
NEV-2	11/05/95	15 ^H 30	507586	7005287	4350	Nieve antigua (MAR)
NEV-3	12/05/95	16 ^H 00	476178	6966986	4150	Nieve antigua (FRA)
NEV-4	14/05/95	14 ^H 00	491600	6941620	4550	Nieve antigua (FRA)
NEV-5	19/05/95	11 ^H 20	498407	6991877	4050	Nieve fresca (MAR)
NEV-6	09/11/95	13 ^H 00	477827	7042325	4550	Nieve antigua (PED-MAR)
NEV-7	29/08/96	12 ^H 00	513133	7759909	3790	Nieve fresca (HCO)
NEV-8	08/09/96	13 ^H 40	527891	7768666	4200	Nieve antigua, 10 días (HCO)
NEV-9	09/12/96	15 ^H 05	548125	7046550	4720	Nieve antigua (WHE)

NUMERO	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG	STD
NEV-1	4,36	-0,043	0,53	0,0040	0,0011	2,69	0,99	nd	0,06	0,030	0,37	0,11	nd	0,33	0,083	5,5
NEV-2	4,53	-0,040	0,75	0,0071	0,0019	3,26	nd	nd	0,10	0,013	0,62	0,051	nd	0,33	0,024	5,2
NEV-3	4,01	-0,083	0,64	0,0106	0,0011	4,51	0,56	nd	0,09	0,016	0,32	0,070	nd	0,29	0,073	6,6
NEV-4	4,81	-0,013	1,0	0,0078	0,0011	13,2	0,87	nd	1,4	0,034	1,1	0,28	0,002	3,8	0,97	23
NEV-5	5,53	0,003	0,89	0,0063	0,0011	0,480	0,25	nd	0,03	0,001	0,53	0,13	nd	0,35	0,039	3,1
NEV-6	5,37	0,003	0,11	0,0016	0,0006	0,288	nd	nd	0,10	0,068	0,25	0,020	nd	0,015	0,004	1,0
NEV-7	4,46	-0,033	0,25	na	0,0020	1,82	0,87	nd	nd	0,0019	0,16	0,12	nd	0,26	0,061	3,5
NEV-8	5,02	0,006	0,11	0,0029	0,0011	0,480	0,12	nd	nd	0,0003	0,16	0,16	nd	0,18	0,029	1,6
NEV-9	5,00	0,010	0,18	0,0018	0,0008	0,384	0,06	nd	nd	0,0017	0,28	0,039	nd	0,20	0,017	1,8

ALC = alcalinidad en meq/l. STD = sales totales disueltas en mg/l (calculado).
 Otros componentes en mg/l. nd = no detectado.

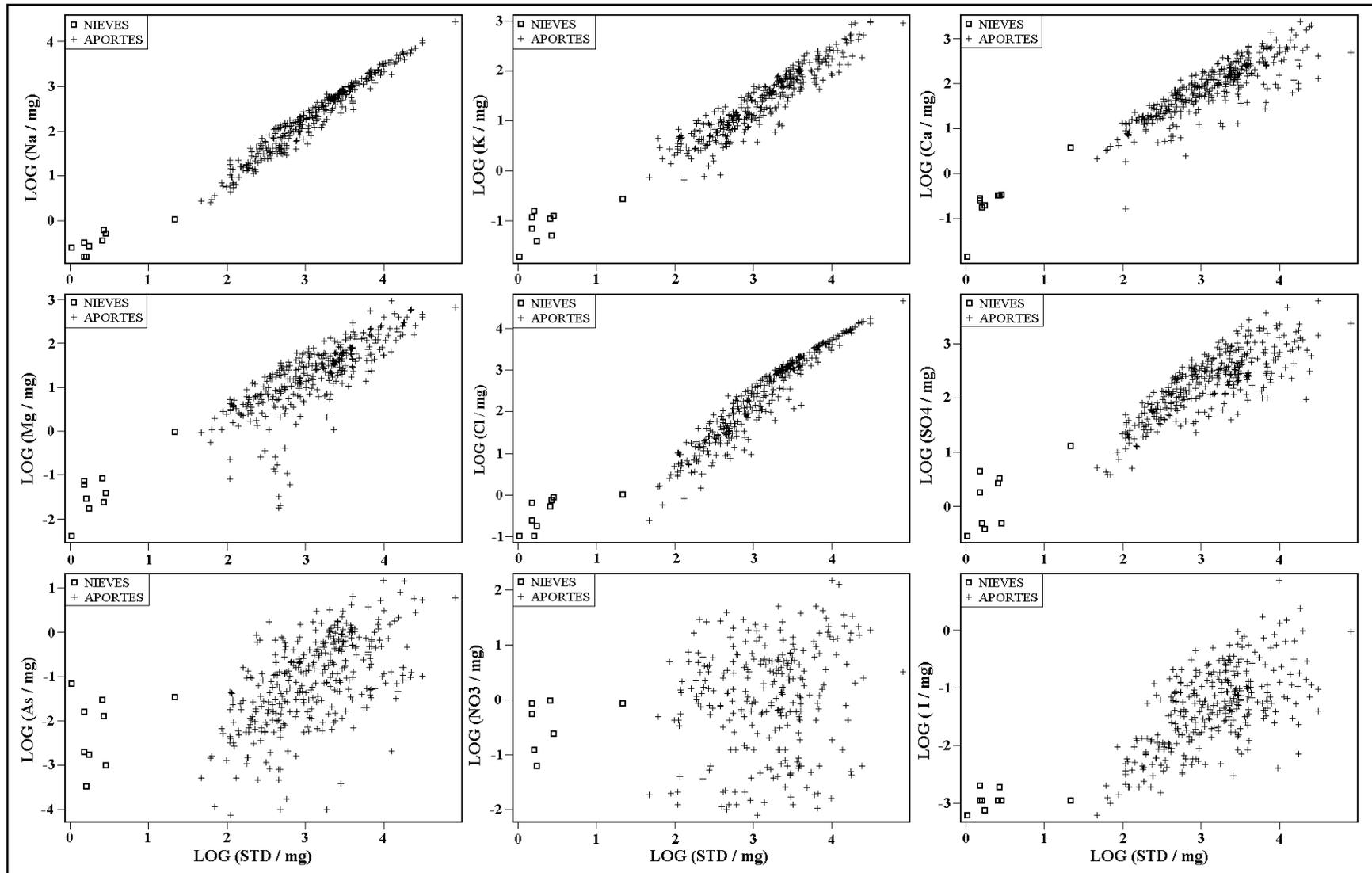


Fig.27 : Comparacion de la composicion quimica de las aguas de nieve con las aguas de aporte de los salares chilenos

XI. EVOLUCION DE AGUAS EN CUENCAS CERRADAS DEL NORTE DE CHILE

1. Efecto de la precipitación de la calcita

Vamos a aplicar el metodo simple basado sobre la alcalinidad que se ha presentado anteriormente. La figura 28 presenta la relación entre alcalinidad y calcio para todas las aguas de aporte y de lagunas de los salares chilenos.

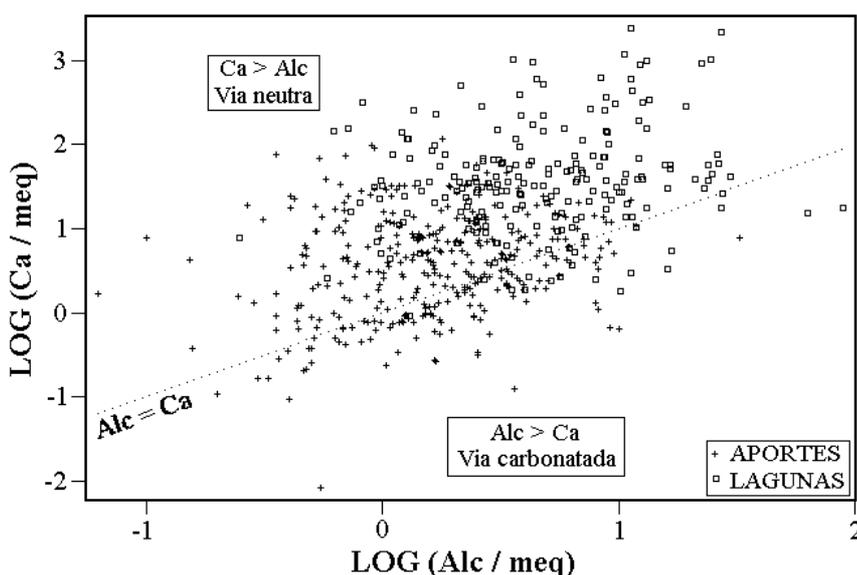


Fig.28 : Relacion entre alcalinidad y Ca en aguas de aporte de todos los salares estudiados

Cuando se evaporan, las aguas de aporte precipitan primero la calcita. Las que empiezan por la vía carbonatada tienen su punto representativo por debajo de la recta $\text{Alc} = \text{Ca}$ (en miliequivalentes). Son 117 aguas. Más del doble (242) empiezan por la vía neutra.

2. Efecto de la precipitación de sales de magnesio

La influencia de la precipitación de sales de magnesio sobre la evolución de aguas que se evaporan puede observarse en un diagrama Alc versus $\text{Ca} + \text{Mg}$ (Fig. 29). Las aguas cuyos puntos se encuentran por debajo de la recta $\text{Alc} = \text{Ca} + \text{Mg}$ siguen la vía evolutiva carbonatada hasta llegar a soluciones de carbonato de sodio. De las 117 que empezaron por esta vía, quedan solamente 53 que deben teóricamente llegar a salmueras alcalinas. Las 64 otras cambian su evolución de la vía carbonatada a la vía sulfata directa (8) o alcalina (56) por efecto de la precipitación de silicatos y carbonatos de magnesio.

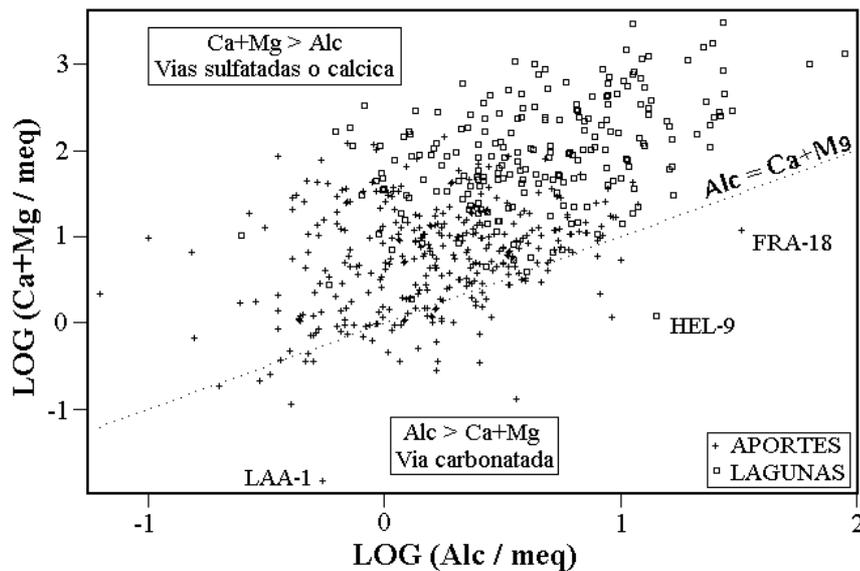


Fig.29 : Relacion entre alcalinidad y Ca+Mg en aguas de aporte de todos los salares estudiados

Salvo una, todas las lagunas pertenecen a las vías sulfatadas, cálcica o ácida. La única en todo el norte de Chile que posee una solución carbonatada es una pequeña poza en la cuenca de laguna Helada (HEL-9), pero no laguna Helada misma que contiene una salmuera sulfatada Na / Cl-SO₄. La solución carbonatada de la pequeña poza tiene una salinidad de solamente 2,9 g/l. El agua más salada que pertenece a la vía carbonatada es una vertiente termal de 9,7 g/l de salinidad en la cuenca de la laguna del Negro Francisco (FRA-18). Esta agua ha probablemente redissuelto carbonatos de sodio de un antiguo salar carbonatado recubierto por formaciones volcánicas. Habrían existido lagunas o salares carbonatados en este sector de los Andes Centrales. Hay que recalcar que nunca se ha detectado tal indicio en las numerosas cuencas evaporíticas bolivianas. Por otra parte, el agua diluida que presenta la tendencia evolutiva carbonatada más pronunciada es una napa en la cuenca del río Lauca (LAA-1). Sus concentraciones en bicarbonato y sodio representan respectivamente 62 % de la suma de los aniones y 90 % de la suma de los cationes (en meq/l).

3. Efecto de la precipitación del yeso

Ya sea siguiendo la vía neutra durante la precipitación de la calcita o por cambio de evolución durante la precipitación de sales de magnesio, 298 aguas de aporte llegan a la saturación en yeso (CaSO₄·2H₂O), lo que determina dos vías evolutivas: una sulfatada y la otra cálcica. Esta dicotomía está representada en la figura 30.

Se observa la T inclinada cuya barra transversal corresponde a la saturación en yeso. Hemos representado cada agua de acuerdo a su vía evolutiva teórica. Varias aguas diluidas de vías sulfatadas se encuentran por encima de la recta equimolar Ca = SO₄. Tienen más calcio que sulfato. Pero la precipitación de la calcita, al consumir calcio, revierte la desigualdad: la concentración en calcio se vuelve inferior a la del sulfato y la solución sigue la vía sulfatada. Finalmente, 232 aguas de aporte siguen una vía sulfatada y 67 siguen la vía cálcica.

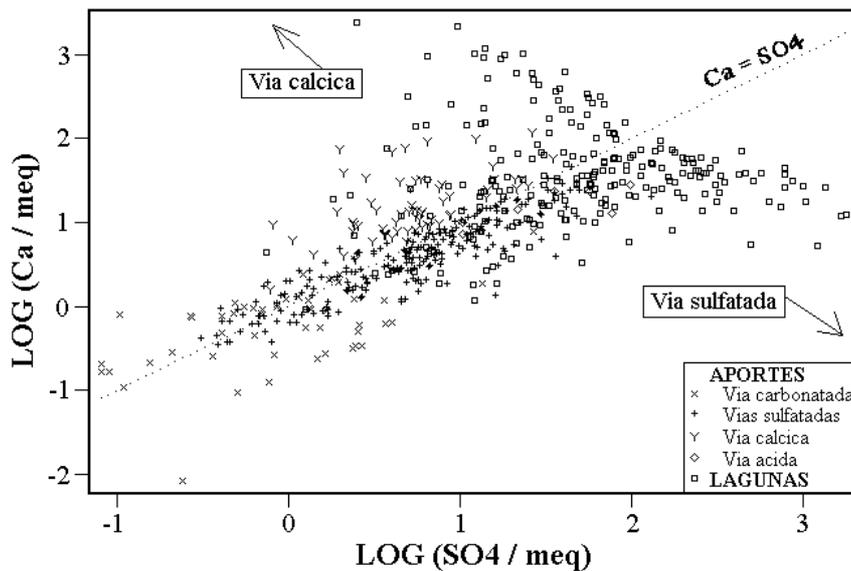


Fig.30 : Relacion entre Ca y SO₄ en aguas de aporte de todos los salares estudiados

4. Repartición de las aguas de aportes en las distintas vías evolutivas

La figura 31 muestra la repartición de las aguas de aportes en las distintas vías evolutivas y el número de lagunas de cada uno de los mega-grupos químicos: carbonatado, sulfatado, cálcico y ácido. El total de lagunas es superior al número de cuencas. Se debe a que 8 cuencas contienen lagunas de dos tipos químicos distintos. Aparece una anomalía mayor: hay 53 aguas de aporte que siguen teóricamente la vía carbonatada, pero solamente una lagunita es carbonatada. La casi total ausencia de lagunas carbonatadas en esta zona de los Andes chilenos se debe a dos factores:

- las aguas de aporte que siguen la vía carbonatada se encuentran diseminadas en varias cuencas donde se mezclan con aguas de otras vías evolutivas. No existe ninguna cuenca donde todas las aguas de aporte pertenezcan a la vía carbonatada. Al contrario, existen cuencas con fuerte predominio de aportes sulfatados o cálcicos.

- la depositación de azufre eólico sobre las formaciones superficiales de las cuencas de drenaje ha sido puesto en evidencia en el vecino Altiplano boliviano (Risacher y Fritz, 1991). Al disolverse en las las aguas de aporte carbonatadas, el azufre produce ácido sulfúrico que neutraliza parte del carbonato. Es muy probable que el mismo mecanismo afecte también las aguas de aporte chilenas.

La casi totalidad de las soluciones salinas de las lagunas y salares chilenos pertenecen a los dos mega-grupos sulfatado y cálcico. Es la principal característica geoquímica de los salares chilenos. Hay 39 lagunas o salares sulfatados, 19 cálcicos y 2 ácidos (Gorbea e Ignorado). El fuerte predominio de salares y lagunas sulfatadas se debe obviamente a la abundancia del azufre en los volcanes de la Cordillera de los Andes. La mayor parte de los salares cálcicos se encuentran también en un ambiente volcánico y la composición de sus aguas de aporte no tiene relación con la litología superficial de las cuencas de drenaje. Proviene de la disolución de salmueras residuales cálcicas de antiguos salares recubiertos por formaciones volcánicas.

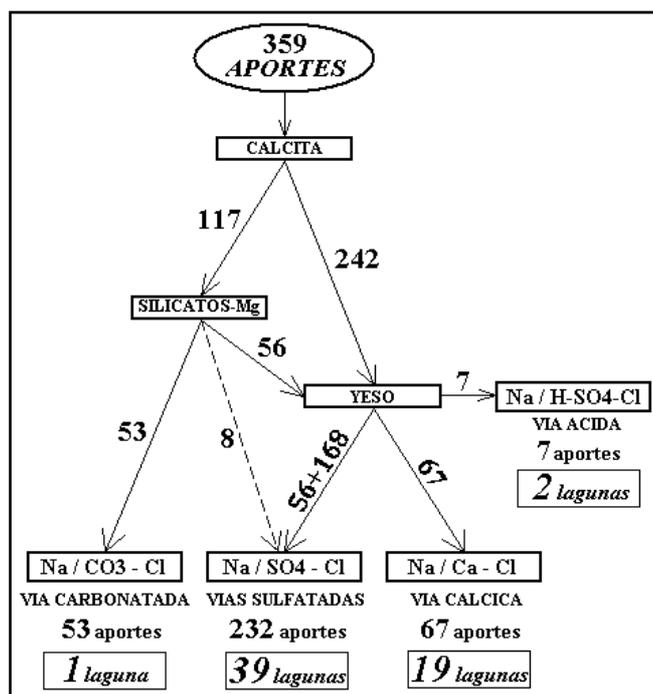


Fig.31 : Recuento de las vías evolutivas y de las composiciones de las lagunas

Todo ocurre como si estos antiguos salares se traspasaran a las cuencas actuales. Siendo de tipo cálcico, sus cuencas de drenaje deberían de ser mayormente sedimentarias. La distribución de los actuales salares cálcicos podría reflejar de alguna manera la litología de las formaciones que existían en estos sectores de los Andes antes de las últimas fases volcánicas.

5. Repartición geográfica de las aguas de aporte según sus vías evolutivas

Se puede hacer algunas observaciones sobre la localización de los salares cálcicos en los Andes chilenos. Las figuras 32 y 33 presentan respectivamente la distribución geográfica de los aportes y de los salares o lagunas con su tipo químico: sulfatado, cálcico, o mixto (lagunas de dos tipos en una cuenca)

En la Primera Región no existe ningún salar cálcico. Todos son sulfatados. El agua de aporte de vía evolutiva cálcica ubicada más al norte fue encontrada en la cuenca del salar sulfatado de Coposa. Bajando desde el norte, los salares de Carcote y Ascotán, en la Segunda Región, son los primeros en presentar lagunas cálcicas, además de lagunas sulfatadas. La Segunda Región es la que posee más lagunas y salares mixtos (4) y cálcicos (7). La Tercera Región posee 12 salares sulfatados (incluyendo los dos ácidos, que contienen mucho más sulfato que calcio), 3 salares mixtos y 5 cálcicos.

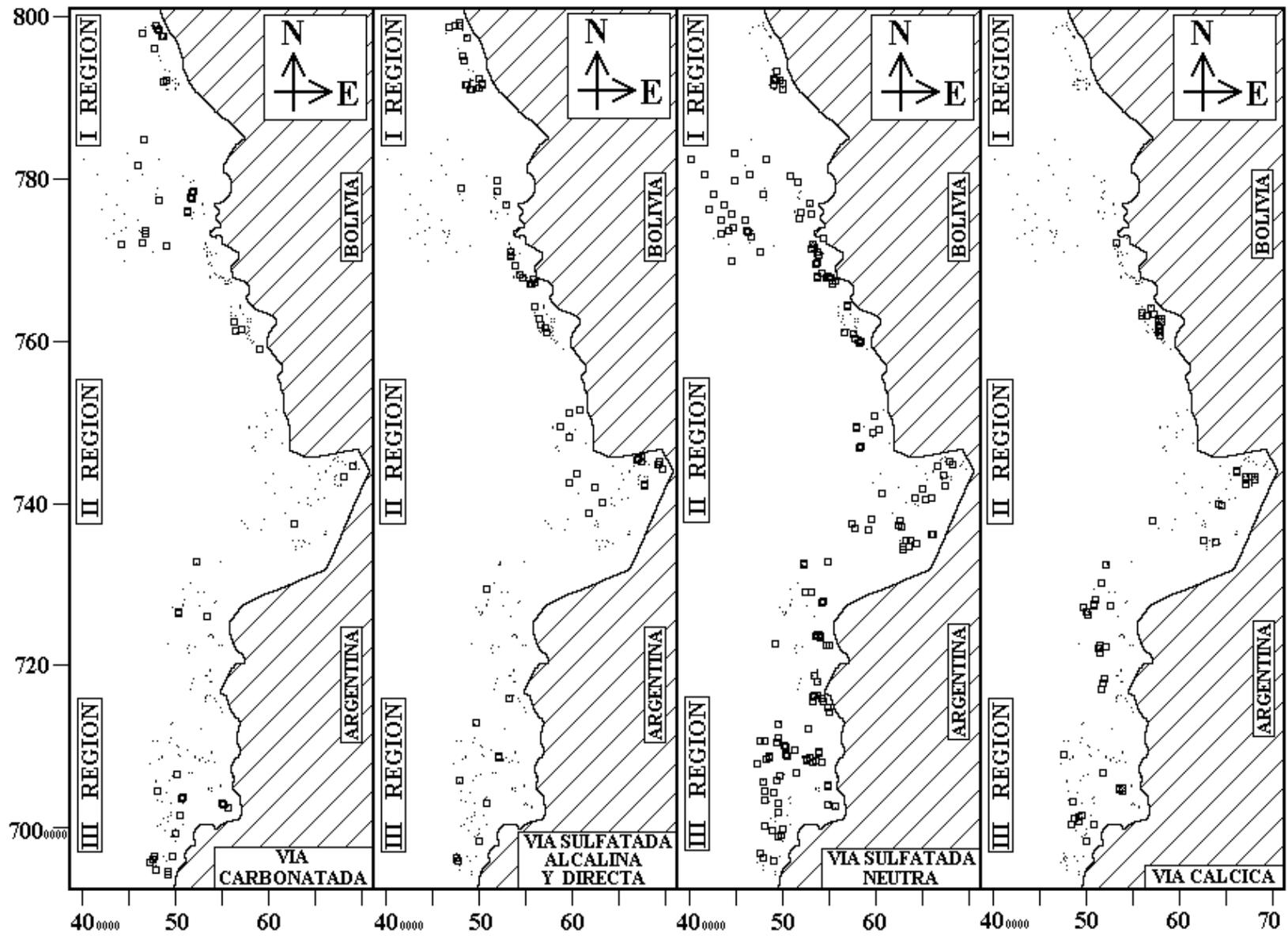


Fig.32 : Distribución de las aguas de aporte de acuerdo a sus vías evolutivas

- 1 Lagunas Cotacotani
- 2 Lago Ghungará
- 3 Río Lauca
- 4 Salar de Surire
- 5 Salar de Pintados
- 6 Laguna Lagunilla
- 7 Salar del Huasco
- 8 Salar de Coposa
- 9 Salar de Michincha
- 10 Salar de Alconcha
- 11 Salar de Carcote
- 12 Salar de Ascotan
- 13 Salar de Atacama
- 14 Salar de Tara
- 15 Laguna Helada
- 16 Salar de Aguas Calientes 1
- 17 Salar de Pujsa
- 18 Salar de Loyoques
- 19 Lag. Trinchera / Chivato Muerto
- 20 Salar de Aguas Calientes 2
- 21 Laguna Lejia
- 22 Laguna Miscanti
- 23 Laguna Miñiques
- 24 Salar del Laco
- 25 Laguna Tuyajto
- 26 Salar de Aguas Calientes 3
- 27 Salar de Capur
- 28 Salar de Imilac
- 29 Salar de Punta Negra
- 30 Salar de Aguas Calientes 4
- 31 Laguna de la Azufrera
- 32 Salar de Pajonales
- 33 Salar de Gorbea
- 34 Salar Ignorado
- 35 Salar de la Azufrera
- 36 Salar de Agua Amarga
- 37 Salar de Aguilar
- 38 Salar de La Isla
- 39 Salar de las Parinas
- 40 Salar Grande
- 41 Salar de los Infieles
- 42 Salar de Pedernales
- 43 Salar de la Laguna
- 44 Salar de Piedra Parada
- 45 Lagunas Bravas
- 46 Lagunas del Jilguero
- 47 Laguna del Bayo
- 48 Salar de Wheelwright
- 49 Laguna Escondida
- 50 Laguna Verde
- 51 Salar de Maricunga
- 52 Laguna del Negro Francisco

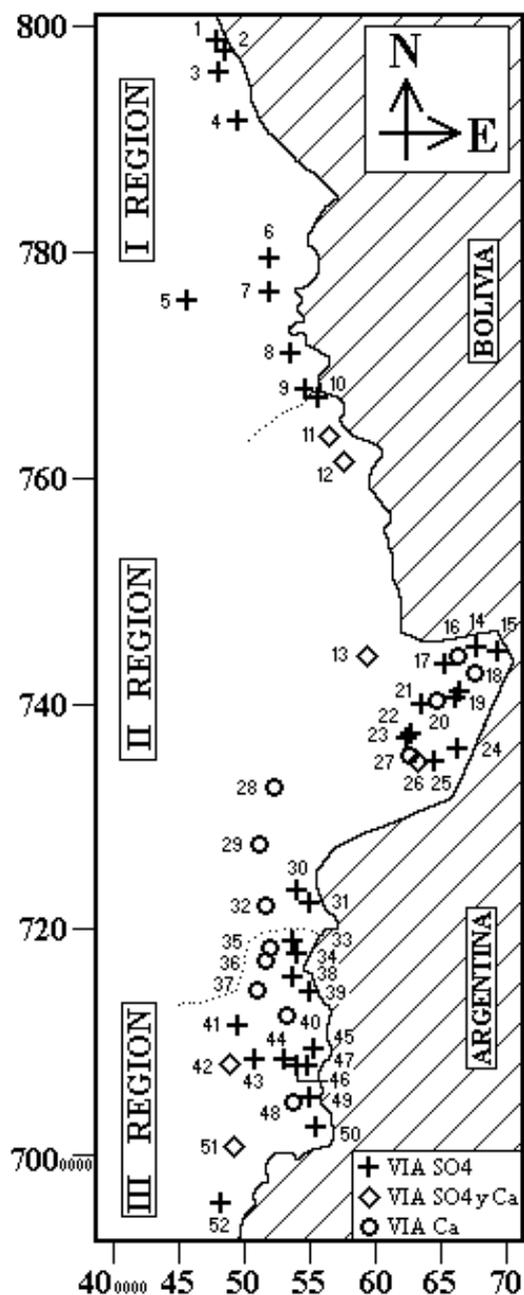


Fig.33 : Distribución de las salmueras de los salares de acuerdo a sus vías evolutivas

Se observa la tendencia de los salares cálcicos y mixtos a ubicarse más al oeste, especialmente en el sur de la Segunda Región y en la Tercera Región. Sin embargo, el salar de Pintados, que es el más occidental, es sulfatado, pero su alimentación proviene de una amplia cuenca de drenaje que se extiende mucho más al este.

Por otra parte, las aguas de aporte de vía carbonatada son abundantes en la I Región y en el sur de la III Región (Fig. 32). Son escasas en la II Región y totalmente ausente en el norte de la III Región. Estas aguas siendo generalmente las más diluidas, su distribución indica los sectores potencialmente más aprovechable para recursos de agua.

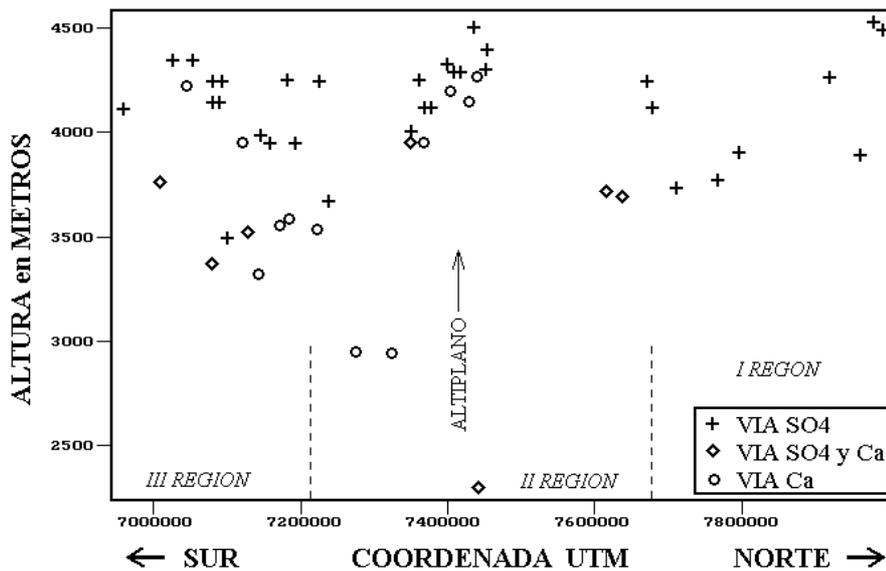


Fig.34 : Distribución de las salmueras de los salares y lagunas en función de sus vías evolutivas y de la altura.

La figura 34 muestra la altura de cada laguna o salar en un perfil topográfico cuya escala vertical ha sido exagerada 340 veces en relación a la escala horizontal. A una misma latitud, los salares cálcicos y mixtos tienden a estar a una altura más baja que los sulfatados. Es normal porque muchos salares cálcicos y mixtos se encuentran ubicados más al oeste, es decir a una altura más baja. Sin embargo, los salares cálcicos del Altiplano de la Segunda Región, que están mezclados con los sulfatados, presentan también esta tendencia muy al este: a una misma latitud, se encuentran en las depresiones más bajas del Altiplano.

Hemos visto que las lagunas y salares cálcicos están relacionados con terrenos sedimentarios. La relación puede ser directa cuando la cuenca de drenaje está mayormente constituida de formaciones sedimentarias (por ejemplo el salar de Imilac) o indirecta cuando la cuenca es volcánica pero que los aportes redisuelven salmueras de un antiguo salar cálcico recubierto por formaciones volcánicas (ejemplos: Aguas Calientes 1 y 2). De manera muy simplificada, la Alta Cordillera es volcánica mientras que la Precordillera (cordones occidentales) es sedimentaria o volcano-sedimentaria. Por ejemplo, la Cordillera de Domeyko, al oeste del salar de Atacama es en gran parte sedimentaria mientras que la Alta Cordillera y el Altiplano al este del salar son volcánicos. Las formaciones sedimentarias se prolongan hacia el este por debajo de los volcanes e ignimbritas de la Alta Cordillera donde afloran a veces como cerros islas. La presencia de salares cálcicos en ambientes volcánicos refleja la proximidad de formaciones sedimentarias por debajo de las estructuras volcánicas. Recordemos que los salares cálcicos tienden a ubicarse en las depresiones más bajas. En cuanto a la mayor proporción de salares cálcicos en la Precordillera, está se debe obviamente a la predominancia de terrenos sedimentarios directamente aflorantes o recubiertos por formaciones volcánicas poco espesas.

XII. CALIDAD DE AGUAS

1. Calidad de potabilidad

La calidad de cada agua de aporte en función de las normas de potabilidad y de riego, está presentada en los estudios individuales de cada cuenca. Los componentes considerados son: HCO_3 (o alcalinidad), Cl, SO_4 , NO_3 , B, As, Na, Li, Ca, Mg, y STD (salinidad total). Sin embargo, hay solamente unos pocos componentes que determinan efectivamente la calidad de aguas de la Cordillera Andina del norte chileno. La salinidad y el arsénico son los dos componentes que casi siempre limitan la potabilidad de las aguas. Si están dentro de la norma, los demás componentes también lo están, o si no, el exceso es siempre muy limitado. Hay algunas excepciones, por ejemplo el río Toconce tiene poca salinidad pero 10 veces el arsénico de la norma. La norma de potabilidad es de 500 mg/l para la salinidad total y de 0,050 mg/l para el arsénico. De manera sorprendente, el nitrato, que constituye en el Valle Central los yacimientos de NaNO_3 más importantes del mundo, no es un componente importante de las aguas de aporte. La figura 35 y la tabla 7 muestran la distribución de las aguas de aporte en función del límite de potabilidad de estos dos componentes. A título meramente comparativo, hemos fijado un segundo límite al doble de la norma de potabilidad (1000 mg/l STD y 0,100mg/l As). La escasez de agua en el norte chileno permite por un breve tiempo, una cierta tolerancia en la aplicación de las normas en caso de alguna emergencia.

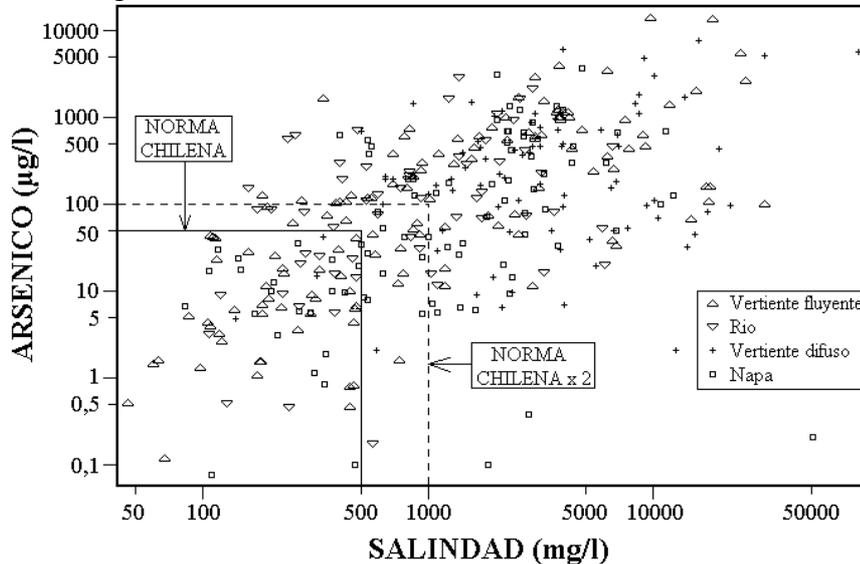


Fig.35 : Distribución de las aguas de aporte en función de la salinidad, del arsénico y de la norma de potabilidad.

El 32 % de las aguas de vertientes fluyentes está a dentro de la norma chilena de potabilidad. Los ríos y napas lo están en una menor proporción: 20 a 25%, y casi no hay vertiente difusa cuya agua sea potable. Las vertientes fluyentes potables, que son las más diluidas, están alimentadas en gran

parte por las precipitaciones que se infiltran cuenca arriba; las aguas siguen un trayecto corto en rocas volcánicas.

Las vertientes del lago Chungará son un buen ejemplo de este tipo de aportes. Los ríos provienen de la reunión de aguas de varias partes y de varias composiciones; en su recorrido pueden concentrarse por evaporación y por lixiviación de los terrenos que drenan. Las aguas de napa en cambio, están en contacto con las formaciones geológicas durante mucho tiempo. La evaporación y la mezcla con cuñas salinas salinizan las vertientes difusas.

POTABILIDAD	TOTAL	NORMA	%	2xNORMA	%
Vertientes fluyentes	131	42	32,1	55	42,0
Vertientes difusas	82	3	3,7	4	4,9
Ríos y riachuelos	59	13	22,0	21	35,6
Napas	87	22	25,3	32	36,8
Vía carbonatada	53	26	49,1	33	62,3
Vía sulfatada directa	8	3	37,5	3	37,5
Vía sulfatada alcalina	56	22	39,3	29	51,8
Vía sulfatada neutra	168	28	16,7	43	25,6
Vía cálcica	67	1	1,5	3	4,5
Vía ácida	7	0	0	0	0
TOTAL APORTES	359	80	22,2	114	31,2

Tabla 7 : Distribución de las aguas potables en función de los tipos de aporte y de sus vías volutivas.

La calidad de aguas está nitidamente relacionada con sus vías evolutivas (Tabla 7). Casi la mitad de las aguas de vía carbonatada es potable. La proporción baja a 39% para las aguas de vía sulfatada directa y alcalina y a 17% para las de vía sulfatada neutra. En cuanto a las aguas de vía cálcica, solamente una sobre 67 (o sea 1,5%) es potable; es el agua de un pozo en la cuenca del salar de Punta Negra. La vía carbonatada refleja aguas que drenan rocas volcánicas sin azufre ni mineralizaciones; no se salinizan mucho. Al contrario la aguas de vía cálcica drenan terrenos sedimentarios o han redissuelto salmueras cálcicas residuales; tienen una salinidad elevada. Entre los extremos, las aguas de vía sulfatada alcalina tienden a ser de mejor calidad que las que siguen la vía sulfatada neutra. Mientras más azufre en la cuenca, de menor calidad las aguas de aporte.

2. Calidad de riego

Los componentes que intervienen mayormente en la limitación de calidad de aguas para riego son la salinidad (1000 mg/l), el boro (0,75 mg/l) y el arsénico (0,100 mg/l). Cabe recalcar que el boro no es un contaminante común para aguas potables (límite de 5 mg/l), pero es el principal limitante para aguas de riego en el norte chileno. La tabla 8 presenta la cantidad de aguas de cada tipo dentro de la norma y al doble de ella.

A pesar de ser más tolerante la norma de riego que la norma de potabilidad para STD y As, hay menos aguas aptas para el riego que para el consumo humano. Esto se debe a la muy baja concentración límite del boro en la norma de riego. Pero, análisis de agua usada en riego en los ríos Lluta, I Región y Loa, II Región muestran que altos contenidos de boro de hasta cinco veces el límite máximo de la norma permite usar esa agua en cultivos (Alonso, 1979 ; Zumaeta, 1981). Las rocas volcánicas de los Andes Centrales contienen boro fácilmente lixiviable; puede haber concentraciones apreciables en aguas muy diluidas, por ejemplo en aguas de vía carbonatada.

<u>RIEGO</u>	<u>TOTAL</u>	<u>NORMA</u>	<u>%</u>	<u>2xNORMA</u>	<u>%</u>
Vertientes fluyentes	131	36	27,5	55	42,0
Vertientes difusas	82	3	3,7	4	4,9
Ríos y riachuelos	59	12	20,3	23	39,0
Napas	87	23	25,8	27	30,3
Vía carbonatada	53	22	41,5	29	54,7
Vía sulfatada directa	8	1	12,5	4	50,0
Vía sulfatada alcalina	56	24	42,9	29	51,8
Vía sulfatada neutra	168	24	14,3	42	25,0
Vía cálcica	67	2	3,0	4	6,0
Vía acida	7	0	0	0	0
TOTAL APORTES	359	75	20,9	111	30,9

Tabla 8 : Distribución de las aguas aptas para riego en función de los tipos de aporte y de sus vías evolutivas

En resumidas cuentas, las aguas de mejor calidad son las que siguen las vías carbonatada y sulfatada directa o alcalina. Hemos visto que son aguas que drenan formaciones volcánicas con muy poco azufre o mineralizaciones sulfuradas. Además, es preferible que no haya terrenos sedimentarios en las cercanías ni a baja profundidad.

XIII. COMPOSICION ISOTOPICA DE LOS APORTES

Disponemos solamente de análisis isotópicos de ^{18}O y ^2H en aguas de aporte de las I y III Regiones (ver los estudios individuales). La mayor parte de la II Región fue estudiada antes de empezar el convenio tripartito entre la Dirección General de Aguas, la Universidad Católica del Norte y Orstom. No estaban programadas entonces análisis isotópicos. Se puso particular énfasis sobre el estudio isotópico de dos cuencas: Surire en la I Región y Pedernales en la III Región.

La figura 36 presenta la composición isotópica de 82 aguas de aporte. Hemos agregado datos de nieves del volcán Parinacota en la I Región (Peña, 1989) y de lluvias y nieves del sector de Ascotán (Mardones, 1997). No se ha encontrado datos de precipitaciones de la III Región. La recta meteórica local es la de Fritz et al., (1979). Es casi la misma recta que la establecida por Aravena et al., (1989) en la cordillera de la I Región.

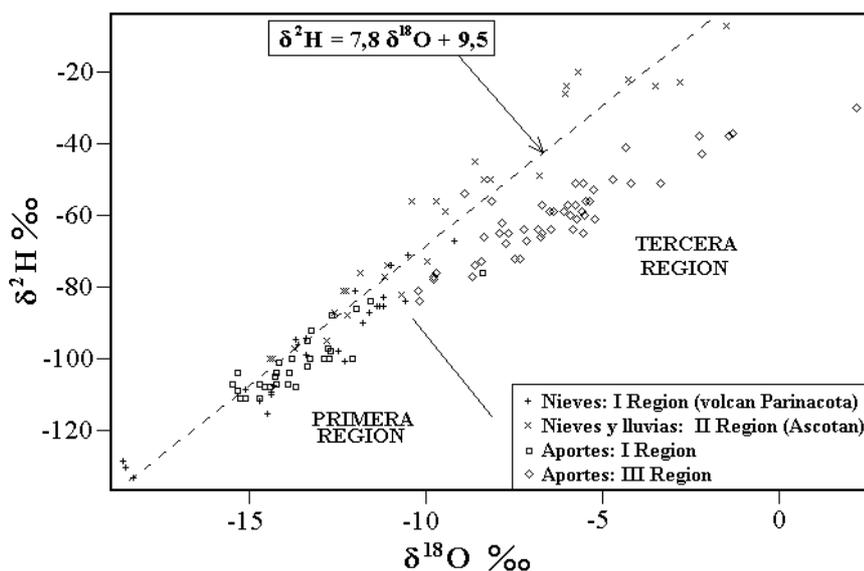


Fig. 36 : Composición isotópica de las aguas de aporte de las I y III Regiones y de nieves y lluvias de las I y II Regiones.

Se observa una notable diferencia entre la composición isotópica de las aguas de aporte de la I y de la III Región (con una sola excepción: la vertiente ácida COP-2). Los aportes de la I Región tienen sus puntos cerca de la recta meteórica, levemente desplazados hacia la derecha, lo que indicaría alguna evaporación. Sin embargo, notamos que las nieves de la I Región tienen la misma composición reflejando procesos de fusión y sublimación de la nieve (Peña, 1989). La composición isotópica de las aguas de aporte de la I Región podría reflejar la composición de las aguas de nieves que se infiltran y alimentan las napas.

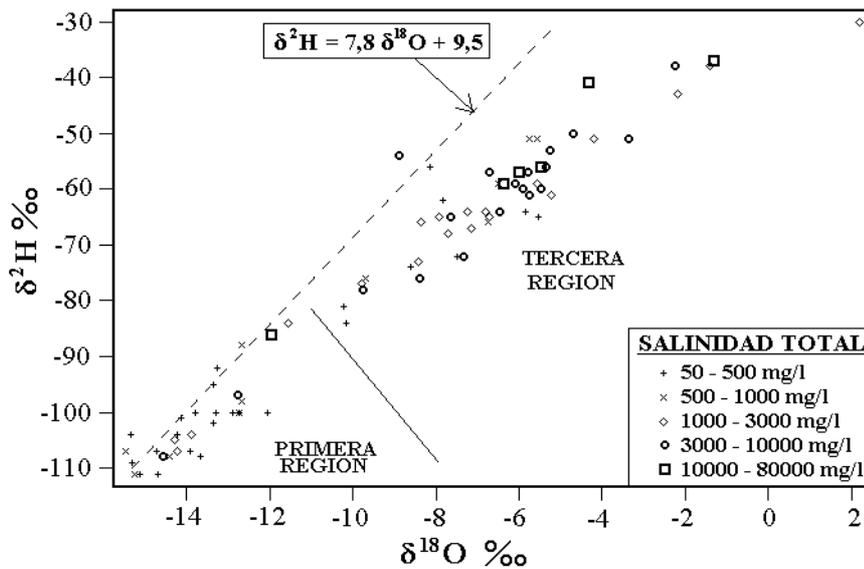


Fig.37 : Composición isotópica de las aguas de aporte según sus salinidades

Los aportes de la III Región están notoriamente más enriquecidos en isótopos pesados. Los puntos están netamente más alejados de la recta meteórica, lo que sugiere una marcada evaporación de las aguas de aporte. La figura 37 muestra la composición isotópica de los aportes diferenciados por su salinidad. Se observa efectivamente alguna tendencia a un aumento de salinidad de las aguas de aporte de la III Región. Pero hay notables excepciones: una de las vertientes más concentrada de la I Región (17,7 g/l en Surire) se encuentra casi encima de la recta meteórica; otras dos aguas salobres, también de Surire, se encuentran cerca de la recta. Por otra parte, seis aguas diluidas (menos de 500 mg/l) de la III Región se encuentran alejadas de la recta meteórica, junto con las aguas más concentradas. El agua más enriquecida en isótopos pesados es apenas salobre (1440 mg/l).

La figura 38 muestra la composición isotópica de los aportes diferenciados por sus vías evolutivas. Aquí tampoco aparece una distribución muy clara; se observa una mezcla de las distintas vías, con excepción de la vía cálcica cuyas aguas se encuentran todas alejadas de la recta meteórica y alineadas cerca de una recta de pendiente 5,5.

La figura 39 muestra la composición de las aguas de aporte diferenciadas por su tipo hidrológico: vertientes fluyentes, difusas, ríos y napas. Las aguas más concentradas en isótopos pesados provienen todas de vertientes difusas de la III Región. Recordamos que dos procesos pueden actuar en este tipo de vertiente: salinización por la cuña salina del salar y pre-evaporación del agua a través de los sedimentos al borde del salar. Los dos procesos conducen obviamente a un enriquecimiento en isótopos pesados. Lo extraño es que no se observa tal proceso en las vertientes difusas de la I Región.

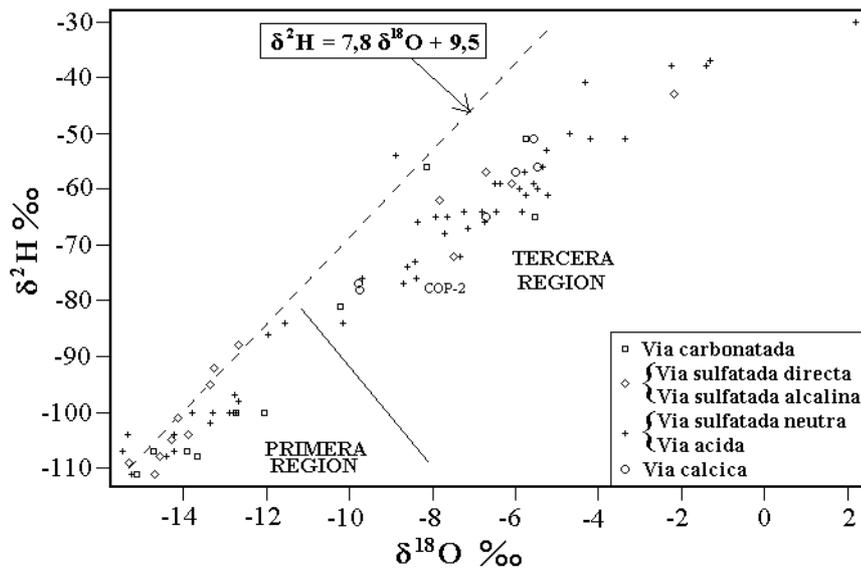


Fig.38 : Composición isotópica de las aguas de aporte según sus vías evolutivas

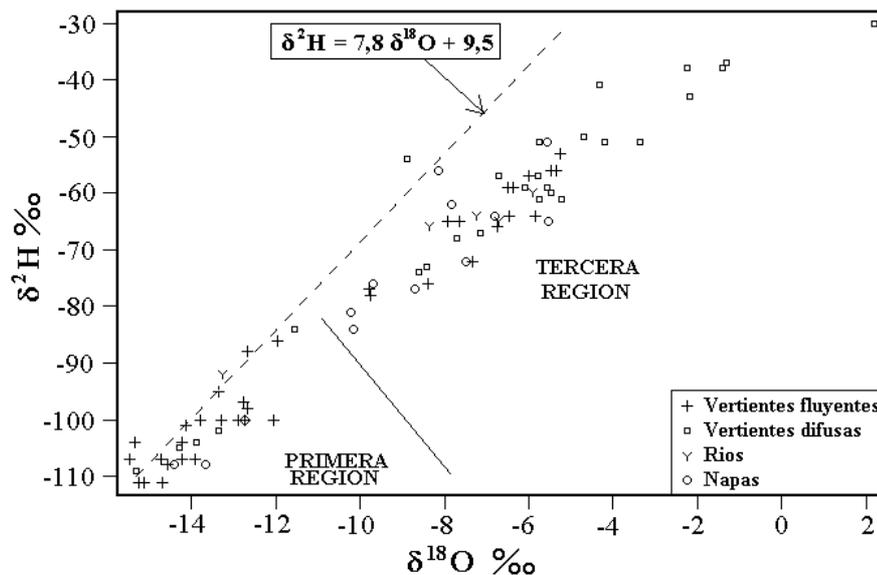


Fig.39: Composición isotópica de las aguas de aporte según sus tipos hidrologicos

No parece haber una interpretación simple y única de la composición isotópica de los aportes analizados. Uno de los puntos importantes es la gran diferencia entre los aportes de la I y de la III Región. Fijémonos en las aguas de aporte de vía evolutiva cálcica. El estudio hidroquímico sugiere que tales aguas deben su composición química a la mezcla con antiguas salmueras residuales de tipo Na-Ca / Cl. No se puede tratar de sales cálcicas cristalizadas, puesto que son demasiado solubles. El enriquecimiento en isótopos pesados podría provenir de las salmueras residuales muy evaporadas. Lo mismo debe ocurrir con aguas de aporte salinizadas por salmueras residuales de tipo Na-Mg / Cl. Por otra parte, en la I Región, y particularmente en el salar de Surire, se ha detectado la presencia de cloruro de sodio en los aportes salados. El hecho de que la

composición isotópica de tales aportes es casi idéntica a la composición de aguas de fusión de nieves del mismo sector sugiere que el cloruro de sodio en exceso proviene de la disolución de halita y no de salmueras de cloruro de sodio. La disolución de cloruro de sodio cristalizado no cambia la composición isotópica del agua. También se ha detectado la redisolución de cloruro de sodio en aportes de la III Región, pero parece más probable, en vista de la composición isotópica de estos aportes, que se encuentra en salmueras residuales de tipo Na / Cl. Esta interpretación no explica porque las aguas de aporte *diluidas* de la III Región también se encuentran enriquecidas en isótopos pesados. Tres de estas aguas diluidas y enriquecidas (PED-3, 9 y 21) pertenecen a la vía evolutiva carbonatada; son aguas de alteración de rocas volcánicas sin azufre y sin mezcla con salmueras residuales. Es difícil asignar un origen no directamente meteórico a tales aguas. Parece como si las aguas de nieve estuvieran ya muy concentradas en isótopos pesados, mucho más de lo que ocurre en la I Región. Para esclarecer este punto es preciso analizar nieves de la III Región.

XIV. BALANCE HIDRICO DE LAS LAGUNAS

El balance hídrico de cada laguna se encuentra en su estudio individual. El coeficiente de escorrentía, que definimos como la razón entre lo que entra en la laguna y lo que cae sobre la cuenca de drenaje, permite hacer algunas observaciones sobre la hidrología de la cuenca.

<u>LAGUNA</u>	<u>CODIGO</u>	<u>ESCORRENTÍA</u>
Laguna Miñique	MIN	0,453
Laguna Miscanti	MIS	0,339
Lagunas Cotacotani	COT	0,280
Lago Chungará	CHR	0,237
Laguna Helada	HEL	0,198
Lagunas Bravas	BRA	0,115
Laguna Escondida	ESC	0,113
Laguna del Negro Francisco	FRA	0,109
Laguna Lejía	LEJ	0,089
Laguna Tuyajto	TUY	0,088
Lagunas del Jilguero	JIL	0,080
Laguna de la Azufrera	LAZ	0,073
Laguna Verde	LAV	0,069
Salar de Wheelwright	WHE	0,053
Laguna del Bayo	BAY	0,034
Laguna Trinchera	TRI	0,033
Laguna Lagunilla	LGU	0,010
Salar de la Laguna	LGN	0,008
Laguna Chivato Muerto	MUE	0,005
Salar de Ascotán Este	ASC	0,320
Salar de Ascotán Oeste	ASC	0,110

Tabla 9 : Coeficientes de escorrentía en cuencas con lagunas

La tabla 9 presenta los coeficientes de escorrentía en las cuencas cuya depresión central está ocupada en totalidad, o en gran parte, por una laguna. Cuando un salar ocupa la depresión central, la determinación del coeficiente de escorrentía es mucho más compleja, pues hay que estimar la evaporación a través de los sedimentos. Se puede consultar sobre este tema los trabajos de Grilli y Aravena (1984) y Grilli y Vidal (1986).

Se observa primero el gran rango de variación del coeficiente de escorrentía, desde 0,005 (0,5%) hasta 0,453 (45,3%), o sea de casi un factor 100. El promedio está entre 0,10 y 0,15 (10 a 15%). Coeficientes muy altos, como el de laguna Miñique, sugieren que los aportes a la laguna no provienen exclusivamente de lo que cae sobre su cuenca de drenaje, pero que recibe aportes subterráneos desde otras cuencas. Un tal proceso parece actuar en el salar de Ascotán. El coeficiente de escorrentía en la ladera oriental es muy elevado y casi tres veces superior al de la ladera occidental. Es probable que gran parte de los aportes orientales provengan de recargas afuera de la cuenca de Ascotán.

Por otra parte, coeficientes muy bajos como los de la laguna Chivato Muerto o del salar de la Laguna (0,5% y 0,8%) indican que una muy pequeña parte de las aguas que caen sobre la cuenca de drenaje llega hasta la laguna. Una gran parte del agua faltante se ha infiltrado, alimentando napas subterráneas y una cierta proporción se ha evaporado antes de infiltrarse. Un coeficiente de escorrentía bajo no es forzosamente un indicio negativo en prospección de agua. Sugiere la existencia de napas subterráneas bien alimentadas.

Este enfoque no reemplaza la estimación del balance hídrico de toda la cuenca. Además se puede utilizar solamente en caso de cuencas con lagunas. Pero es un enfoque simple que aporta importantes informaciones con pocos datos iniciales.

XV. CONCLUSIONES

emos estudiado la química de aguas de 53 cuencas cerradas de la Cordillera con salares y lagunas en su depresión central. (La cuenca del río Lauca es una sub-cuenca del salar de Coipasa). No se trata de un estudio exhaustivo, pues no hemos tocado ni la sedimentología, ni la mineralogía, ni la biología, ni siquiera la hidrogeología de los salares. Las principales preguntas planteadas al principio del estudio fueron:

- ¿ de donde provienen los componentes disueltos en las aguas ?
- ¿ cual es la razón de la variedad de composiciones químicas de las lagunas ?
- ¿ cuales son los sectores favorables para la prospección de aguas de buena calidad ?
- ¿ es posible estimar balances hídricos con los datos que tenemos ?

Los componentes disueltos en las aguas de aporte tienen un doble origen:

- *la alteración de rocas volcánicas o sedimentarias de la cuenca de drenaje por aguas meteóricas o hidrotermales.* Aguas de alteración de rocas volcánicas sin azufre ni mineralizaciones tienen salinidades generalmente comprendidas entre 50 y 200 mg/l; con presencia de azufre, la salinidad puede subir hasta 1500 mg/l. Las aguas que lixivian terrenos sedimentarios tienen salinidades comprendidas entre 500 y 5000 mg/l.

- *la redisolución de sales evaporíticas y salmueras residuales de antiguos salares recubiertos por formaciones volcánicas más recientes.* Es el principal mecanismo de salinización de las aguas de aporte. Sus salinidades pueden alcanzar varias decenas de gramos por litro. Se ha detectado varios tipos de sales y salmueras removilizadas en los aportes: cloruro de sodio (halita), sulfato de calcio (yeso), salmueras de cloruro de sodio y calcio, salmueras de cloruro de sodio y magnesio. Algunos salares parecen resultar en gran parte de la removilización de antiguos salares lixiviados por los aportes actuales.

Al evaporarse, el agua de aporte precipita una secuencia de minerales de solubilidad creciente. Cada vez que un mineral precipita, la composición de la solución cambia. Los constituyentes del mineral en el agua no pueden concentrarse conjuntamente mientras precipita el mineral. Si la concentración de uno de los constituyentes aumenta, la concentración del otro debe forzosamente bajar para mantener constante el producto de actividad iónica de los constituyentes del mineral. Por tanto, un agua que se evapora sigue una *vía evolutiva* determinada por su composición inicial. Las aguas de alteración de rocas volcánicas sin azufre siguen la vía carbonatada. Si nada interfiere en su evolución, llegan a salmueras carbonatadas de tipo Na / CO₃-Cl. Unos 15% de las aguas de aporte en las cuencas cerradas de la Cordillera de los Andes pertenecen a esta vía. Las aguas de alteración de rocas volcánicas con azufre siguen una vía sulfatada: sulfatada directa si hay poco azufre, sulfatada alcalina si hay más azufre, o neutra sulfatada si hay mucho azufre. Las tres vías llegan a salmueras sulfatadas del tipo Na / SO₄-Cl. Un 65% de las aguas de aporte siguen una de estas vías sulfatadas. Las aguas de alteración de rocas sedimentarias siguen en general la vía cálcica que llega a salmueras cálcicas de tipo Na-Ca / Cl. Un 19% de las aguas de aporte siguen esta vía.

Aunque 15% de las aguas de aporte siguen la vía carbonata, solamente una lagunita satélite de laguna Helada (II Región) pertenece a esta vía. Las demás aguas se mezclan con aguas sulfatadas y no llegan a salmueras carbonatadas. La casi totalidad de las salmueras de las lagunas y salares chilenos pertenece a los dos mega-grupos sulfatado y cálcico. Es la principal característica geoquímica de los salares chilenos. Hay 39 lagunas sulfatadas y 19 lagunas cálcicas. Además cabe señalar la existencia de dos salares con salmueras ácidas (Gorbea e Ignorado), casos excepcionales a nivel mundial. La presencia de salares cálcicos en ambientes volcánicos refleja la proximidad de formaciones sedimentarias o de antiguos salares calcicos por debajo de las estructuras volcánicas. Por eso, los salares cálcicos tienden a ocupar cuencas de menor altura que los salares sulfatados.

Proponemos para los ambientes evaporíticos una clasificación de aguas basada sobre las vías evolutivas. Es un enfoque muy simple. El cálculo de solamente tres razones (alc/Ca , $\text{alc}/(\text{Ca}+\text{Mg})$ y $(\text{alc}+\text{SO}_4)/\text{Ca}$, en miliequivalentes) del agua de aporte permite determinar la vía evolutiva que sigue el agua si no interfiere ningún proceso externo. Esta clasificación permite:

- relacionar el agua con los rasgos mayores de la litología de la cuenca de drenaje o sospechar un origen de las aguas externa a la cuenca.
- relacionar entre sí varias aguas de distinta composición y salinidad. Puede ser la misma agua a diferentes etapas de su evaporación.
- detectar procesos interferentes externos al agua, por ejemplo cuando la salmuera observada no pertenece a la misma vía evolutiva que el agua de aporte.

La salinidad y el arsénico son los dos componentes que casi siempre limitan la potabilidad de las aguas. Para uso en riego, hay que agregar el boro. La calidad de aguas está relacionada con sus vías evolutivas. Casi la mitad de las aguas de vía carbonatada es potable. La proporción baja a 39% para las aguas de vía sulfatada directa y alcalina y a 17% para las de vía sulfatada neutra. En cuanto a las aguas de vía cálcica, solamente una sobre 67 (o sea 1,5%) es potable. La vía carbonatada refleja aguas que drenan rocas volcánicas sin azufre ni mineralizaciones. Al contrario la aguas de vía cálcica drenan terrenos sedimentarios o han redissuelto salmueras cálcicas residuales; tienen una salinidad elevada. Entre los extremos, las aguas de vía sulfatada alcalina tienden a ser de mejor calidad que las que siguen la vía sulfatada neutra. Mientras más azufre en la cuenca, de menor calidad las aguas de aporte. En resumen, las aguas de mejor calidad se encuentran en terrenos volcánicos sin azufre ni mineralizaciones y de preferencia en sectores altos de la Cordillera, lejos del basamento sedimentario. Tales condiciones se encuentran más frecuentemente en la Primera Región. El norte de la Tercera Región es la zona menos favorable para la prospección de aguas diluidas.

La estimación del balance hídrico de las lagunas permite, con pocos parámetros, estimar el coeficiente de escorrentía de las cuencas. Coeficientes muy altos (> 30%) sugieren que los aportes a la laguna no provienen exclusivamente de lo que cae sobre su cuenca de drenaje, sino que recibe aportes subterráneos desde otras cuencas. Coeficientes muy bajos (< 1%) indican que una muy pequeña parte de las aguas que caen sobre la cuenca de drenaje llega hasta la laguna. Una gran parte del agua faltante se ha infiltrado, alimentando napas subterráneas. Un coeficiente de escorrentía bajo no es forzosamente un indicio negativo en prospección de agua. Sugiere la existencia de napas subterráneas bien alimentadas.

XVI. REFERENCIAS

Al-Droubi, A.; Fritz, B; Gac, J.Y. y Tardy, Y. 1980. Generalized residual alkalinity concept. Application to prediction of the chemical evolution of natural waters by evaporation. *Amer. J. Sci.* 280, p.560-572.

Alonso, H. 1979. Evolución salina del río Loa. II Cong. Geol. Chileno, 6-11 Agosto 1979, Arica, Chile. Actas, p. D31-D48.

Alonso, H. y Risacher, F. 1996. Geoquímica del Salar de Atacama, parte 1: origen de los componentes y balance salino. *Revista Geológica de Chile*, 23, 2, p. 113-122.

Aravena, R.; Peña, H.; Grilli, A.; Suzuki, O. y Mordeckai, M. 1989. Evolución isotópica de las lluvias y origen de las masas de aire en el Altiplano chileno. Estudios de hidrología isotópica en América Latina, IAEA-TECDOC 502, Vienna (Austria), p.129-142.

Arias, J.; Baeza, L.; Campano, P.; Espinoza, S. y Guerra, N. 1991. Atlas geoquímico al noroeste de Antofagasta, Chile: Resultados. Universidad Católica de Norte, Antofagasta, Chile.

Alpers, C. y Brimhall, G. 1988. Middle Miocene climatic change in the Atacama Desert, northern Chile: Evidence from supergene mineralization at La Escondida. *Geol. Soc. Amer. Bull.* vol.100, p. 1640-1656.

Aubouin, J.; Borello, A.V.; Cecioni, G.; Charrier, R.; Chotin, P.; Frutos, J.; Thiele, R. y Vicente, J.C. 1972. Esquisse paléogéographique et structurale des Andes Méridionales. *Rev. Géogr. Phys. et Géol. Dyn.* vol.16, n° 9.

Badaut, D. y Risacher F. 1983. Authigenic smectite on diatom frustules in Bolivian saline lakes. *Geochim. Cosmochim. Acta* 47, p. 363-375

Berthold, C.E. y Baker, D.H. 1976. Lithium recovery from geothermal fluids. U.S. Geol. Survey Prof. Paper 1005, p. 61-66.

Bevacqua, P. 1992. Geomorfología del salar de Atacama y estratigrafía de su núcleo y delta, Segunda Región de Antofagasta, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad Católica del Norte, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Antofagasta, 284p.

Bogdanic, T. 1991. Evolución paleográfica del Cretácico –Terciario Inferior entre los 21-23°S, Región de Antofagasta. VI Cong. Geol. Chileno, Santiago, vol.1, p. 857-861.

Brown, M. 1991. Relationship between magmatism and tectonics in Northern Chile: geochemical evidence from 25° 30' - 27° 00' S. VI Cong. Geol. Chileno. Actas, p.631-634.

- Brüggen, W.A.** 1950. Fundamentos de Geología de Chile. Inst. Geo. Militar. Santiago. 374 p.
- Campano, P. y Guerra, N.** 1975. Distribución de Cr, Ni, Co, Cu, Zn, Pb. en rocas ígneas y sedimentarias del Norte de Chile. MSc. Tesis. Univ. Católica del Norte, Chile.
- Campano, P.; Guerra, N., y Oyarzún, J.** 1976. Contenido de Cu, Zn, Pb, Ni y Co en rocas extrusivas y sedimentarias del Norte de Chile. I Cong. Geol. Chileno. Actas, vol. II, p. F43-F57.
- Campano P. y Guerra N.** 1979. Contribución al estudio geoquímico de rocas volcánicas del Norte de Chile comprendidas entre las latitudes 22°00' y 26° 30' S. II Cong. Geol. Chileno. Actas, vol.4, p J110- J126.
- Carroll, D.** 1962. Rainwater as a chemical agent of geologic processes. A review. U.S. Geol. Survey Water-Supply Paper 1535-G, 18p.
- Chong, G.** 1984. Die Salare in Nordchile - Geologie, Struktur und Geochemie. Geotektonische Forsch., 67, Stuttgart, 146 pp.
- Chong, G.** 1988. The Cenozoic saline deposits of the Chilean Andes between 18° 00' and 27° 00' south latitude. The Southern Central Andes, Springer-Verlag, Berlin. Lecture Notes in Earth Sciences, vol.17, p. 137-151.
- Chong, G. y Reutter, K.J.** 1985. Fenómenos de tectónica compresiva en las Sierras de Varas y Argomedo, Precordillera Andina, en el ámbito de paralelo 25° sur. IV Cong. Geol. Chileno, Actas, vol.2, p. 2/219-2/238.
- Chowdhury, A.N.; Handa, B.K. y Das, A.K.** 1974. High lithium, rubidium and cesium contents of thermal spring water, spring sediments and borax deposits in Puga Valley, Kashmir, India. *Geochem J.*, vol.8, (2), p. 61-65.
- Coira, B.; Davidson, J.; Mpodozis, C. y Ramos, V.** 1982. Tectonic and magmatic evolution of the Andes of northern Argentina and Chile. *Earth Sci. Rev.*, 18. p 303-332.
- Dalannais, L.** 1979. Hidrogeología del borde oriental del salar de Atacama. Univ. Católica del Norte, Dpto. de Geología. Memoria de Título (inédito), 138 p.
- DGA** 1987. Balance Hídrico de Chile. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Santiago, Chile.
- Deruelle, B.** 1978. Calc-alkaline and shoshonitic lavas from five Andean volcanos (between latitudes 21°45' y 24° 30'S) and the distribution of the Plio Quaternary volcanism of the south-central and southern Andes. *Jour. Volc. Geotherm. Res.* vol.3 p 281-298.

Diaz, G.; Bonilla, R. y Peralta F. 1972. Geología de superficie, sub-superficie y geoquímica del salar de Atacama. CORFO, Dpto. de Recursos Hidráulicos. Informe, 163 p.

Dickson, A.G. 1981. An exact definition of total alkalinity and a procedure for the estimation of alkalinity and total inorganic carbon from titration data. Deep-Sea Research, vol.28A, n° 6, p. 609-623.

Dignman, R.J. 1965. Cuadrángulo San Pedro de Atacama. Inst. Invest. Geol.. Carta Geológica de Chile n° 14, 30 p.

Dignman, R.J. 1967. Geology and groundwater resources of the northern part of the salar de Atacama, Antofagasta Province. U.S.Geol. Surv. Bull.1219, 63 p.

Ericksen, G. 1963. Geology of the salt deposits and the salt industry of Northern Chile: U.S. Geol. Surv. Open-File Report, 164 p.

Ericksen, G. 1979. Origin of the nitrate deposits of Northern Chile. II Cong. Geol. Chileno, Actas, vol. 2, p. C181-C205.

Ericksen, G. 1981. Geology and origin of the Chilean nitrate deposits. U.S. Geol Survey Prof. Paper 1188, 37 p.

Eugster, H.P. y Hardie L.A. 1978. Saline Lakes. *In*: Lakes, Chemistry, Geology, Physics, (A. Lerman, ed.), Springer-Verlag, p. 237-293.

Ferraris F., 1979. Antecedentes geológicos del borde continental del Norte de Chile. II Cong. Geol. Chileno. Actas, vol.1 p. A1-A23.

Fritz, B. 1975. Etude thermodynamique et simulation des réactions entre minéraux et solutions. Application à la géochimie des altérations et des eaux continentales. Sci. Géol., Mém. 41, Strasbourg, 152 p.

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

Frutos, J. 1977. Evolution de la marge continentale des Andes du Nord du Chili. Le volcanisme et la métallogenèse. Tesis Dr., Univ. Paris-Sud.

Frutos, J. y Tobar, A. 1973. Evolution of the southwestern continental margin of South America. III Intern. Gondwana Symp. Camberra, Australia.

Fuenzalida, H. 1950. Clima, en: Geografía Económica de Chile. CORFO, Santiago.

Galli, C. y Dingman, R. 1962. Cuadrángulo Pica, Alca, Matilla y Chacarilla. Provincia de Tarapacá. Inst. Invest. Geol. Carta Geol. de Chile. Santiago, vol.3 n° 2, 3, 4 y 5, 124 p.

- Gardeweg, M.; Ishihara, S.; Matsuhisa, Y.; Shibata, K.Y. y Terashima, S.** 1984. Geochemical studies of Upper Cenozoic Igneous rocks from the Altiplano of Antofagasta, Chile. *Bull. Geol. Surv. of Japan*. vol.35 (11), p. 547-563.
- Garrels, R.M. y Mackenzie, F.T.** 1967. Origin of the chemical composition of some springs and lakes. *In: Equilibrium concepts in natural water systems*. Amer. Chem. Soc., p. 222-242.
- Guerra, N.; Campano, P. y Véliz, L.** 1988. Estudio preliminar acerca de la geoquímica y petrología del magmatismo intrusivo de la Cordillera de la Costa, II Región, Antofagasta. V Cong. Geol. Chileno, Actas, p. I/333 – I/353.
- Guest, J.** 1969. Upper Tertiary ignimbrites in the Andean Cordillera of part of the Antofagasta Province, Northern Chile. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, vol.80, p.337-362.
- Guven, N.** 1988. Smectites. *Rev. Mineral.* 19, p. 497-559.
- Grilli, A. y Aravena R.** 1984. Estimación por métodos indirectos de la evaporación a través del suelo de salares. Dirección General de Aguas, Departamento de Hidrología, Publicación interna E.H. N° 85/3, Santiago.
- 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, 19 p.
- Grilli, A.; Vidal, F. y Garín, C.** 1986. Balance hidrológico nacional, II Región. Dirección General de Aguas, Departamento de Hidrología, Publicación interna S.D.E.H. 86/1, Santiago, 167p.
- Guest, J.** 1969. Upper Tertiary ignimbrites in the Andean Cordillera of part of the Antofagasta Province, Northern Chile. *Geol. Soc. Amer. Bull.* vol. 80, p. 337-362.
- Guven, N.** 1988. Smectites. Hydrous phyllosilicates (exclusive of micas). *Reviews in Mineralogy*, (S.W. Bailey, ed.), vol.19, chapter 13, p. 497-559.
- Hardie, L.A. y Eugster H.P.** 1970. The evolution of closed-basin brines. *Mineral. Soc Amer. Spec. Paper* 3, p. 273-290.
- Harrington, H.** 1961. Geology of parts of Antofagasta and Atacama provinces, Northern Chile. *Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geologist*. vol. 45 n° 2, p. 169-197.
- Harvie, C.E. y Weare, J.H.** 1980. The prediction of mineral solubilities in natural waters: the Na-K-Mg-Ca-Cl-SO₄-H₂O system from zero to high concentration at 25°C. *Geochim. Cosmochim. Acta* 44, p. 981-997.

Harvie, C.E.; Moller N. y Weare, J.H. 1984. The prediction of mineral solubilities in natural waters: the Na-K-Mg-Ca-H-Cl-SO₄-OH-HCO₃-CO₃-CO₂-H₂O system to high ionic strength at 25°C. *Geochim. Cosmochim. Acta* 48, p. 723-751.

Heath, R.C. 1983. Basic ground-water hydrology. U.S. Geol. Survey Water-Supply Paper 2220.

Helgeson H.C.; Garrels R.M. y Mackenzie F.T. 1969. Evaluation of irreversible reactions in geochemical processes involving minerals and aqueous solutions - II. Applications. *Geochim. Cosmochim. Acta* 33, p. 455-481.

Ide, F. 1978. Cubicación del yacimiento salar de Atacama. Memoria de Título (inédito), Universidad de Chile, Departamento de Minas, 144 p.

Ishihara, S.; Ulriksen, C.; Sato, K.; Terashima, S.; Sato, T. y Endo, Y. 1984. Plutonic rocks of North-Central Chile. *Bull. Geol. Surv. Japan*. vol.35 (11), p. 503-536.

Jensen, A. 1992. Las cuencas aluvio-lacustres Oligoceno-Neogenas de la región del Ante-Arco de Chile Septentrional entre los 19° y 23° Sur. Ph Tesis Univ. de Barcelona.

Jones, B.F. 1986. Clay mineral diagenesis in lacustrine sediments. *U.S. Geol. Surv. Bull.* 1578, p. 291-300.

Klohn, W., 1972. Hidrografía de las zonas desérticas de Chile. Contribución al Proyecto CHI 535, (J. Burz, Ed.), Santiago.

Lahsen, A. 1976. La actividad geotermal y sus relaciones con la tectónica y el volcanismo en el norte de Chile. Primer Congreso Geológico Chileno, Santiago, Actas, vol.1, p. B105-B1027.

Lahsen, A. 1982. Upper Cenozoic volcanism and tectonism in the Andes of northern Chile. *Earth Sci. Rev.* 18, p 285-302.

López, L. 1982. Características geoquímicas de rocas ígneas asociadas con pórfidos cupríferos chilenos. *Rev. Geol. Chilena*, n° 17 p. 3-19.

Macellari, C. E.; Su, M.J. y Townsend, F. 1991. Structure and seismic stratigraphy of the Atacama basin, Northern Chile. VI Cong. Geol. Chileno. Actas, vol.1, p 133-137.

Maksaev, V. 1978. Cuadrángulo Chitigua y sector occidental del cuadrángulo cerro Palpana, Región de Antofagasta. *Inst. Invest. Geol., Carta Geol. de Chile* n° 31, Santiago, 55 p.

Maksaev, V. 1979. Las fases tectónicas incaica y quechua en la Cordillera de los Andes del Norte Grande de Chile. II Cong. Geol. Chileno, vol.1, p. B63-B77.

Mardones, L. 1977. Geología e hidrogeología de los salares de Ascotán y Carcote, II Región, Chile. Univ. Católica del Norte, Dpto. de Geología. Memoria de Título (inédito), 234 p.

Mardones, L. 1986. Características geológicas e hidrogeológicas del salar de Atacama. *In: El litio, un nuevo recurso para Chile*, (G. Lagos, editor), Universidad de Chile, Dpto Ingeniería en Minas, Editorial Universitaria, Santiago, p. 181-216.

Mardones, L. 1997. Características isotópicas de las aguas subterráneas entre los paralelos 21° y 24° latitud sur, con énfasis en el salar de Ascotán. Coloquio Internacional: El Recurso Agua en los Andes, Orstom - Universidad Católica del Norte, 10-13 de junio de 1997, Antofagasta.

Moraga, A.; Chong, G.; Fortt, M.A. y Henríquez, H. 1974. Estudio geológico del salar de Atacama, Provincia de Antofagasta. Boletín del Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago, Chile, 29, 56p.

Mortimer, C. 1973. The Cenozoic history of the southern Atacama Desert, Chile. *Geol. Soc. London.*, J., vol.129, n° 47 p. 505-526.

Mortimer, C. 1980. Drainage evolution in the Atacama desert of northernmost Chile. *Rev. Geol. Chile*, n° 11, p.3-28.

Mortimer, C. y Saric, N. 1975. Cenozoic studies in northernmost Chile. *Geol. Rundschau*, vol.64 p. 395-420.

Muñoz, J. 1973. Geología de Chile. Ed. Andrés Bello, Santiago. 209 p.

Naranjo J.A. y Paskoff, R. 1985. Evolución Cenozoica del piedemonte andino en la Pampa del Tamarugal, Norte de Chile (18°-21°S). IV Cong. Geol. Chileno, vol.4, p.5/149 -5/163. Antofagasta.

Oyarzún, J. 1971. Contribution a l'étude géochimique des roches volcaniques et plutoniques du Chili. These Univ. Paris Sud, 195 p.

Palacios, C. y López, L. 1979. Geoquímica y petrología de andesitas cuaternarias de los Andes Centrales (18°57' - 19°28'S). II Cong. Geol. Chileno, vol.3, p. E73-E88.

Paskoff, R. 1976. Sobre la evolución geomorfológica del gran acantilado costero del Norte Grande de Chile. *Rev. Norte Grande* n° 6, Univ. Católica de Chile.

Peña, H. 1989. Mediciones de ¹⁸O y ²H en "penitentes" de nieve. Estudios de hidrología isotópica en América Latina, IAEA-TECDOC 502, Vienna (Austria), p.143-154.

Pichler, H. y Zeil, W. 1972. The Cenozoic rhyolite-andesite association of the Chilean Andes. *Bull. Volcanol.*, 35, p 452-424.

Pitzer, K.S. 1979. Theory: Ion interaction approach. *In: Activity coefficients in electrolyte solutions* (R.M. Pytkowicz, ed.), CRC Press, p.157-208.

Ramírez, C. y Gardeweg, M. 1982. Carta Geológica de Chile N° 54, Toconao. Serv. Nac. de Geol. y Minería, Chile.

Reutter, K-J.; Heinsohn, E. y Wigger, P. 1991. Crustal structure of the Coastal Cordillera near Antofagasta, Northern Chile. VI Cong. Geol. Chileno. Actas, vol.1, p. 862-866.

Reutter K-J. y Scheuber, E. 1988. Relation between tectonic and magmatism in the Andes of Northern Chile and adjacent areas between 21° and 25° S. V Cong. Geol. Chileno, Santiago, vol.1, p. A345-A363.

Rieu, M. 1975. Les formations sedimentaires de la Pampa del Tamarugal et le río Loa. ("Norte Grande" du Chili): Cah. Orstom, Sec. Geol. VII, 2, p. 145-164.

Risacher, F. y Alonso H. 1996. Geoquímica del Salarde Atacama, parte 2: evolución de aguas. Revista Geológica de Chile, 23, 2, p. 123-134.

Risacher, F. y Fritz, B. 1991. Geochemistry of Bolivian salars, Lipez, southern Altiplano: origin of solutes and brine evolution. Geochim. Cosmochim. Acta 55, p. 687-705.

Ruiz, C. 1965. Geología y yacimientos metalíferos de Chile. Inst. Invest. Geol., Chile. 305 p.

Salas, R.; Kast, R. y Montecinos, F. 1966. Geología y recursos minerales del Departamento de Arica, Provincia de Tarapacá. Inst. Invest. Geol., Bol. 21, 114 p.

Salfity, J.A. 1985. Lineamientos transversales al rumbo andino en el Noroeste Argentino. IV Cong. Geol. Chileno, Actas, vol.2, p. 119-137.

Scheuber, E y Reutter, H.J. 1992. Magmatic arc tectonic in the Central Andes between 21° y 25° S. Tectonophysics, 205. p 127-140.

Schoeller, H. 1962. Les eaux souterraines. Masson, Paris.

Scholl, D.W.; Christensen, M.N.; von Huene, R. y Marlow, M.S. 1970. Peru-Chile trench sediments and sea- floor spreading. Geol. Soc. Amer. Bull., vol.81, p. 1339-1360.

Smith, G.I. 1976. Origin of lithium and other components in the Searles Lake evaporites, California. U.S. Geol. Survey Prof. Paper 1005, p. 92-103.

Stern, C.R. y Mpodozis C. 1991. Geological evidence for subduction erosion along the west coast of Central and Northern Chile. VI Cong. Geol. Chileno. Actas, p. 205-207.

Stoertz, G. y Ericksen, G. 1974. Geology of salars in Northern Chile. U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 811, 65 p.

Stumm, W. y Morgan J.J. 1970. Aquatic chemistry. Wiley - Interscience, New York.

Thorpe, R.S.; Francis, P.W. y Moorbath, S. 1979. Rare earth and strontium isotope evidence concerning the petrogenesis of north Chilean ignimbrites. *Earth Planet. Sci. Lett.* vol. 42, p. 359-367.

Van Moort, J.C. 1985. Procesos naturales de enriquecimiento de iones nitrato, sulfato, cloruro, iodato, borato, perclorato y cromato en los caliches del Norte de Chile. IV Cong. Geol. Chileno. Actas, p. 3/674 – 3/701.

Vila, T. 1975. Geología de los depósitos andinos, Provincia de Antofagasta, Chile. *Rev. Geol. de Chile*, nº 2, p 41-55.

Vila, T. 1976. Modelo de distribución y origen de algunos elementos en salmueras de depósitos salinos andinos, Norte de Chile. I Cong. Geol. Chileno. Actas, vol.2, p. E65-E82.

White, A.F.; Claassen, H.C. y Benson, L.V. 1980. The effect of dissolution of volcanic glass on the water chemistry in a tuffaceous aquifer, Rainer Mesa, Nevada. U.S. Geol. Survey Water-Supply Paper 1535-Q, 34p.

White, D.E.; Hem, J.D. y Waring, G.A. 1963. Data of geochemistry. Chemical composition of subsurface waters. U.S. Geol. Survey Prof. Paper 440-F, 67p.

White, D.E.; Thompson; J.M. y Fournier, R.O. 1976. Lithium contents of thermal and mineral waters. U.S. Geol. Survey Prof. Paper 1005, p. 58-60.

Wollast, R.; Mackenzie, F. T. y Bricker, O.P. 1968. Experimental precipitation and genesis of sepiolite at earth-surface conditions. *Am. Mineral.*, 53, p. 1645-1662.

Worner, G.; López, L.; Moorbath, S.; Horn, S.; Entenmann, J.; Harmon, R. y Davidson, J. 1992. Variaciones geoquímicas, locales y regionales, en el frente volcánico cuaternario de los Andes Centrales (17°30'-22°00'), Norte de Chile. *Rev. Geol. de Chile*, vol.19, nº 1, p. 37-56.

Zeil, W. 1964. *Geologie von Chile*. Berlin (Borntraeger) 233 p.

Zeil, W. y Pichler, H. 1967. Die Känozoische Rhyolith-Formation in mittleren Abschnitt der Anden. *Geol. Rundschau*, 57, p. 48-51.

Zumaeta, O. 1981. Constituyentes químicos de varias aguas de riego de las provincias de Arica y Parinacota, Primera Región, Chile. *Rev. Univ. del Norte, Arica.*, nº 8.



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

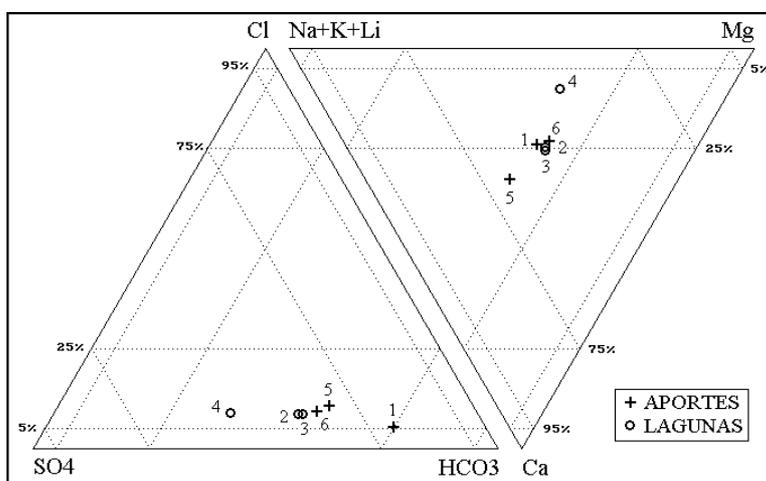


Fig.1 : Composición de aguas de Cotacotani

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 calculo 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 mas salada COT-4 es 33 veces sobresaturadas en calcita y 29 veces en magnesita. Tales valores, extremadamente altos, indican que algo esta 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.

COT	1e	5e	6e	Lago(eq)	lago
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: $V_{ap} / V_{cuenca} = 0,28$

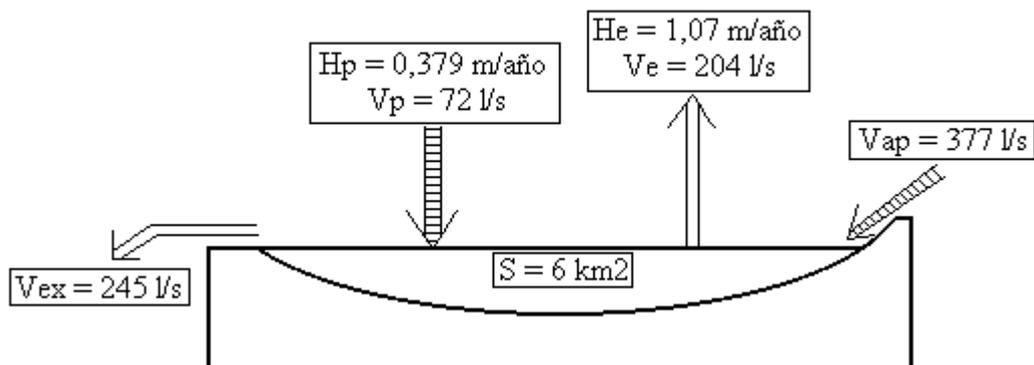


Fig.2 : Balance hídrico de las Lagunas Cotacotani

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 ($\text{Na} / \text{SO}_4\text{-Cl}$), en buen acuerdo general con la geología de la cuenca de drenaje.

Referencias y estudios anteriores

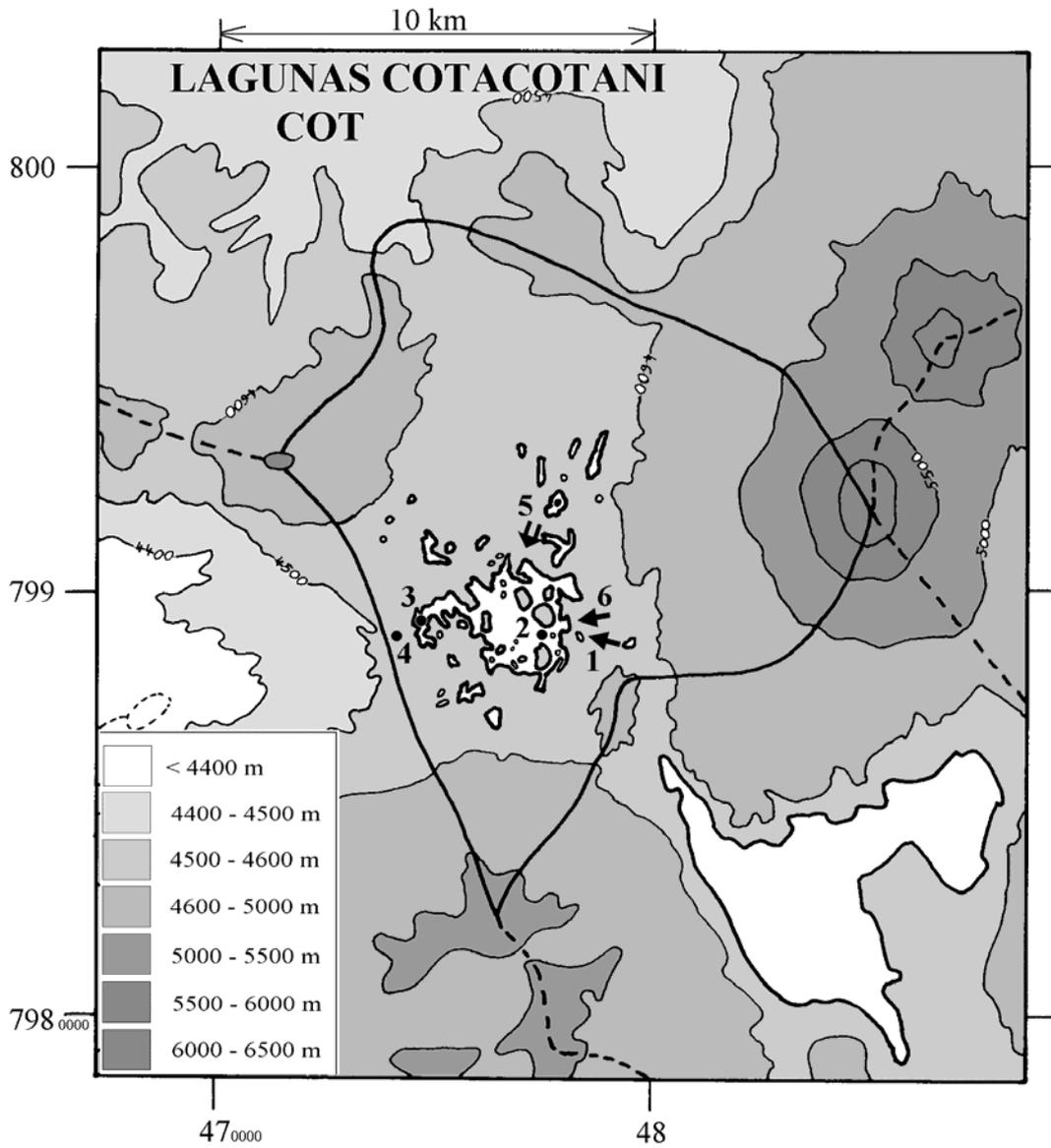
Mladinic, P.A.; Quintana, E.H.; Hrepic, N.V. 1984. Parámetros físicos y químicos de las aguas de los lagos Chungará y Cotacotani, I Región (Chile). IDESIA (Chile), vol.8, 5-17.

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.

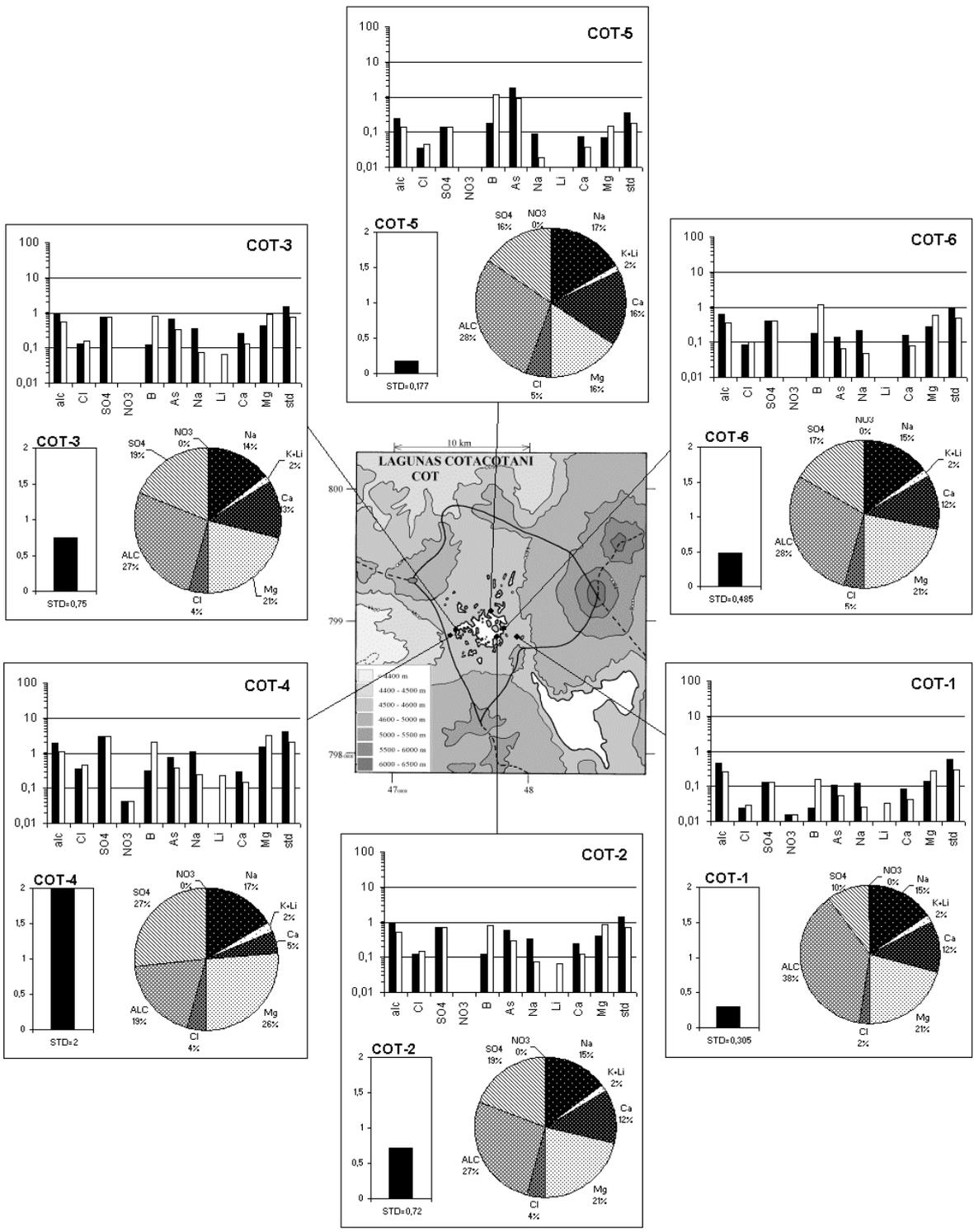
CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

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%



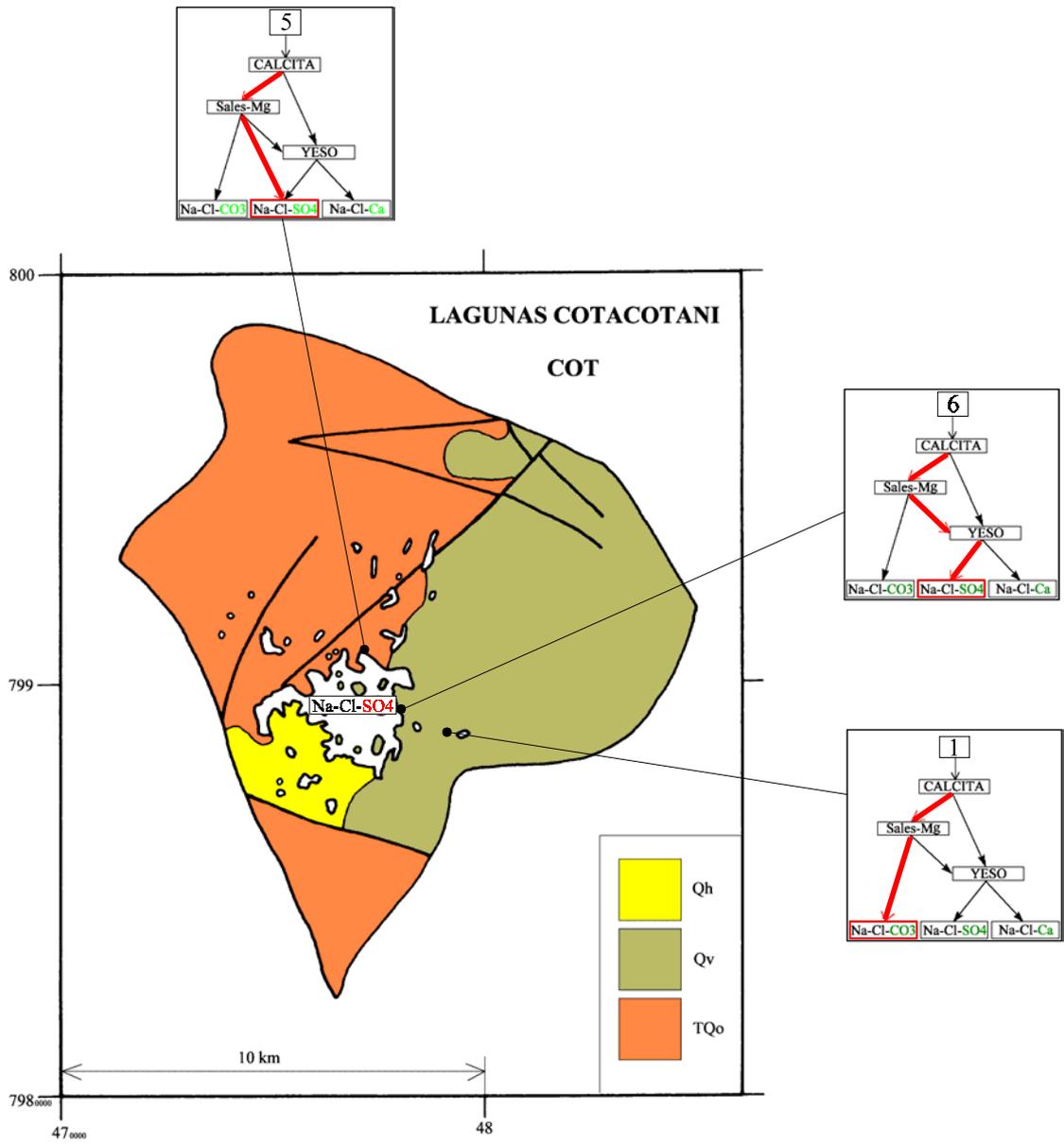
MAPA GEOLOGICO Y VIAS EVOLUTIVAS

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.

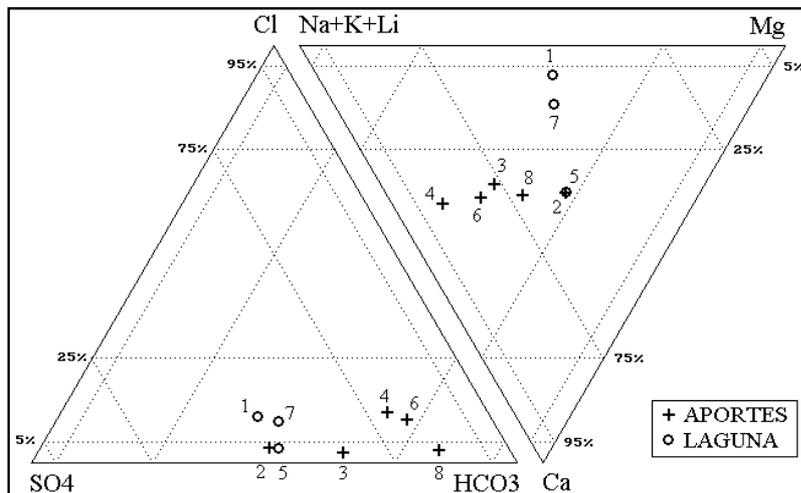


Fig.1: Composición de aguas y salmueras del Lago Chungará

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 promedio, lo que da alguna confiabilidad para utilizar nuestros datos puntuales.

El principal problema consiste en establecer la concentración promedia en cloruro de los aportes. La concentración promedia 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 promedia 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:

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

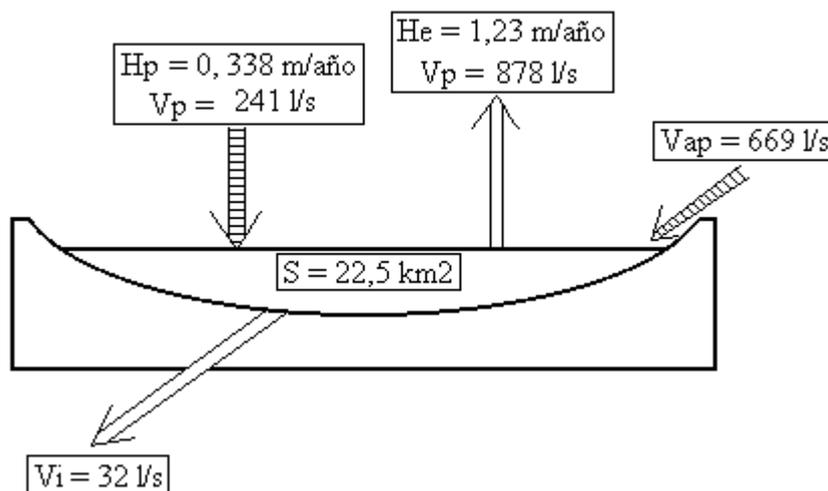


Fig.2 : Balance hídrico del lago Chungará

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:

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

El coeficiente de escurrimiento es de:

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

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 colectar 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.

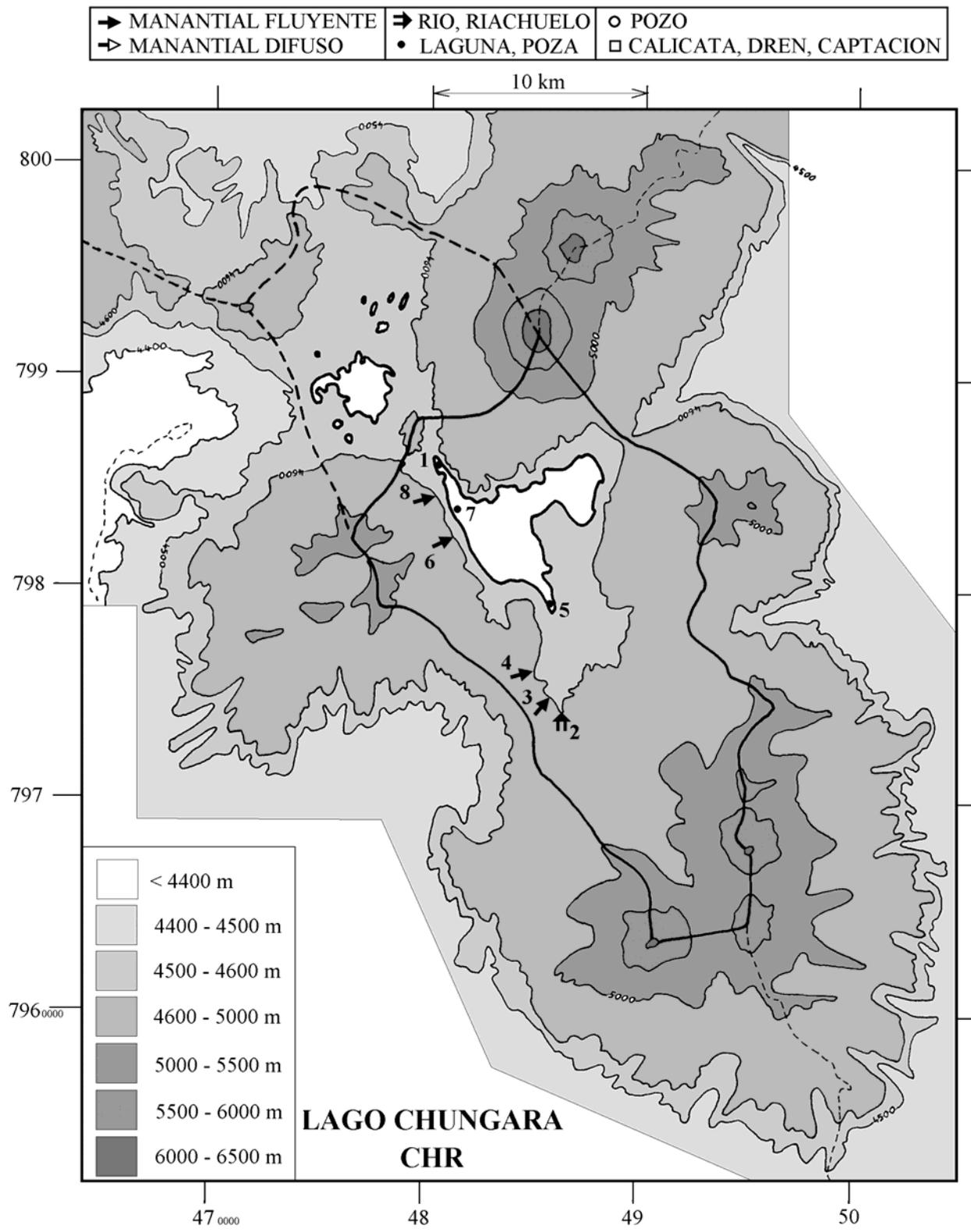
Referencias y estudios anteriores

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.

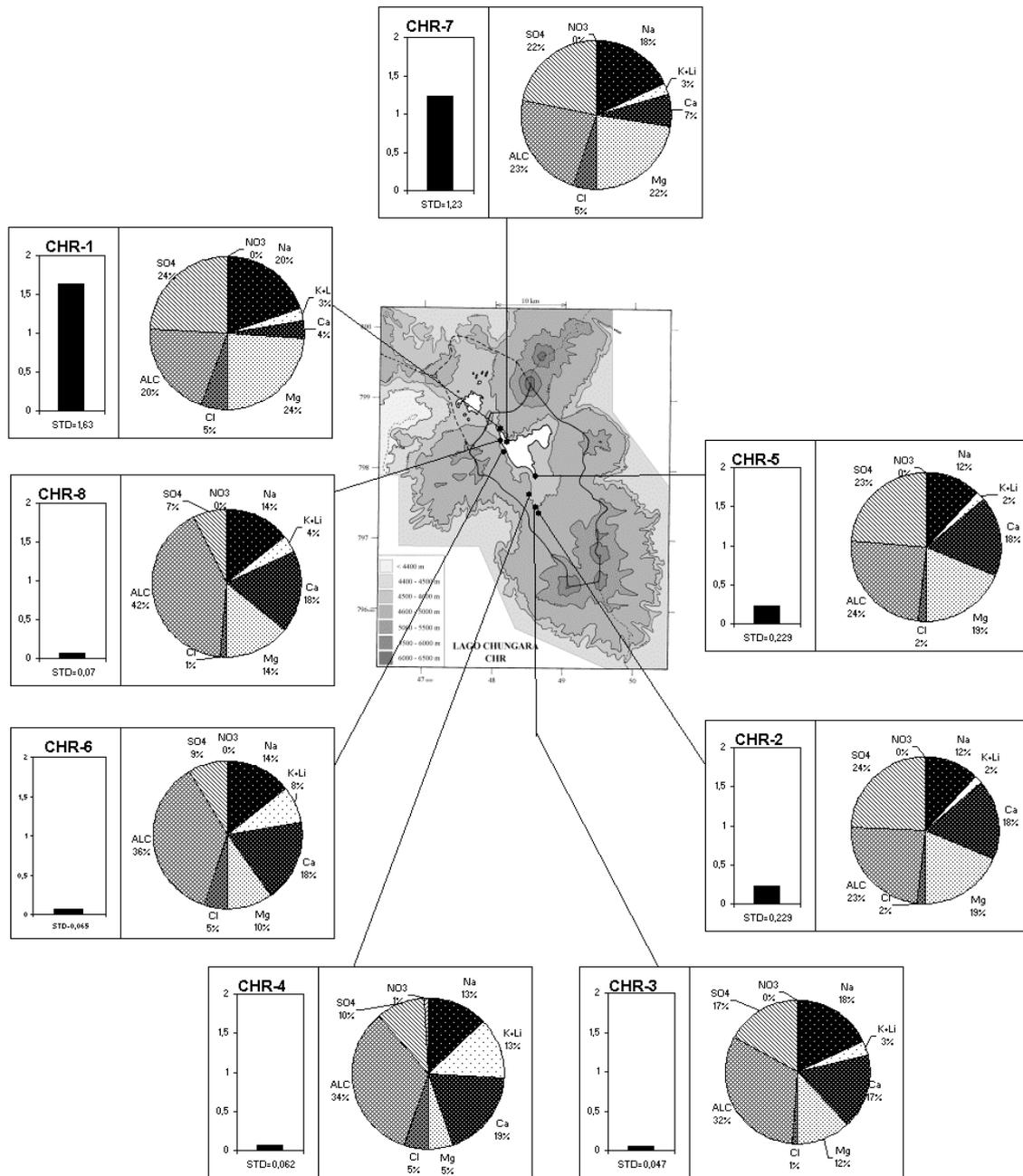
CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

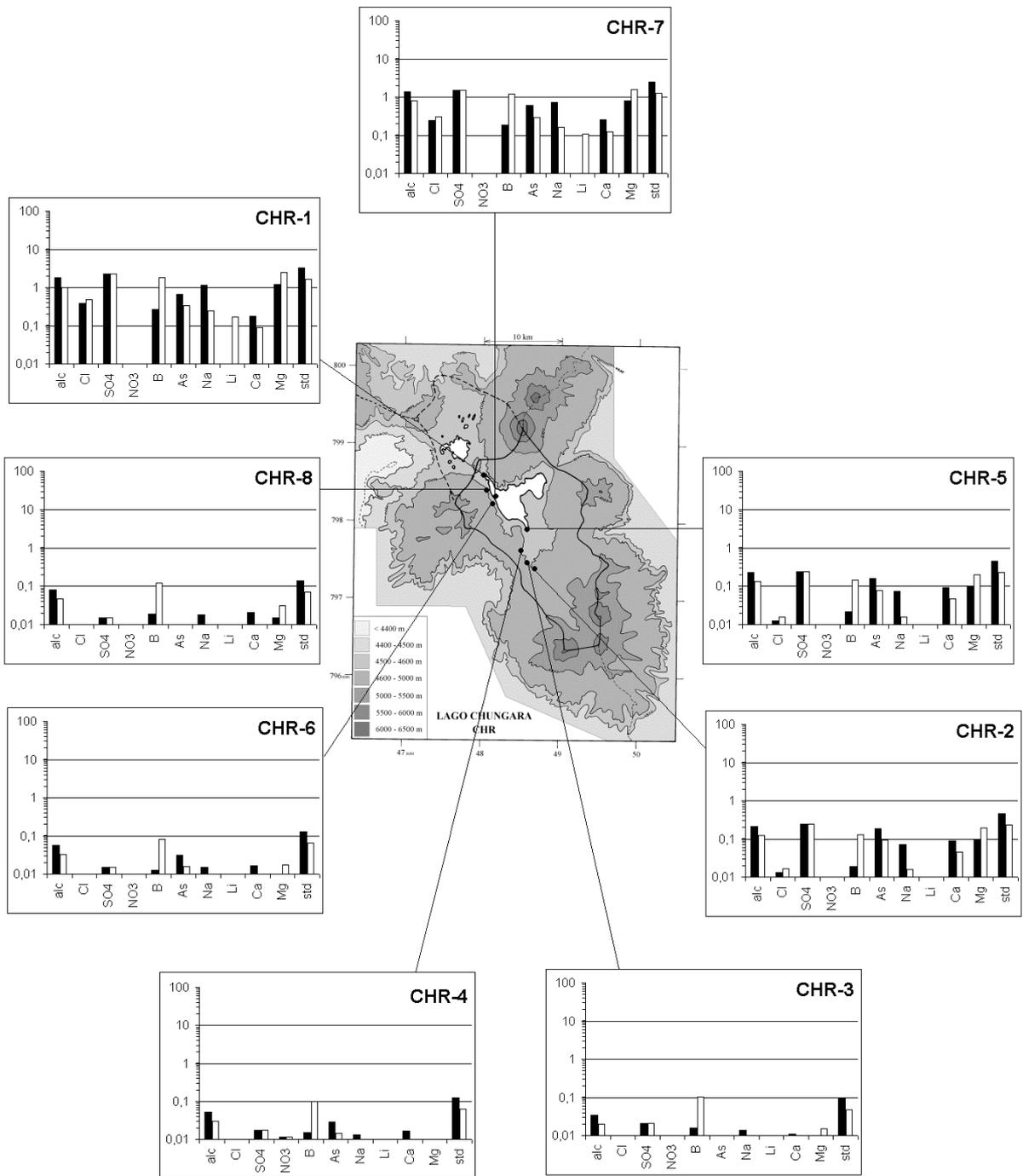
NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF. %	NUMERO	δ ¹⁸ O	δ ² H
CHR-1	1633	239	185	0,06	25,22	24,77	1,8	CHR-3	-13,92	-107
CHR-2	229,0	74,4	0,24	2,6	2,583	2,602	0,7	Análisis de oxígeno-18 y deuterio		
CHR-3	47,44	12,1	0,0	8,8	0,3241	0,3143	3,1			
CHR-4	62,14	18,1	0,0	4,1	0,4380	0,4400	0,5			
CHR-5	228,7	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 %



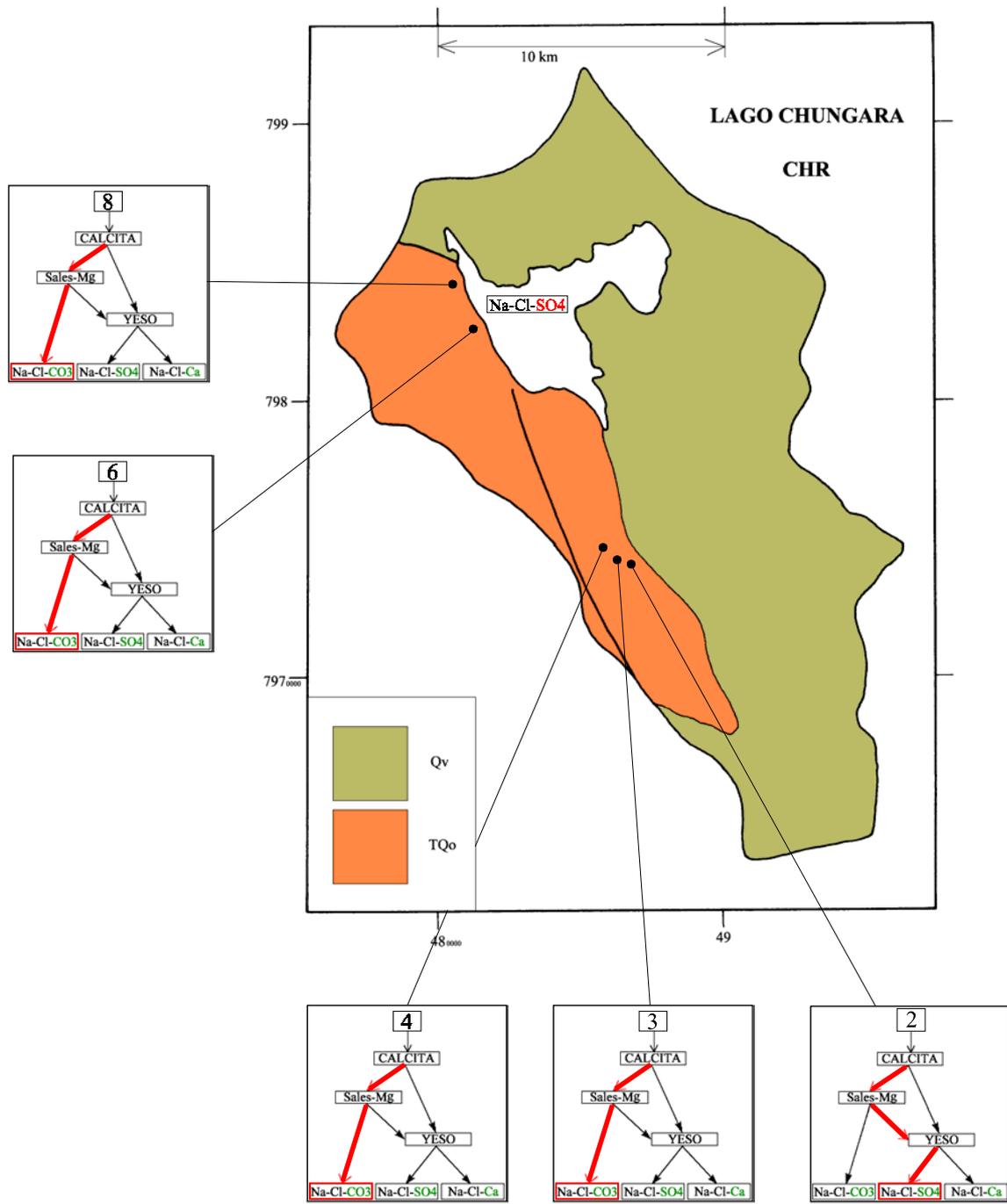


MAPA GEOLOGICO Y VIAS EVOLUTIVAS

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

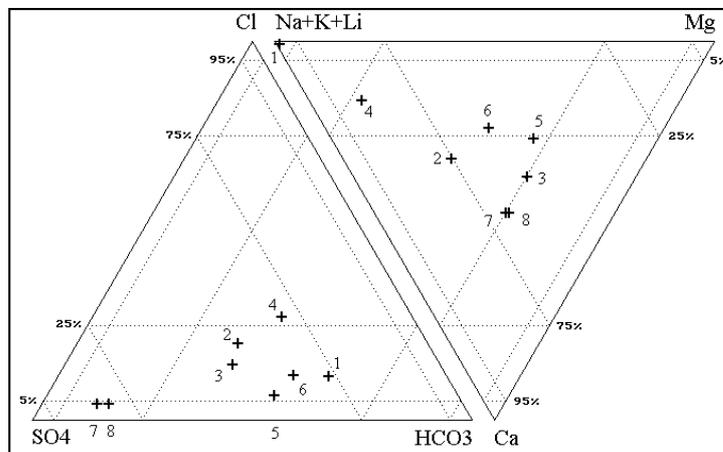


Fig.1: Composición de aguas del río Lauca

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

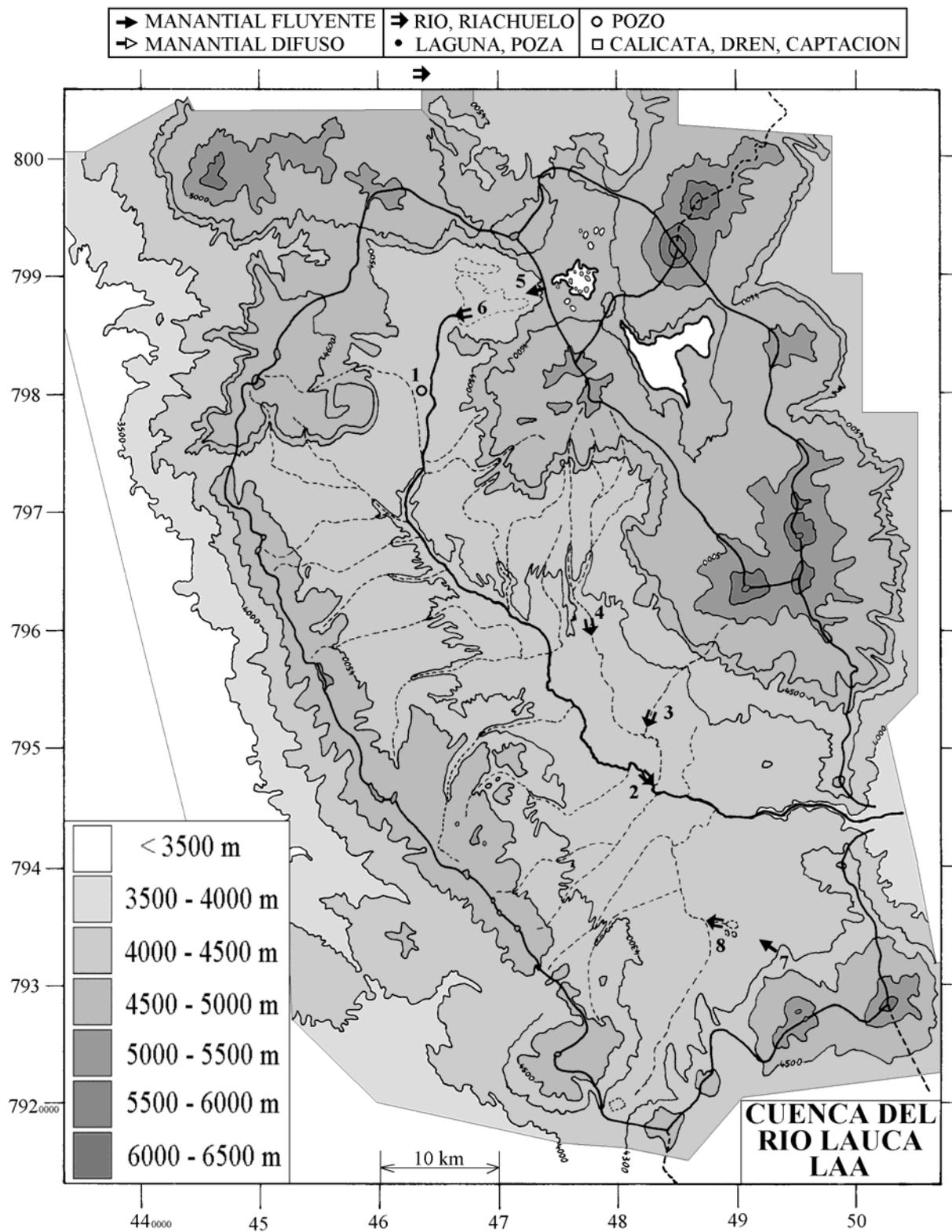
El agua de mejor calidad para cualquier uso es la del pozo surgente (LAA-1). En general, las demás aguas presentan concentraciones aceptables en componentes mayores, pero a menudo en exceso en arsénico y boro, limitantes para uso potable y riego respectivamente. Sorprende el contenido muy elevado en 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.

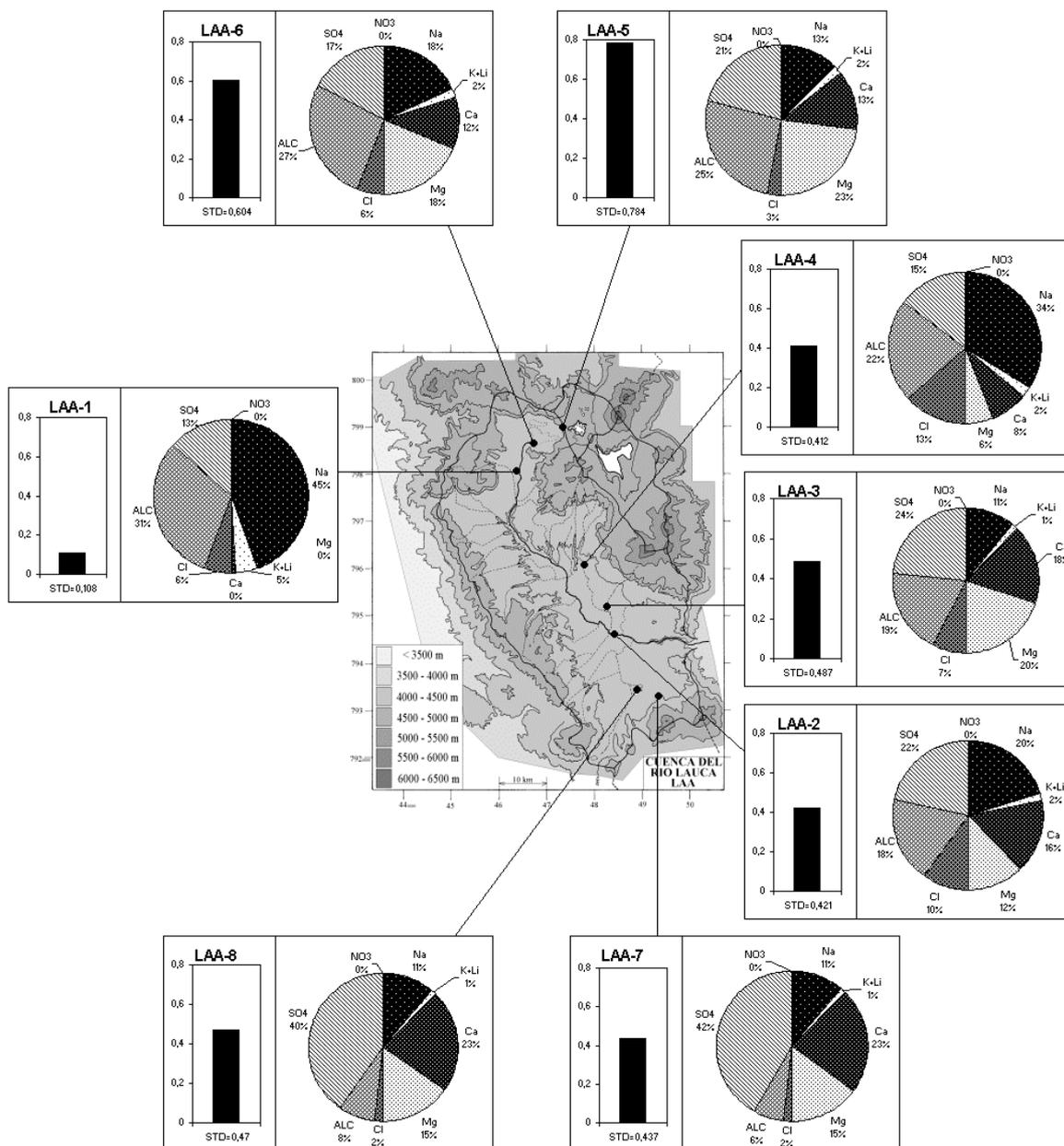
NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF. %
LAA-1	108,2	30,7	0,24	0,27	0,895	0,8902	0,5
LAA-2	421,4	101	8,16	0,16	5,677	5,650	0,5
LAA-3	486,5	142	4,44	0,70	6,476	6,594	1,8
LAA-4	412,3	113	11,7	0,11	5,695	5,612	1,5
LAA-5	783,8	337	1,74	12	10,74	10,75	0,2
LAA-6	604,2	231	17,3	0,44	8,355	8,256	1,2
LAA-7	436,7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

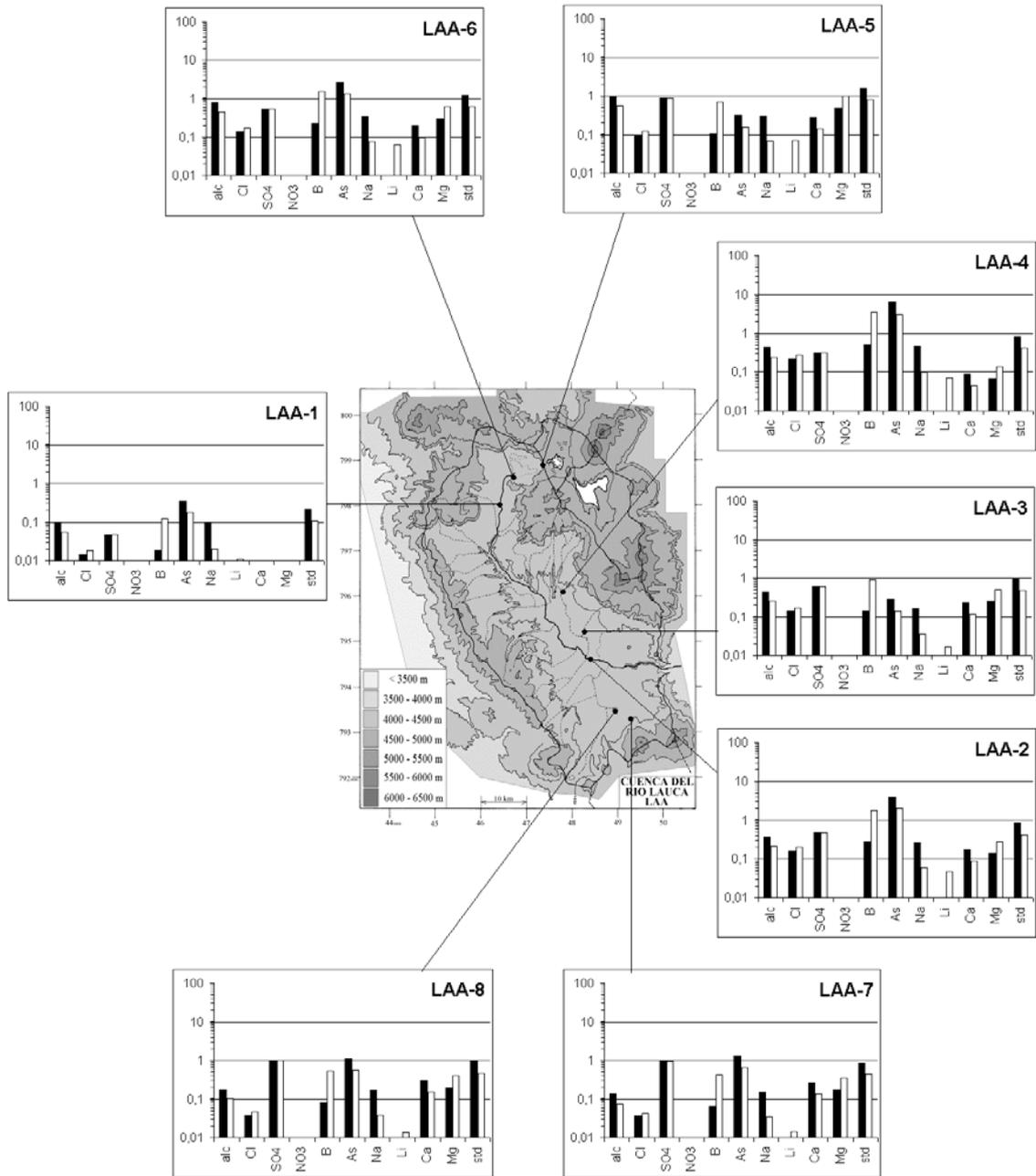
NUMERO	δ ¹⁸ O	δ ² H
LAA-1	-13,67	-108
LAA-7	-15,34	-104

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

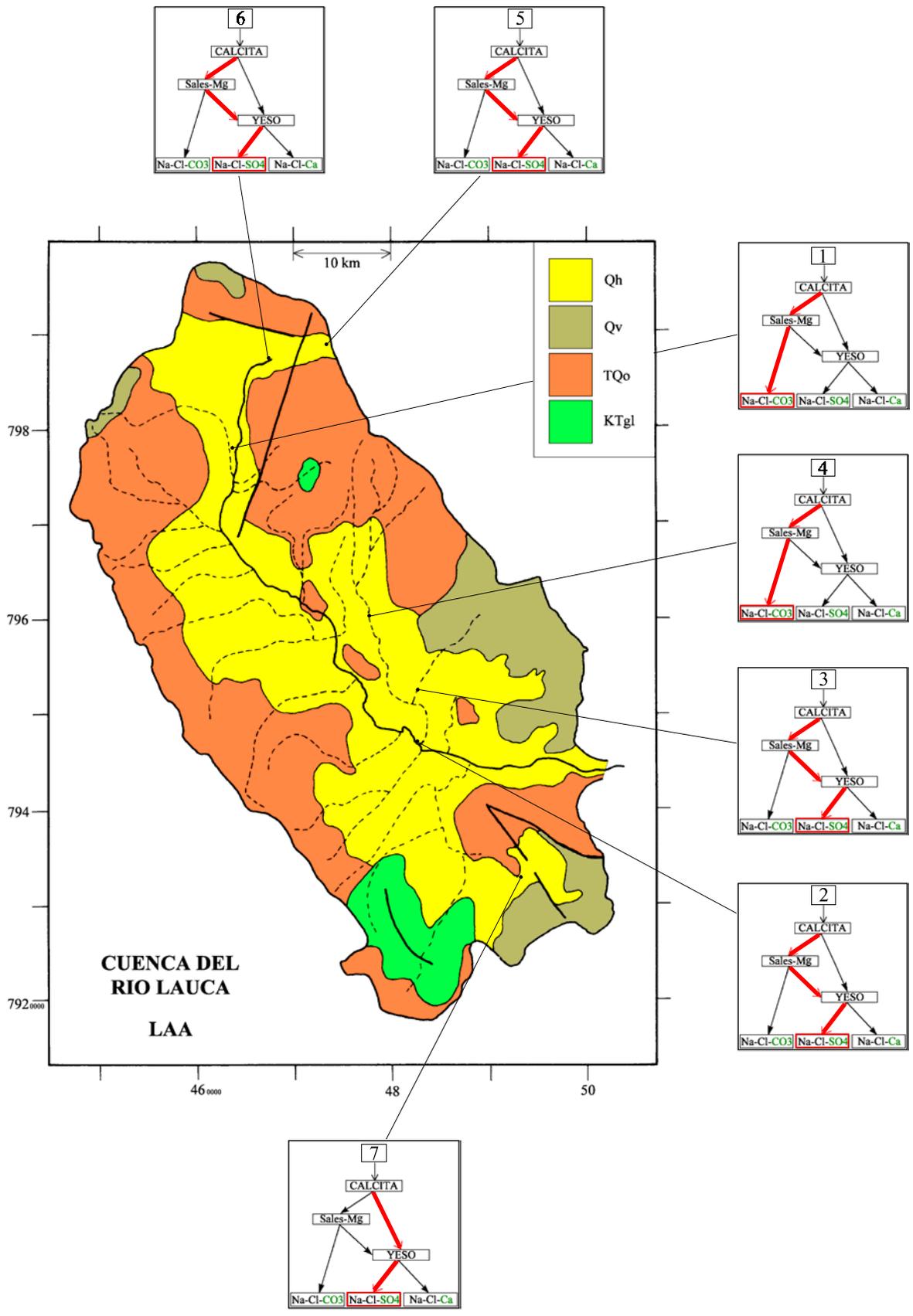
LAA

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.

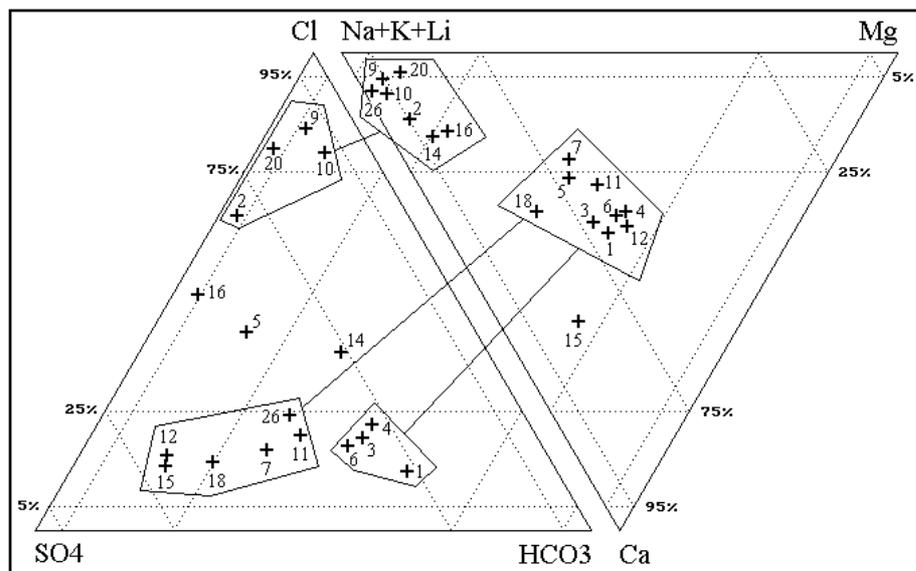


Fig.1: Composición de aguas y salmueras del salar de Surire.

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)	/ SO ₄ -HCO ₃ - (Cl)	CO ₃
SUR-1	122	Ca-Na-Mg	/ HCO ₃ -SO ₄ - (Cl)	SO ₄ (A)
SUR-14	140	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl-HCO ₃ -SO ₄	CO ₃
SUR-18	234	Na-Ca- (Mg)	/ SO ₄ - (HCO ₃) - (Cl)	SO ₄ (N)
SUR-7	322	Na-Mg- (Ca)	/ SO ₄ -HCO ₃ - (Cl)	SO ₄ (A)
SUR-15	327	Ca-Na- (Mg)	/ SO ₄ - (HCO ₃) - (Cl)	SO ₄ (N)
SUR-11	347	Na-Mg-Ca	/ SO ₄ -HCO ₃ - (Cl)	SO ₄ (A)
SUR-6	362	Ca-Na-Mg	/ HCO ₃ -SO ₄ - (Cl)	SO ₄ (A)
SUR-4	567	Mg-Ca-Na	/ HCO ₃ -SO ₄ - (Cl)	SO ₄ (A)
SUR-12	577	Ca-Mg-Na	/ SO ₄ - (HCO ₃) - (Cl)	SO ₄ (N)
SUR-16	869	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl-SO ₄	SO ₄ (N)
SUR-5	1092	Na-Mg-Ca	/ Cl-SO ₄ - (HCO ₃)	SO ₄ (N)
SUR-3	1302	Na-Ca-Mg	/ HCO ₃ -SO ₄ - (Cl)	SO ₄ (A)
SUR-10	1970	Na- (Ca)	/ Cl- (HCO ₃) - (SO ₄)	SO ₄ (D)
SUR-9	3002	Na- (Ca)	/ Cl- (SO ₄) - (HCO ₃)	SO ₄ (A)
SUR-2	4821	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl-SO ₄	SO ₄ (N)
SUR-20	17728	Na- (Mg)	/ Cl- (SO ₄)	SO ₄ (N)
<u>LAGUNAS</u>				
SUR-8	2006	Na- (Mg) - (Ca)	/ Cl-SO ₄ - (HCO ₃)	SO ₄
SUR-25	7306	Na- (Mg)	/ Cl- (SO ₄)	SO ₄
SUR-22	11906	Na-Ca	/ SO ₄ -Cl- (HCO ₃)	SO ₄
SUR-19	33527	Na	/ Cl- (SO ₄)	SO ₄
SUR-17	53850	Na- (Mg)	/ Cl-SO ₄	SO ₄
SUR-21	72925	Na- (Mg)	/ Cl- (SO ₄)	SO ₄
SUR-13	80994	Na- (Mg)	/ Cl- (SO ₄)	SO ₄
SUR-24	162044	Na	/ Cl- (SO ₄)	SO ₄
SUR-23	285000	Na- (Mg)	/ Cl- (SO ₄)	SO ₄

Tabla 1 : Salinidades, tipos químicos y vías evolutivas de aguas del salar de Surire.
CO₃ = vía carbonatada; SO₄ (D) = vía sulfatada directa (sin pasar por el yeso)
SO₄ (A) = vía alcalina sulfatada; SO₄ (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 / SO₄, Ca / HCO₃, Ca / SO₄, Mg / HCO₃. 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 HCO₃ (SUR-1, 3, 4, 6) y el otro más cerca del vértice SO₄

(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.

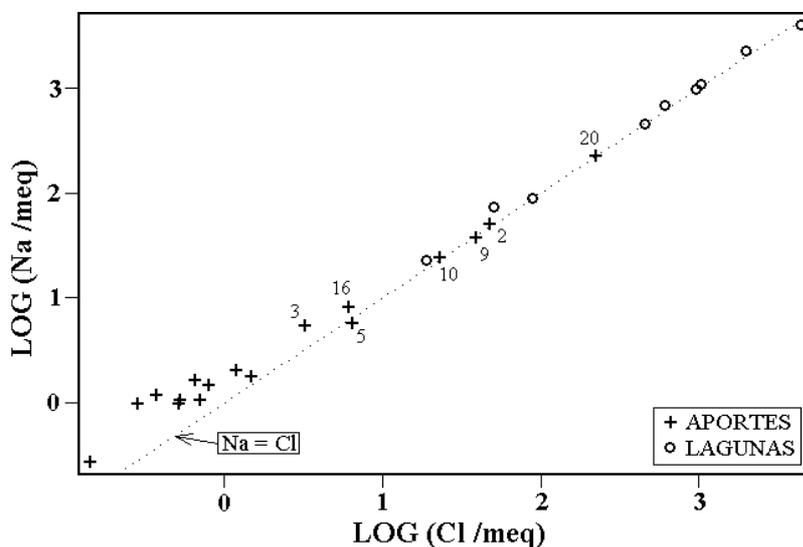


Fig. 2 : Relación entre Na y Cl en aguas y salmueras del salar de Surire.

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).

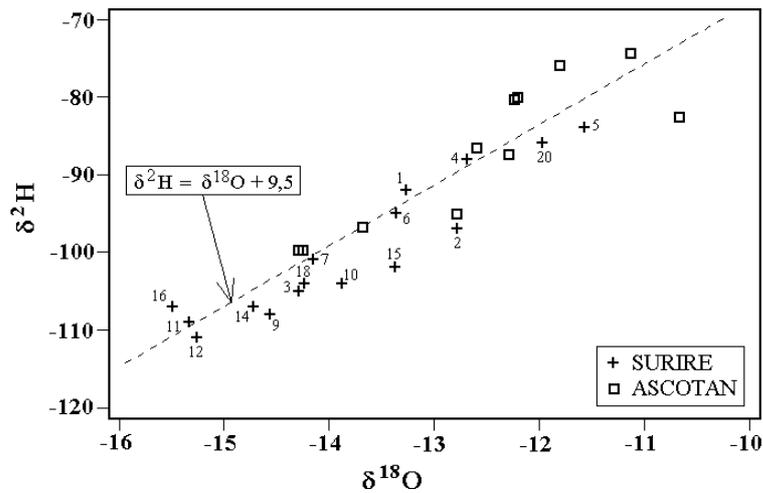


Fig. 3 : Relación entre $\delta^2\text{H}$ y $\delta^{18}\text{O}$ en aguas de aporte de los salares de Surire y Ascotan

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.

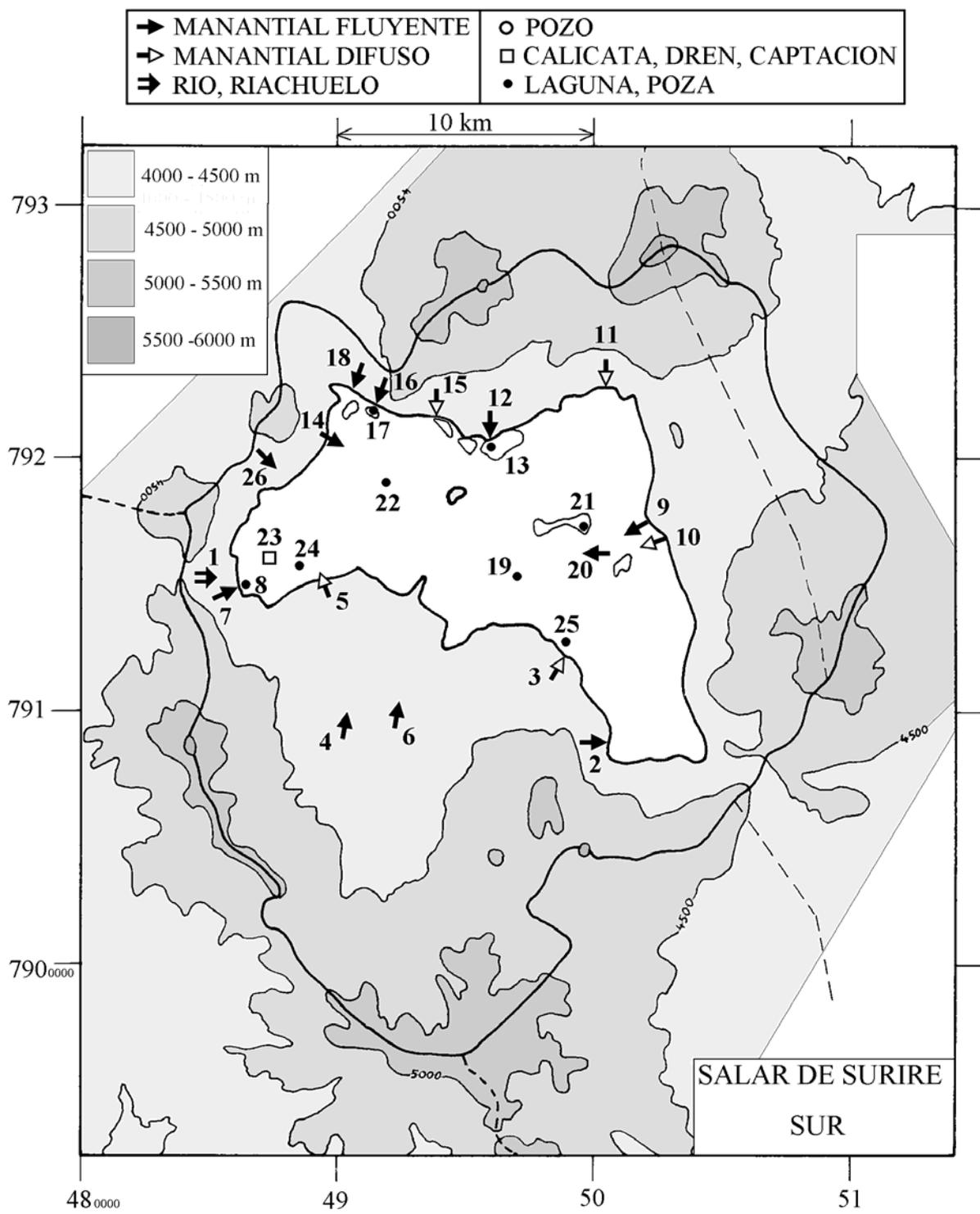
Salas, R. 1975. Estudio geológico del salar de Surire, Provincia de Arica, Chile. Instituto de Investigaciones Geológicas, Comisión Arica, Convenio IIG-JAA.

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.

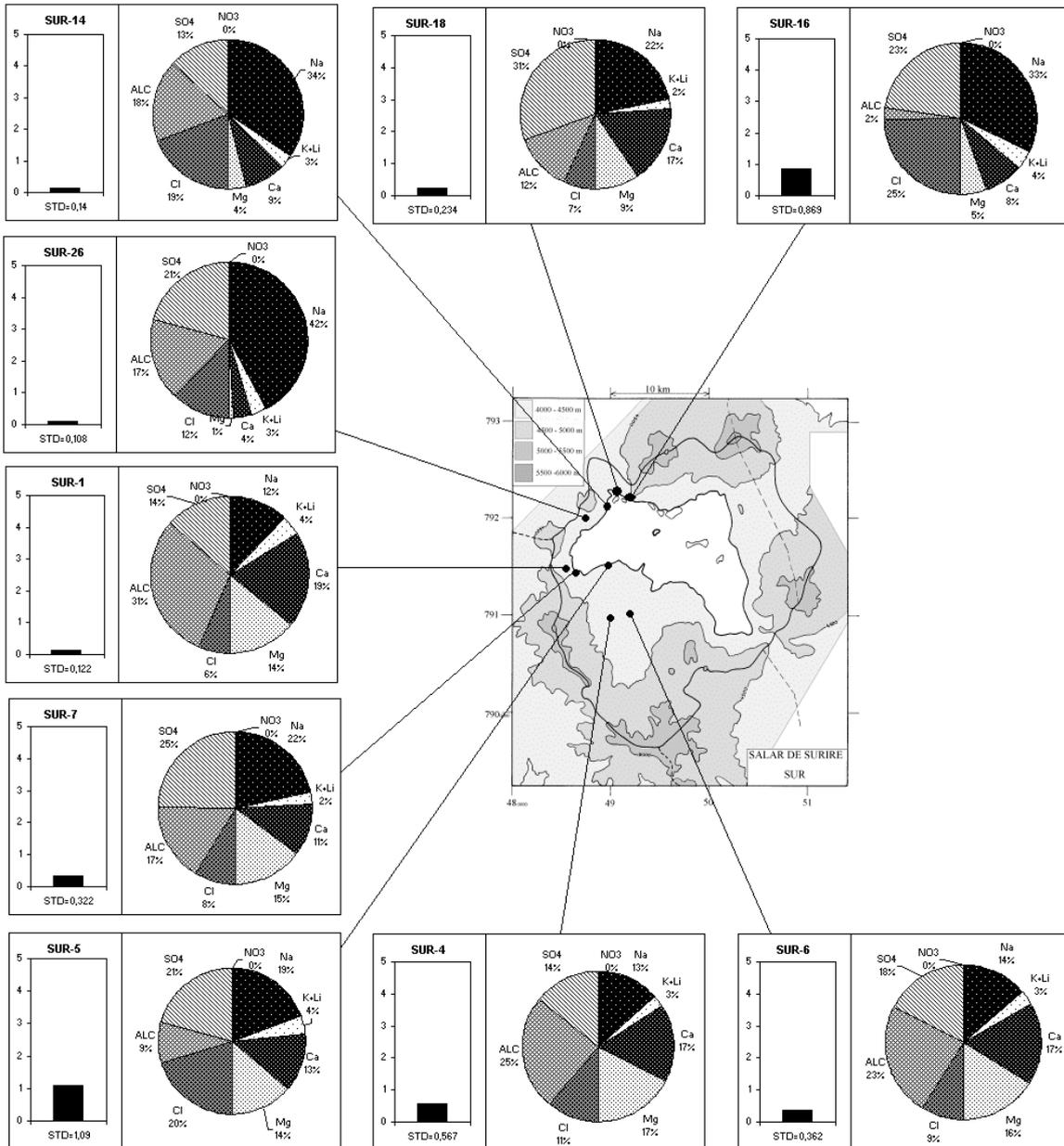
CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

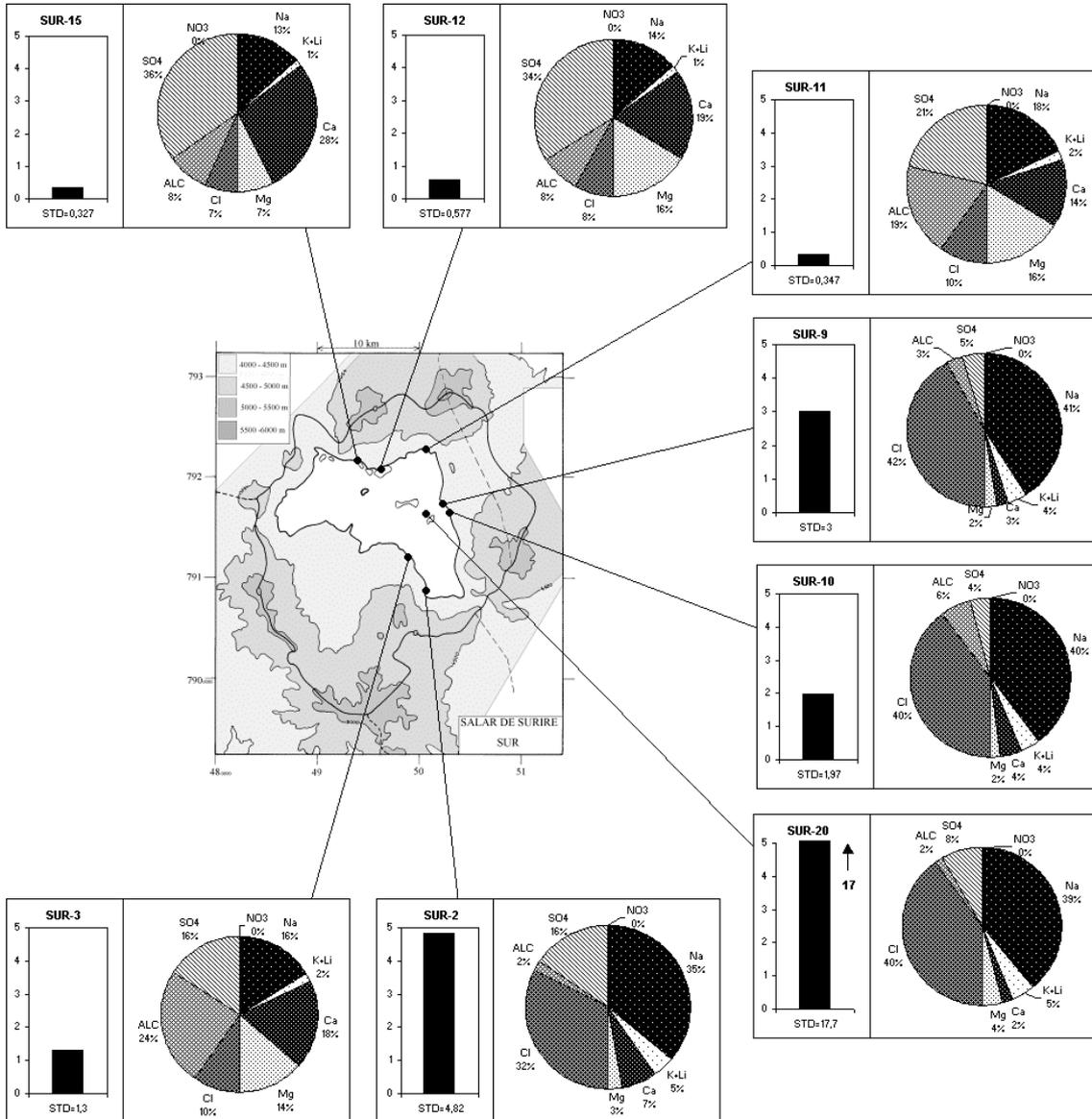
**SALAR DE SURIRE
SUR**

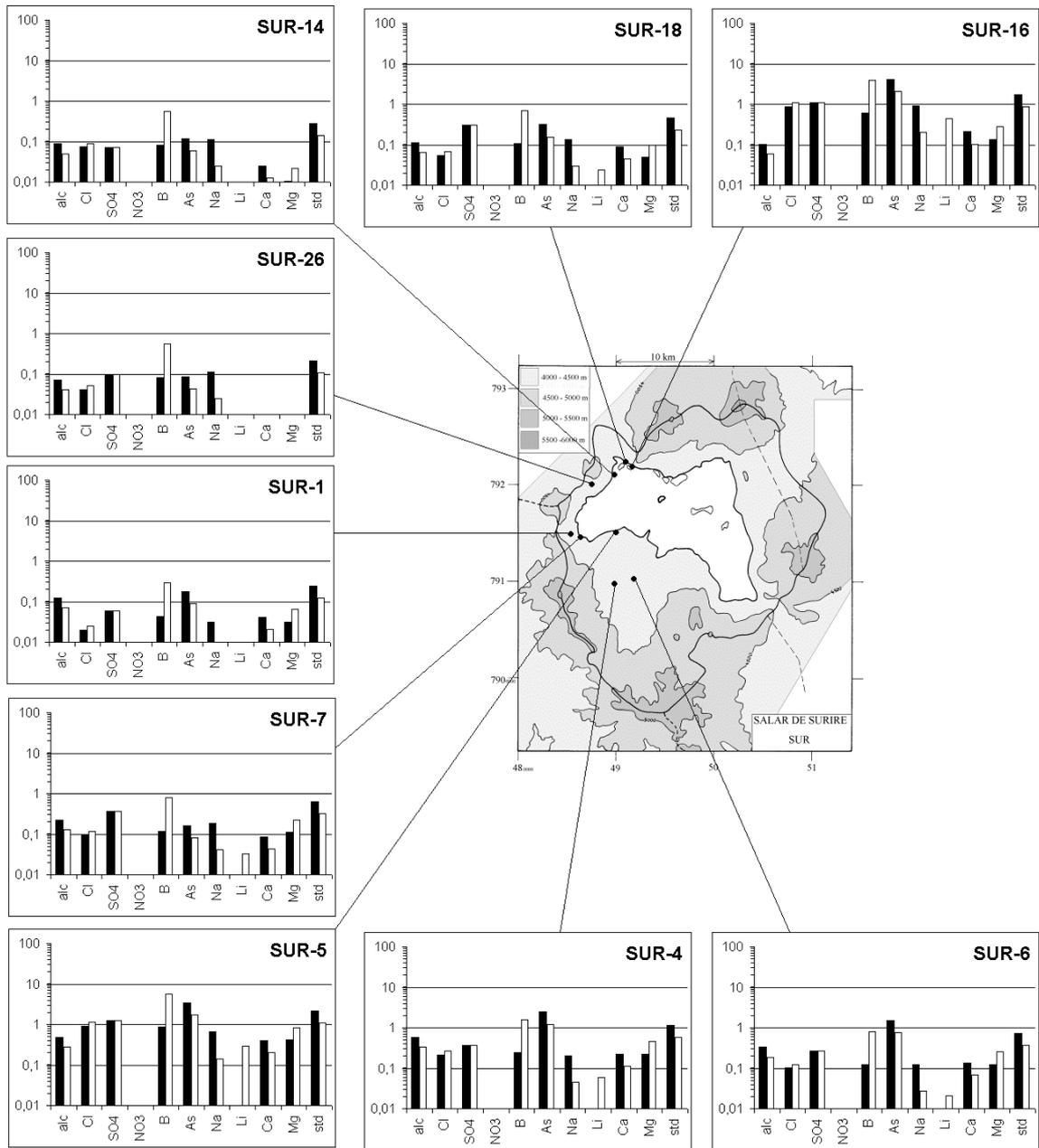
NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF. %	NUMERO	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
SUR-1	121,6	41,5	0,24	0,57	1,108	1,144	3,2	SUR-1	-13,26	-92
SUR-2	4821	159	0,06	140	71,01	72,91	2,6	SUR-2	-12,78	-97
SUR-3	1302	512	0,48	120	16,60	17,03	2,6	SUR-3	-14,29	-105
SUR-4	566,9	203	0,84	7,0	6,710	6,760	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

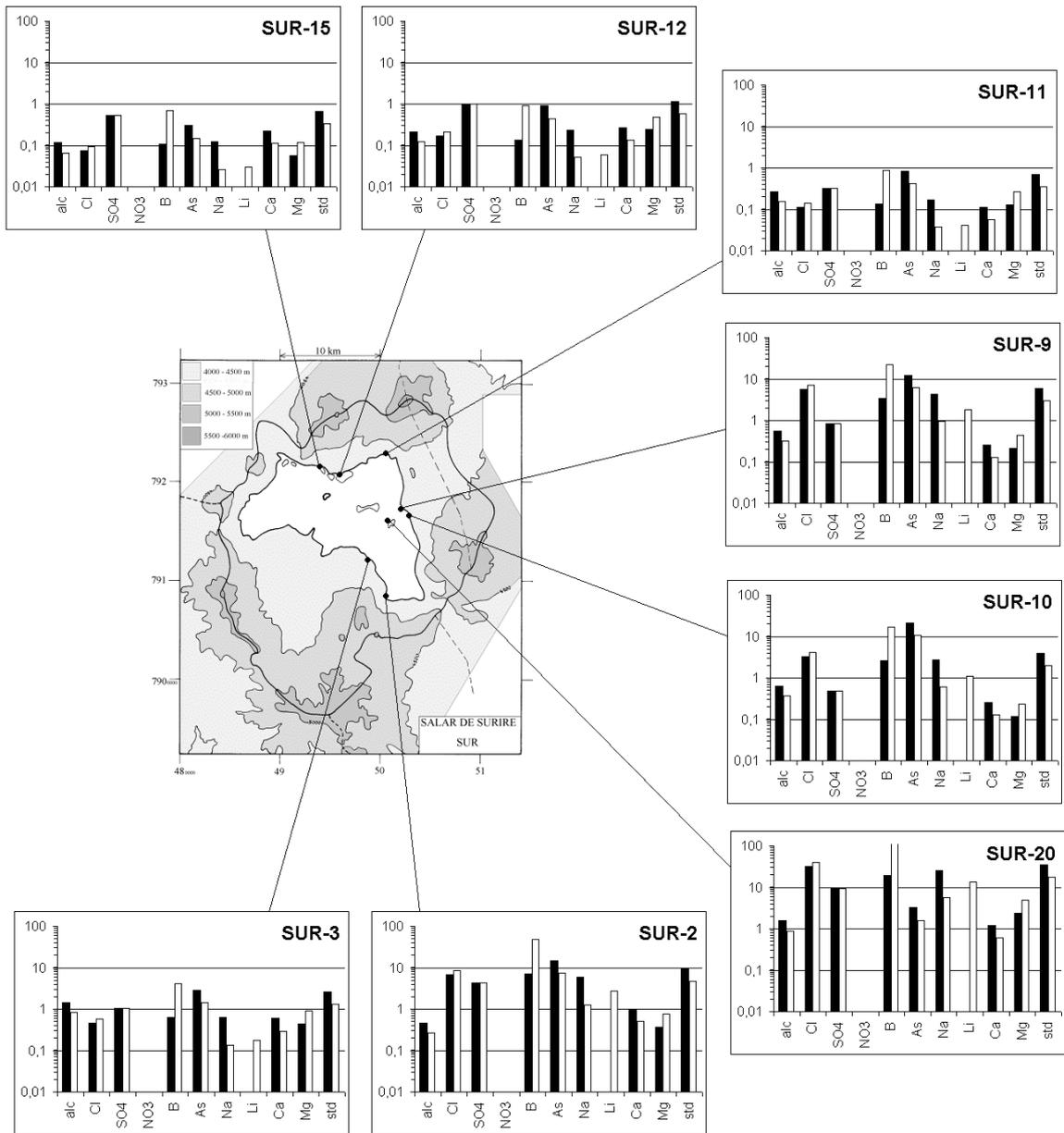
Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.
 S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l)
 DIF.% = diferencia en %

Análisis de oxígeno-18
 y deuterio









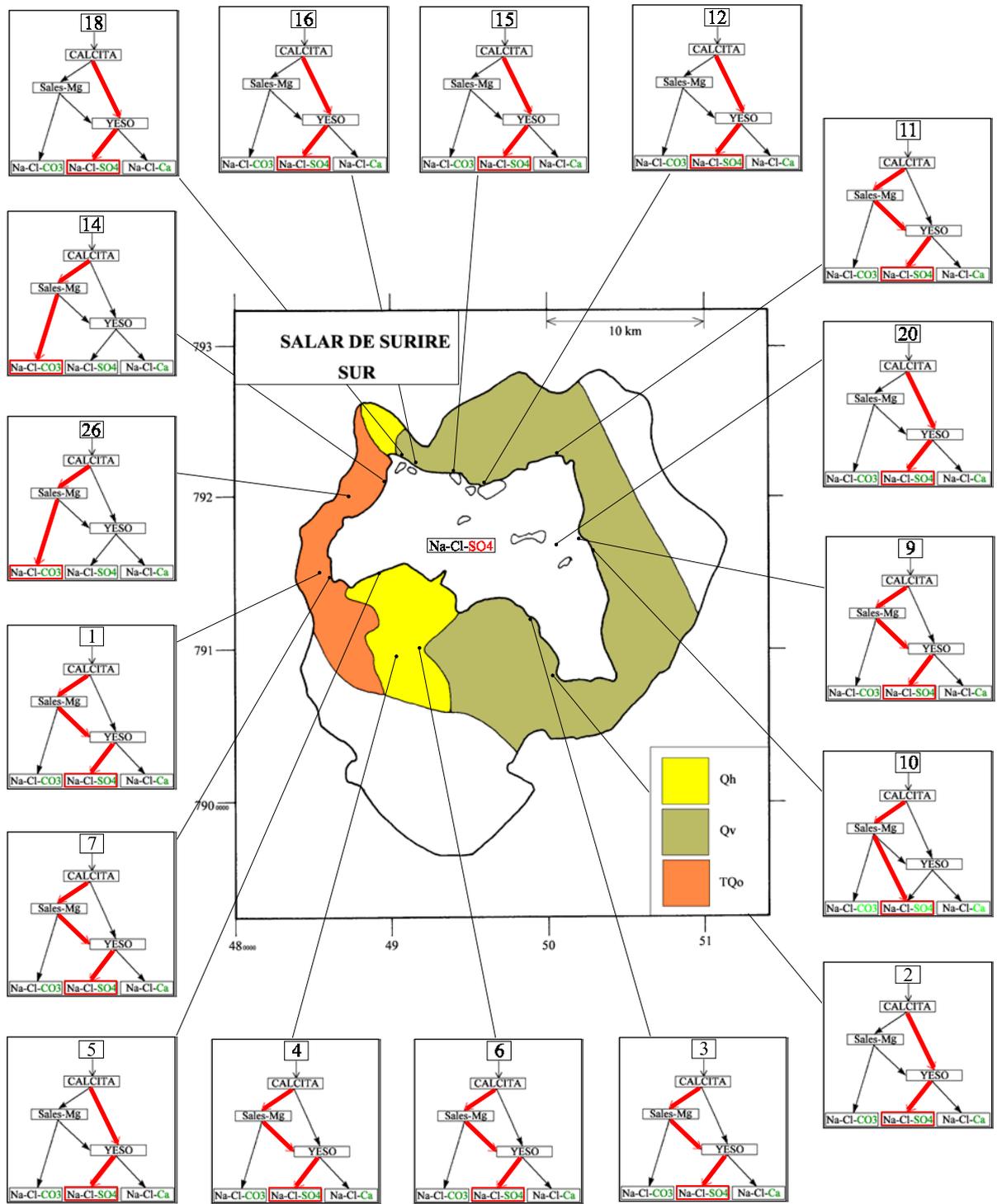
MAPA GEOLOGICO Y VIAS EVOLUTIVAS

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 rellenada 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.

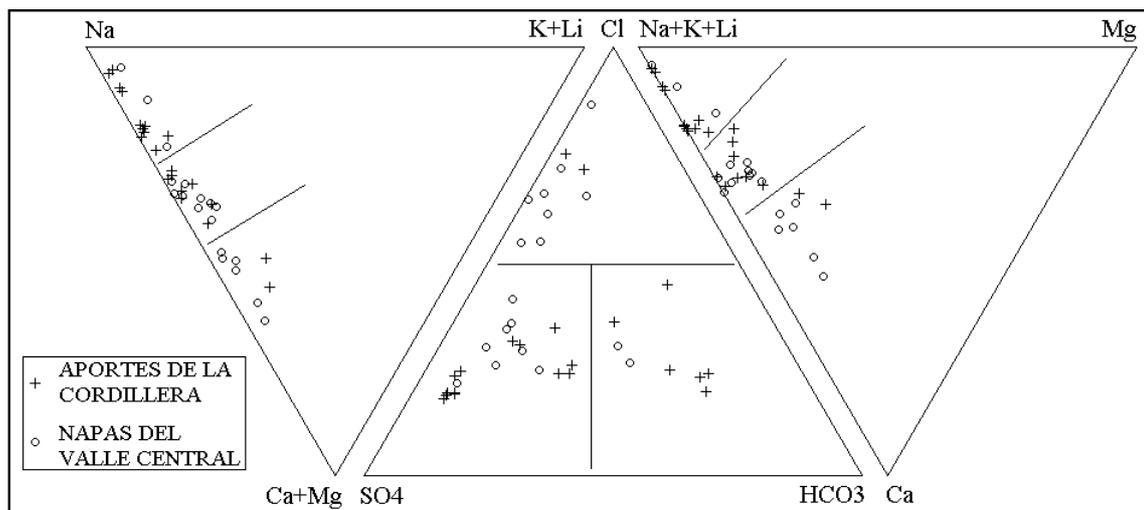


Fig. 1. Aguas de aporte al salar de Pintados en diagramas triangulares (meq/l).

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.

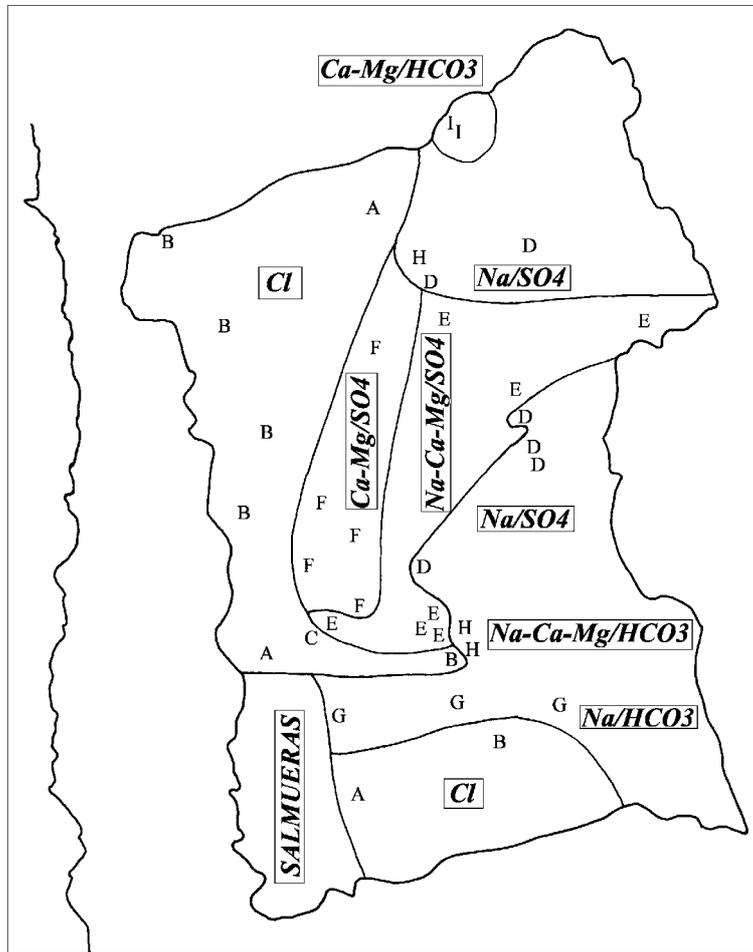


Fig.3 : Distribución geográfica de los varios tipos de agua en el salar de Pintados. La letras corresponden a los tipos químicos definidos en la figura 2.

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.

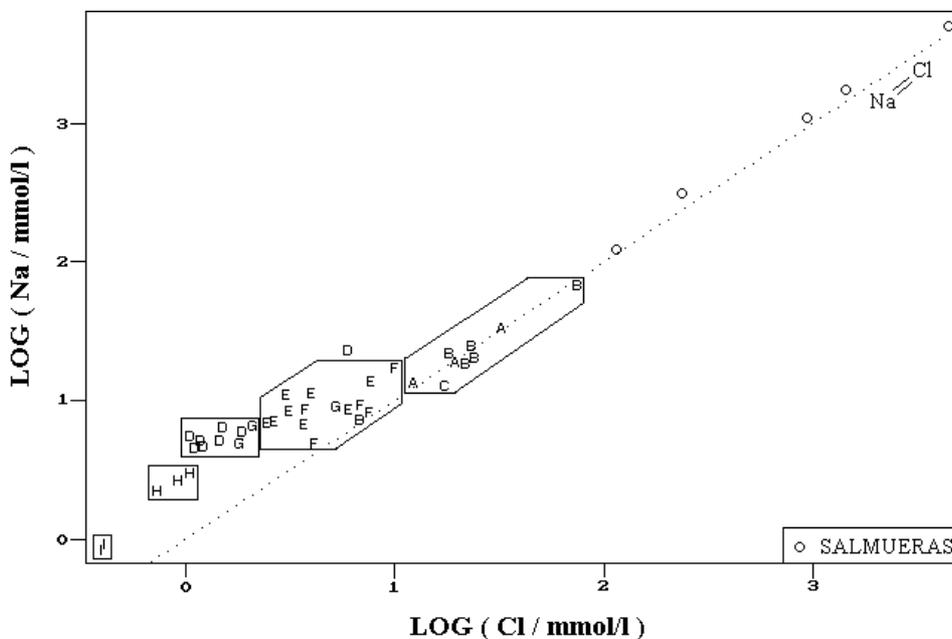


Fig. 4. Relación Na versus Cl en las aguas y salmueras de Pintados.

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.

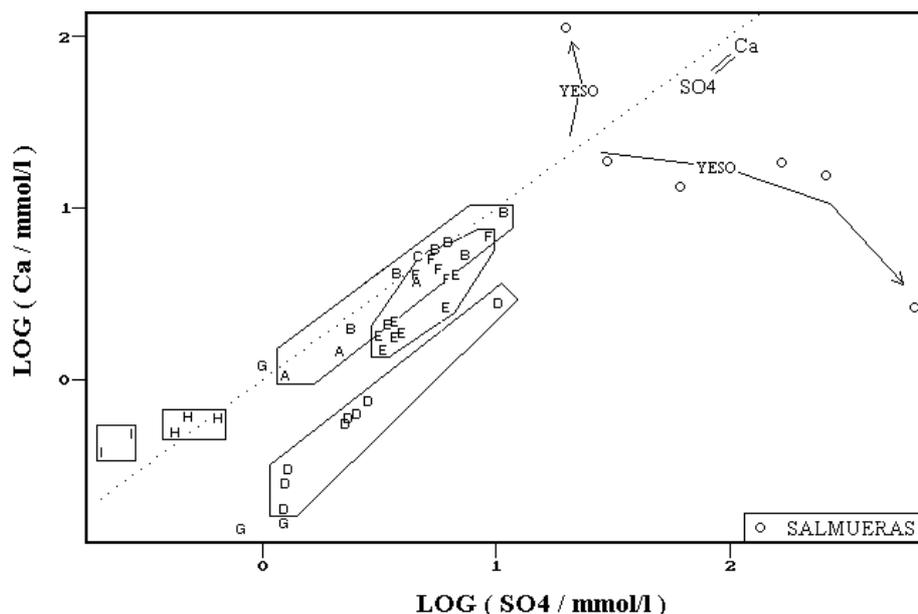


Fig. 5 . Relación Ca versus SO_4 en las aguas y salmueras de Pintados.

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).

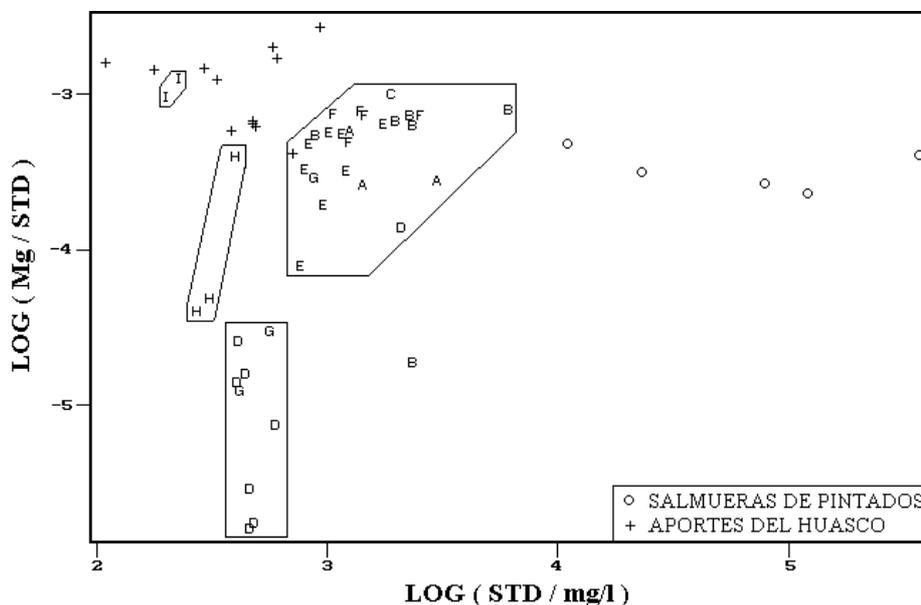


Fig.6 Concentraciones de Mg relativas a la salinidad total.

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.

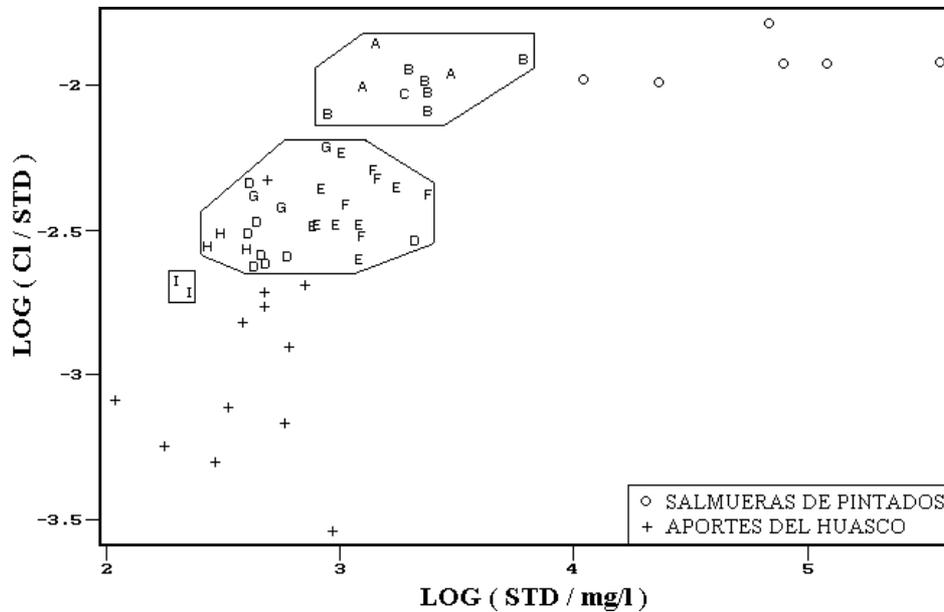


Fig.7 Concentraciones de Cl relativas a la salinidad total.

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 mega-grupo 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.

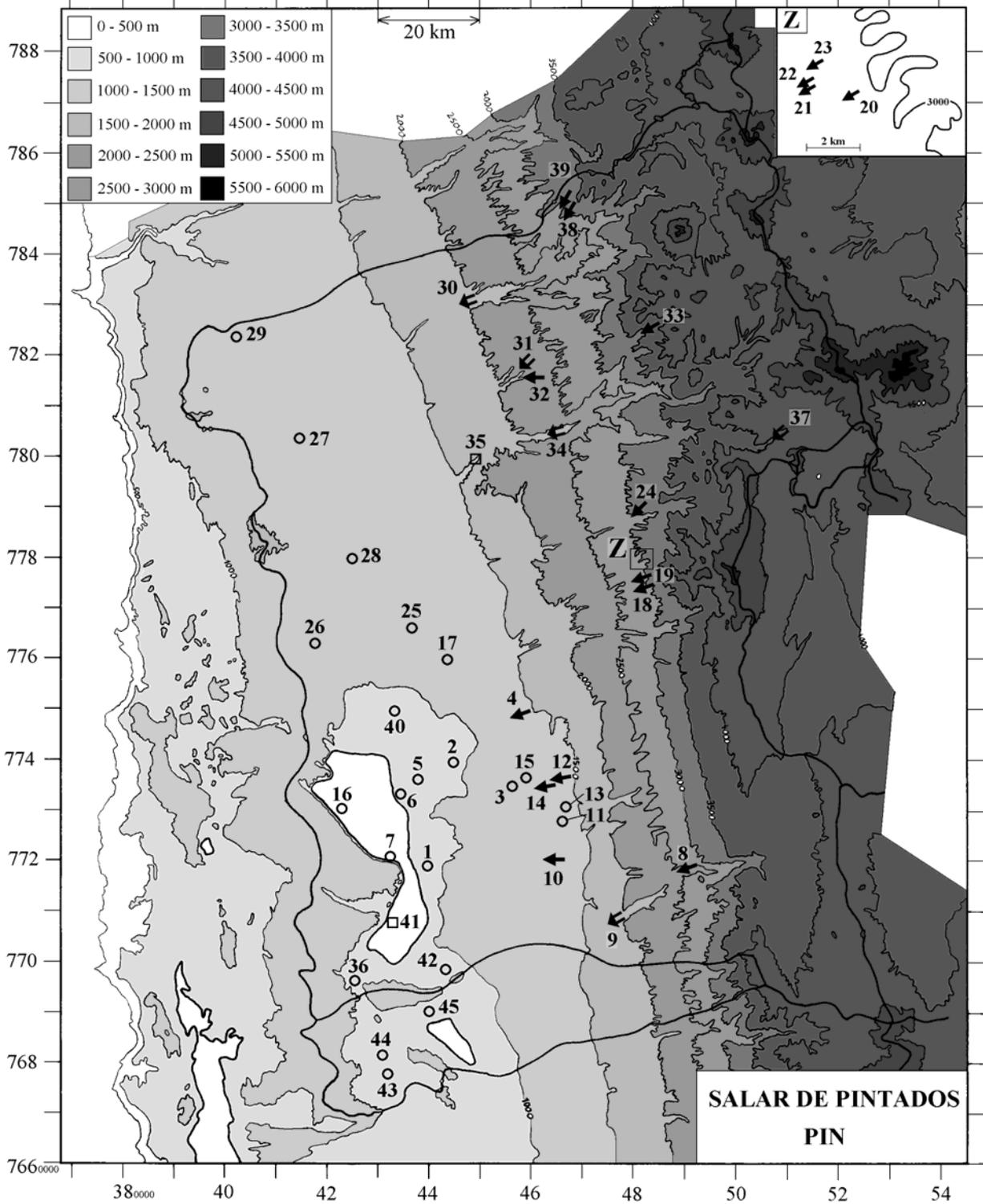
Fritz, P.; Silva, C.; Suzuki, O.; Salati, E. 1979. Isotope Hydrology in Northern Chile. Isotope Hydrology 1978, IAEA-SM-228/26, vol.II, 525-544.

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.

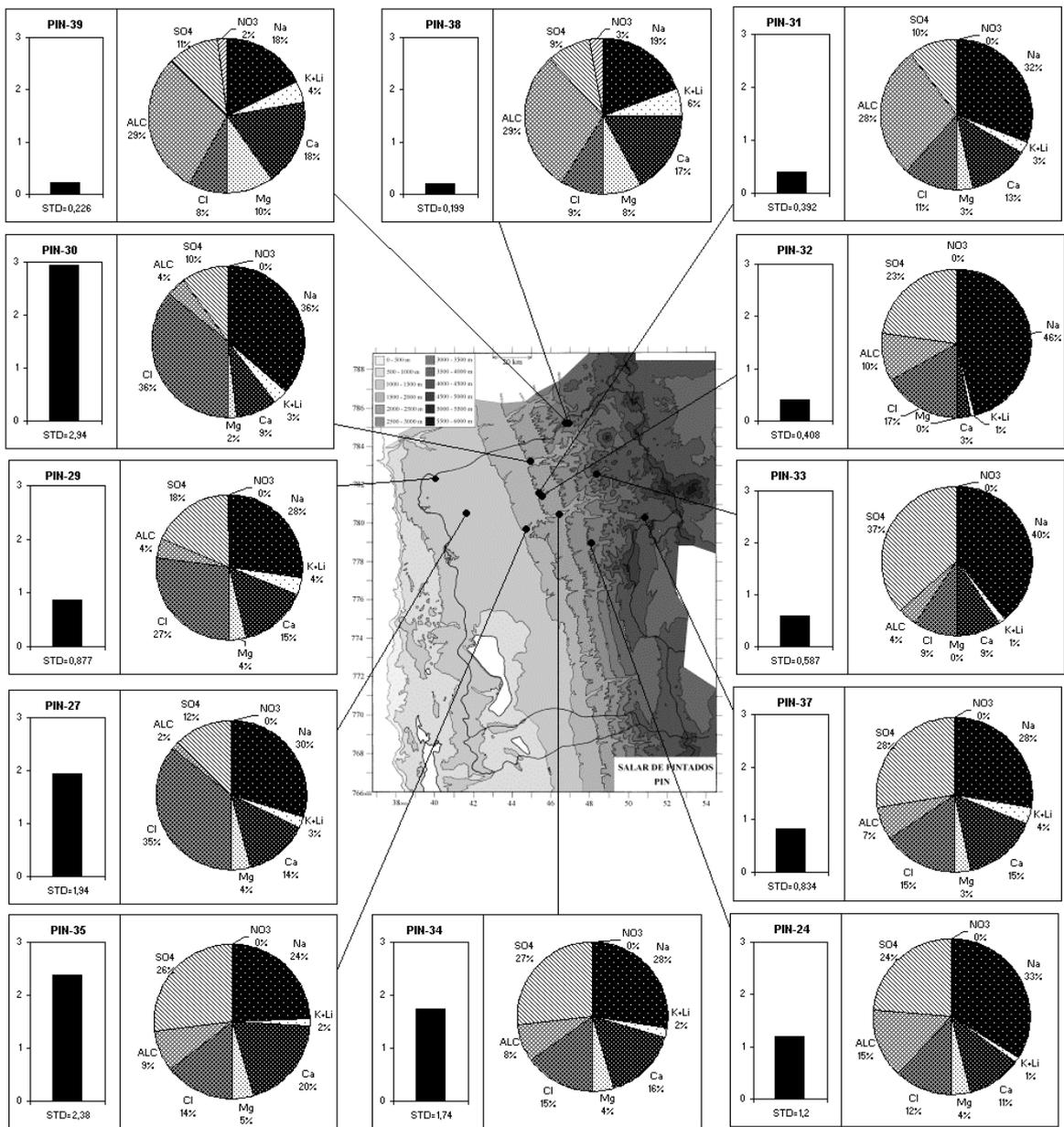
SALAR DE PINTADOS

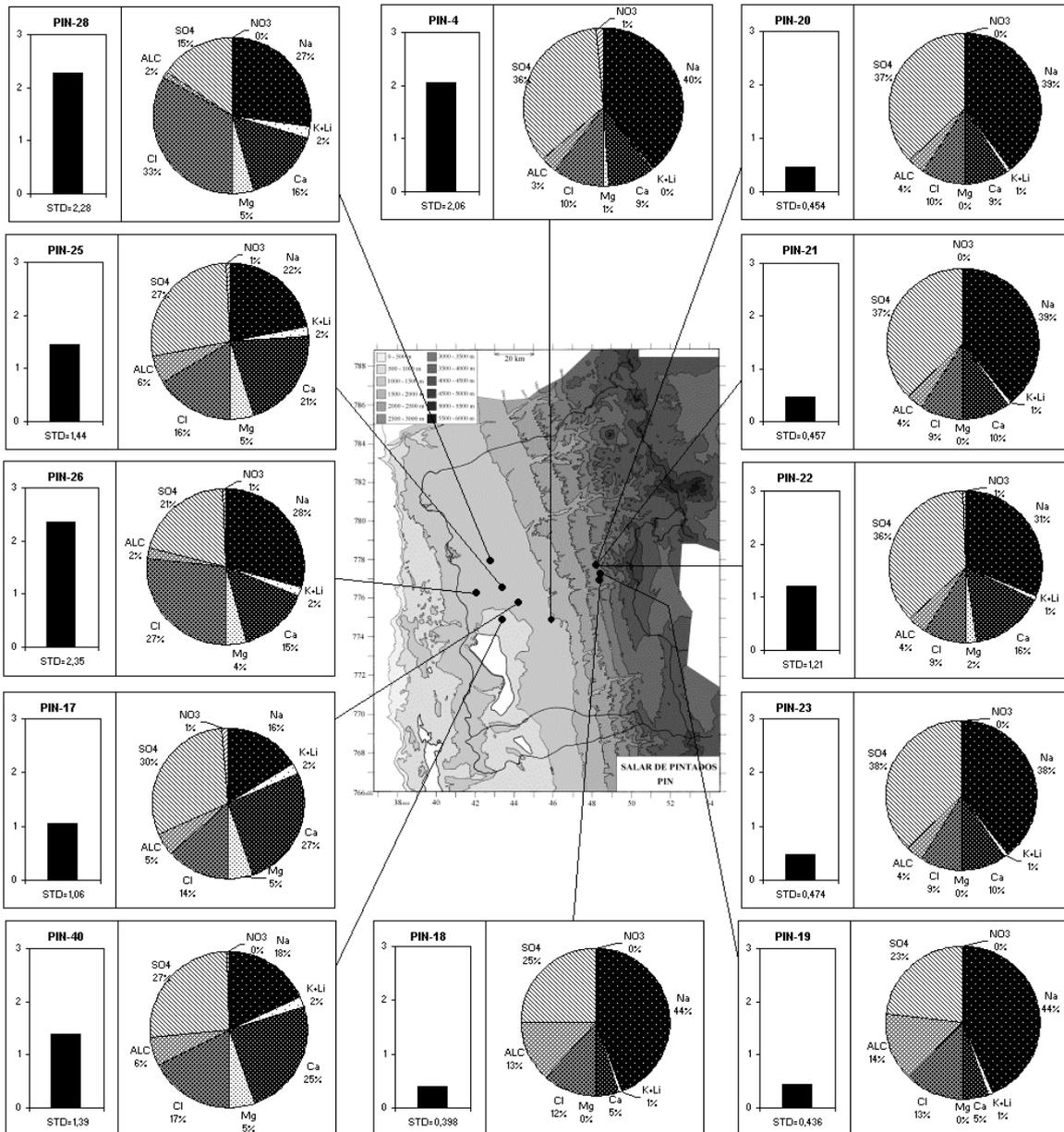
PIN

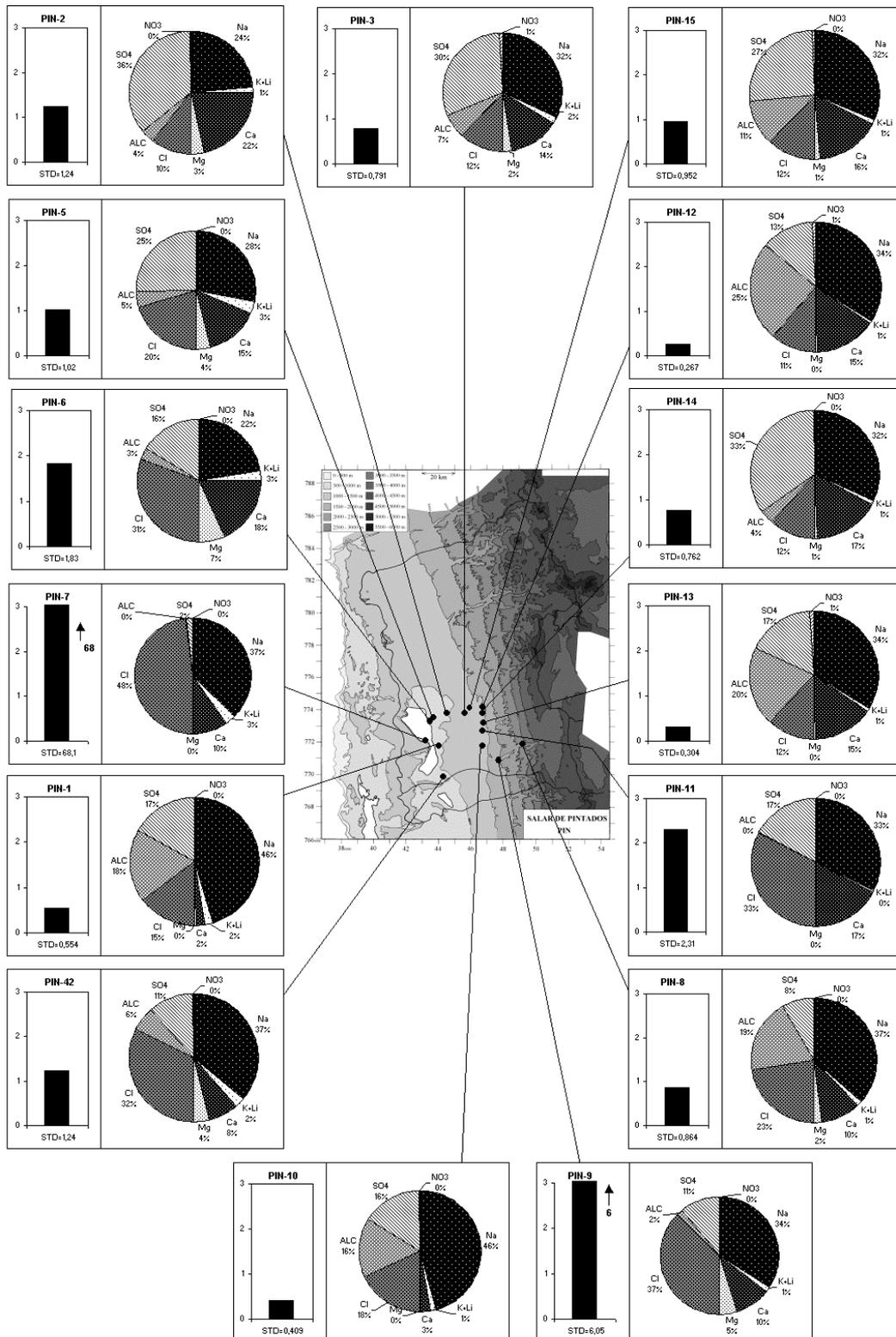
NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF. %	NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF. %
PIN-1	554,2	147	1,44	1,45	7,201	7,010	2,7	PIN-23	473,5	2,62	0,30	0,004	6,436	6,371	1,0
PIN-2	1235	80,5	0,66	2,38	17,94	17,48	2,6	PIN-24	1202	286	4,98	2,42	16,81	16,69	0,7
PIN-3	791,2	81,1	2,34	0,43	10,97	10,88	0,9	PIN-25	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

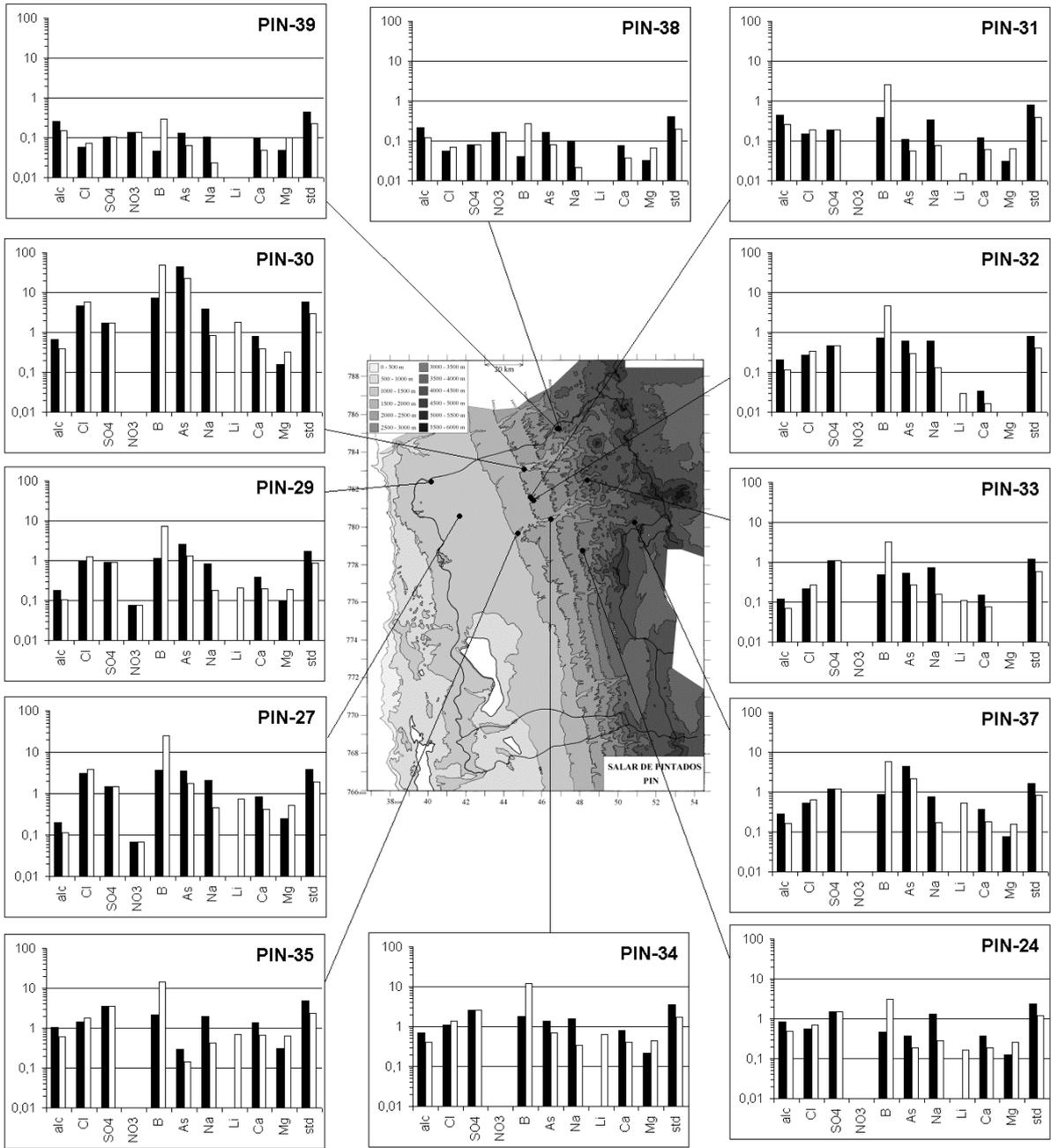
Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.

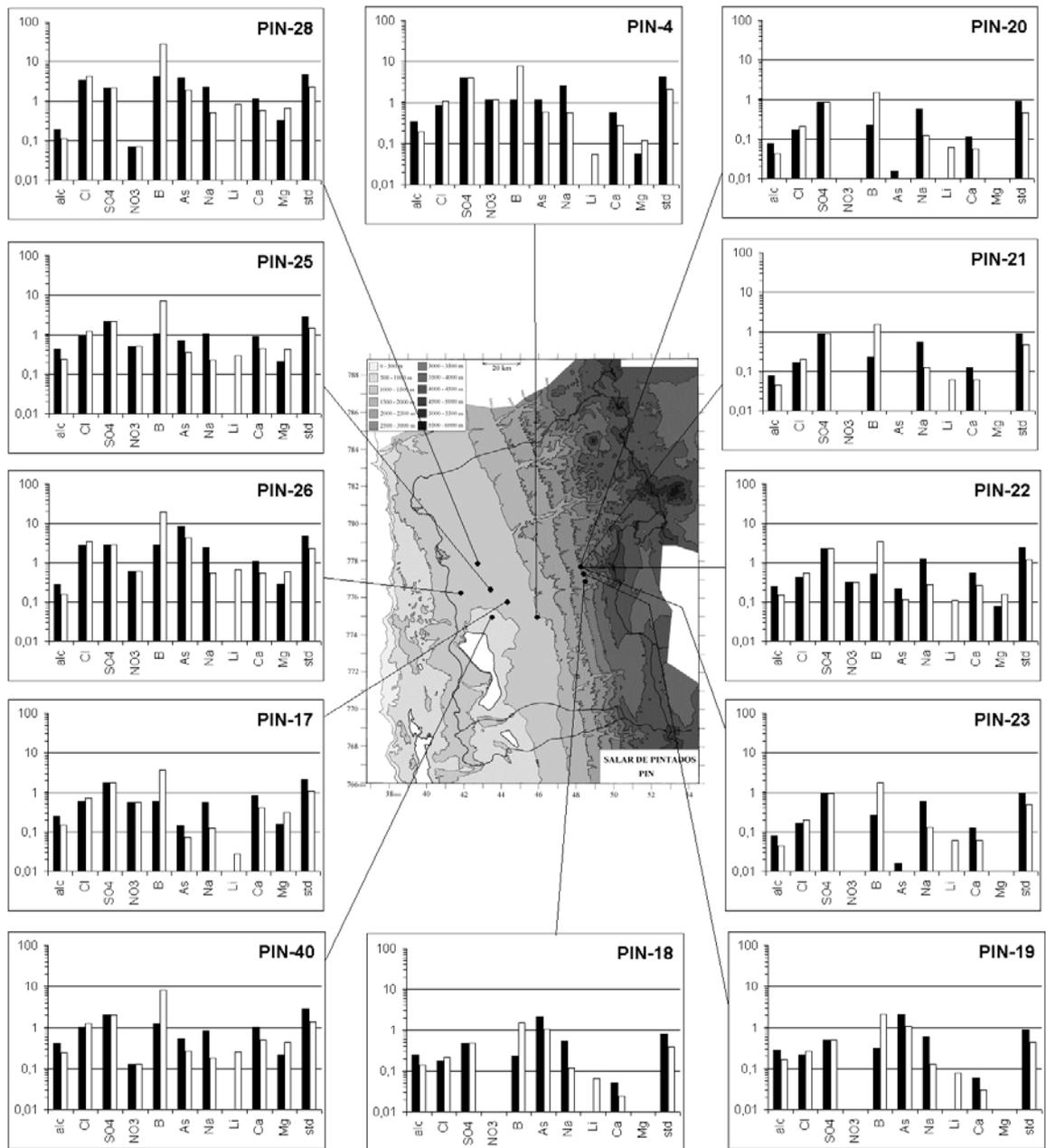
S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l); DIF.% = diferencia en %

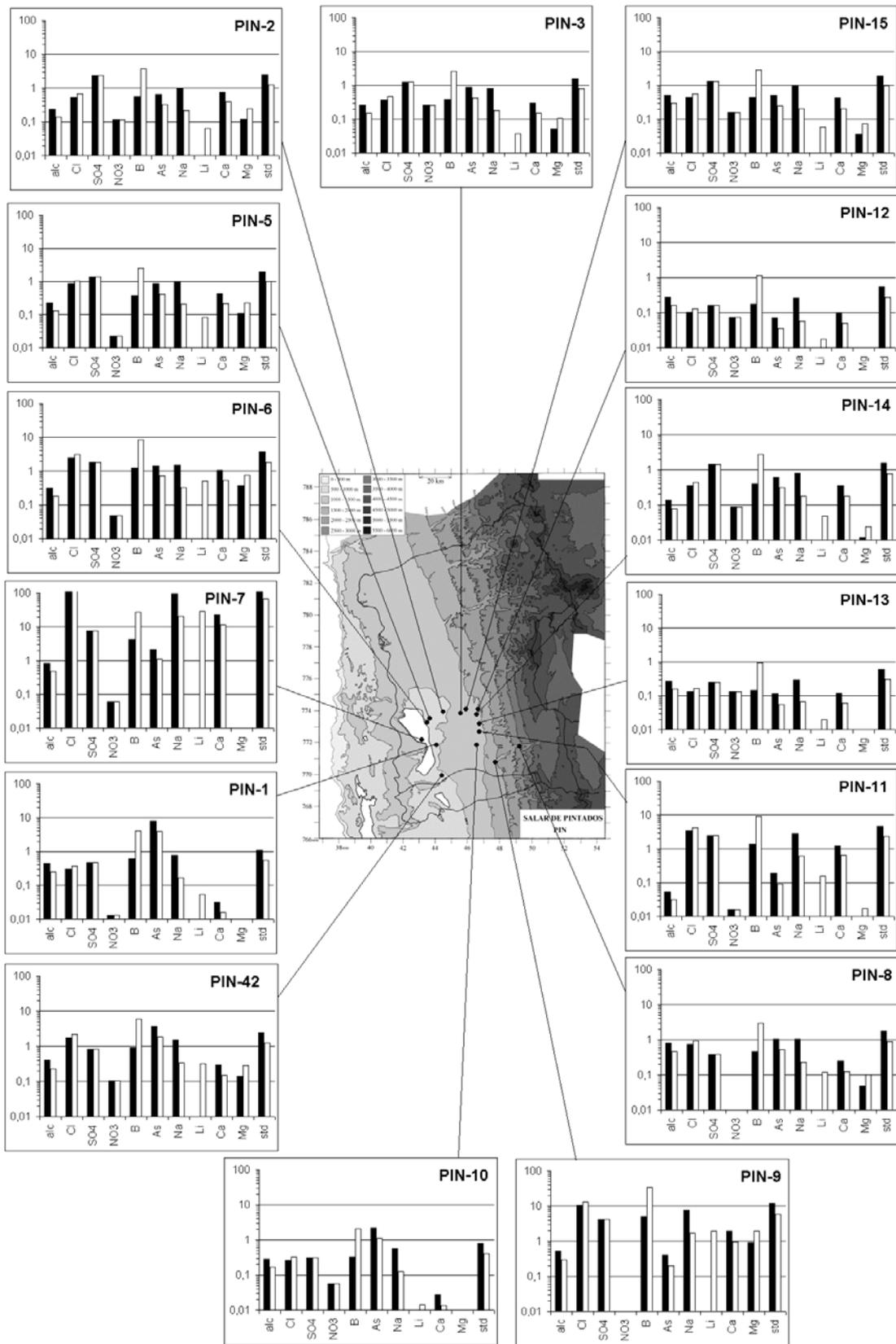








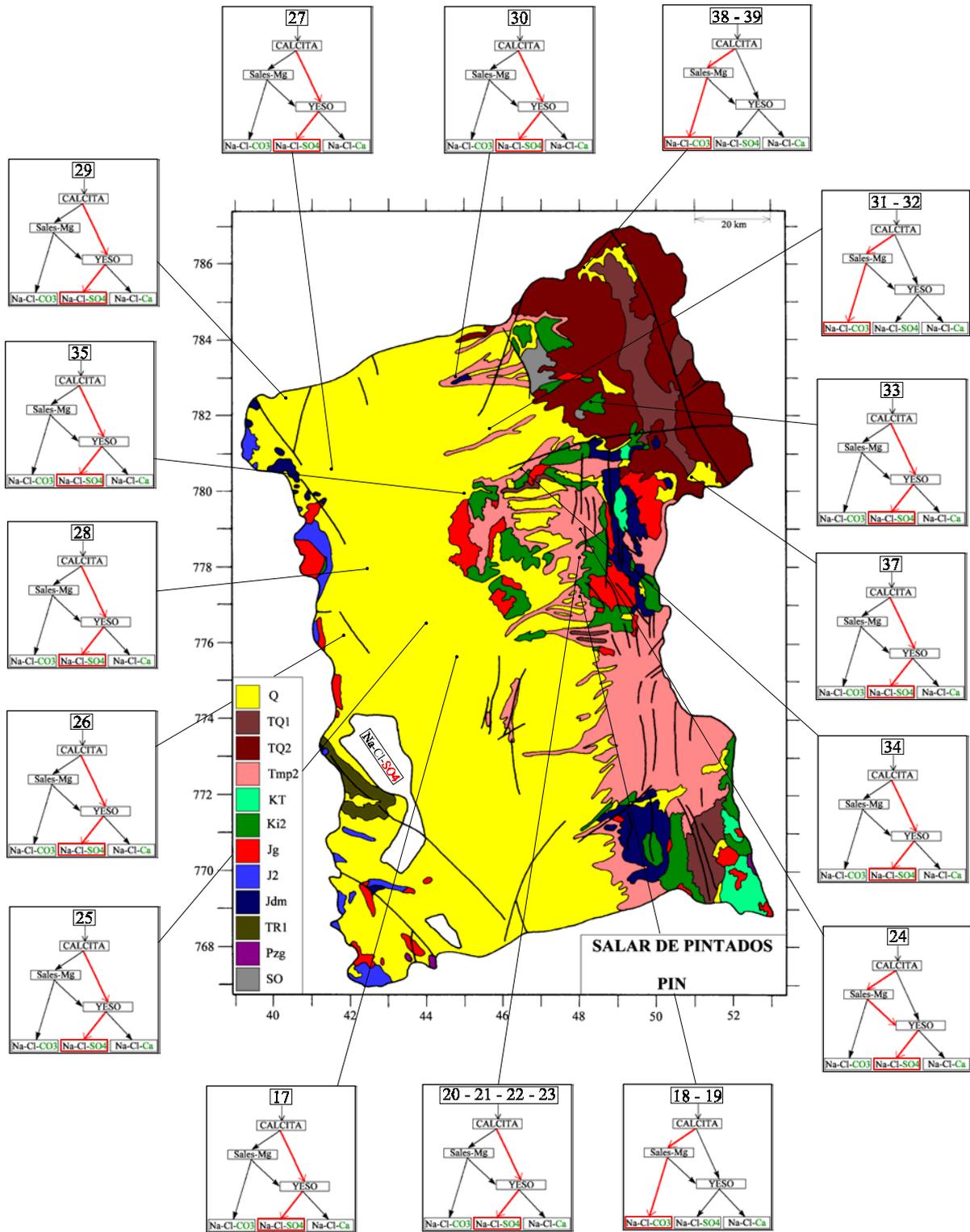


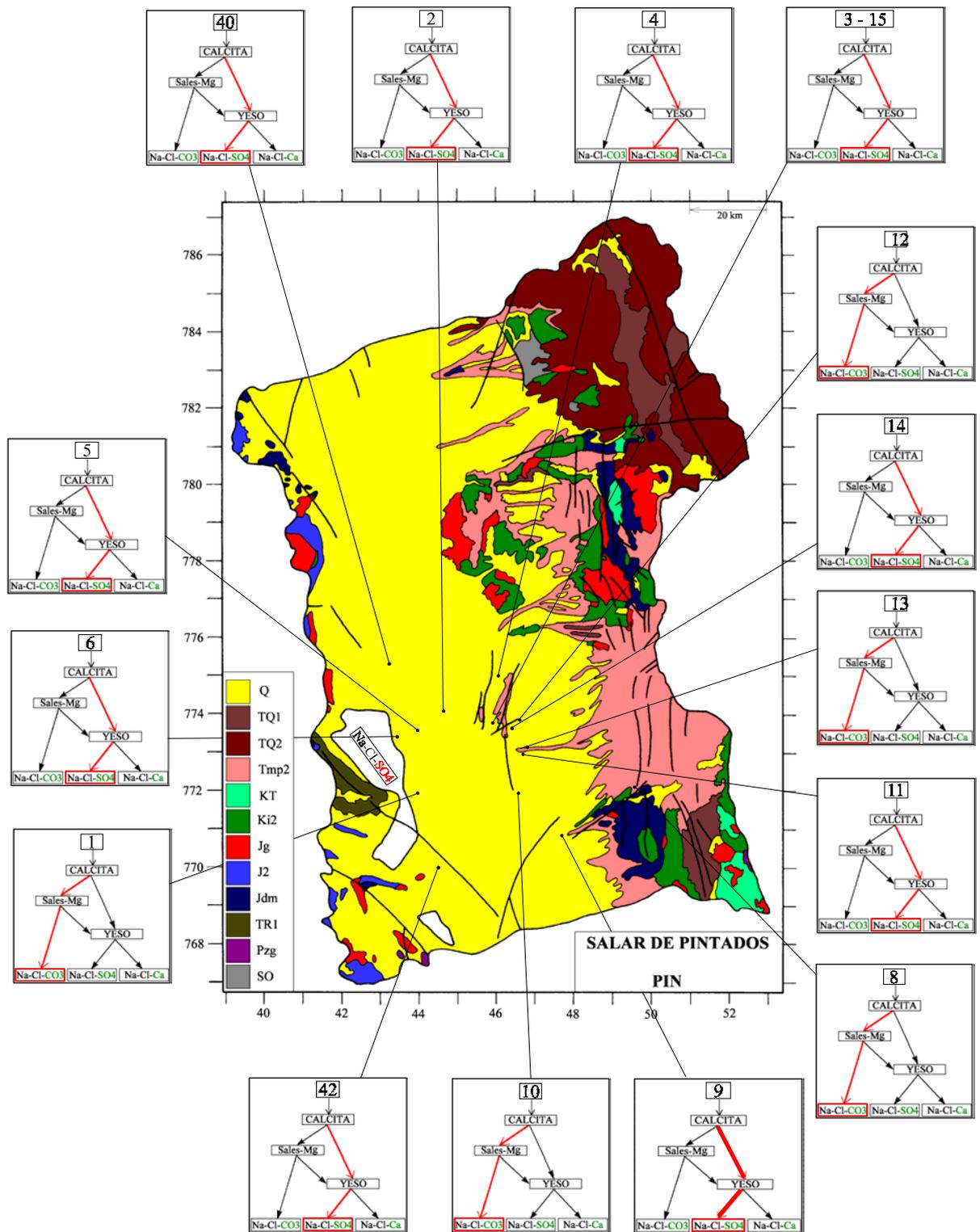


MAPA GEOLOGICO Y VIAS EVOLUTIVAS

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.

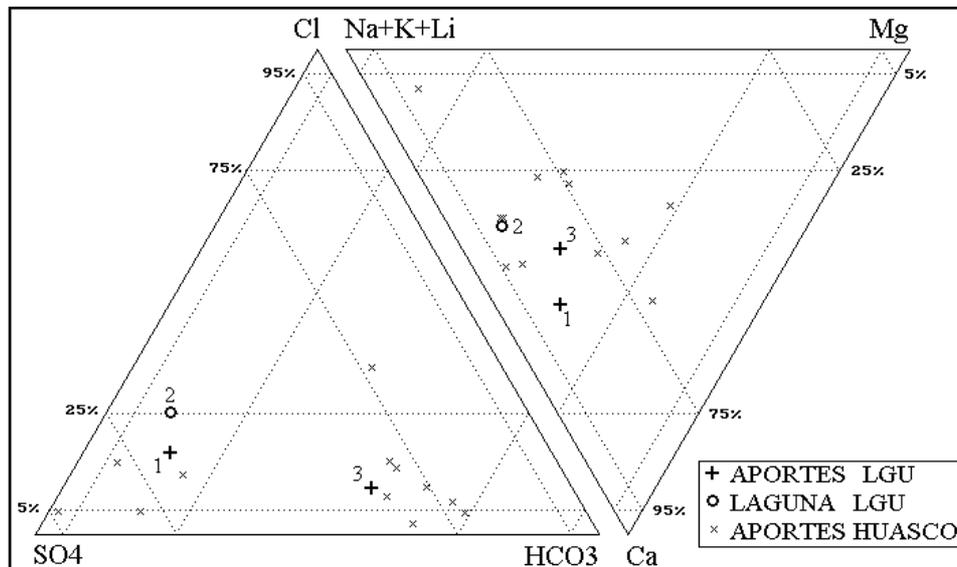


Fig.1 : Composición química de las aguas de Lagunilla y de los aportes al salar del Huasco.

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

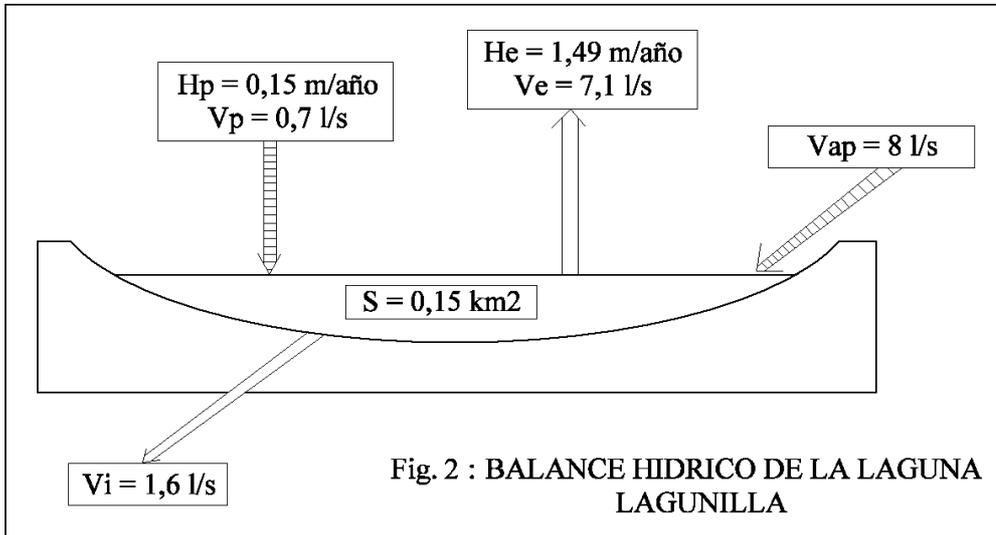
Para estimar las infiltraciones, tenemos una imprecisión debida al aporte oculto. Se utiliza el cloruro como elemento conservativo. Los parámetros considerados son :

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

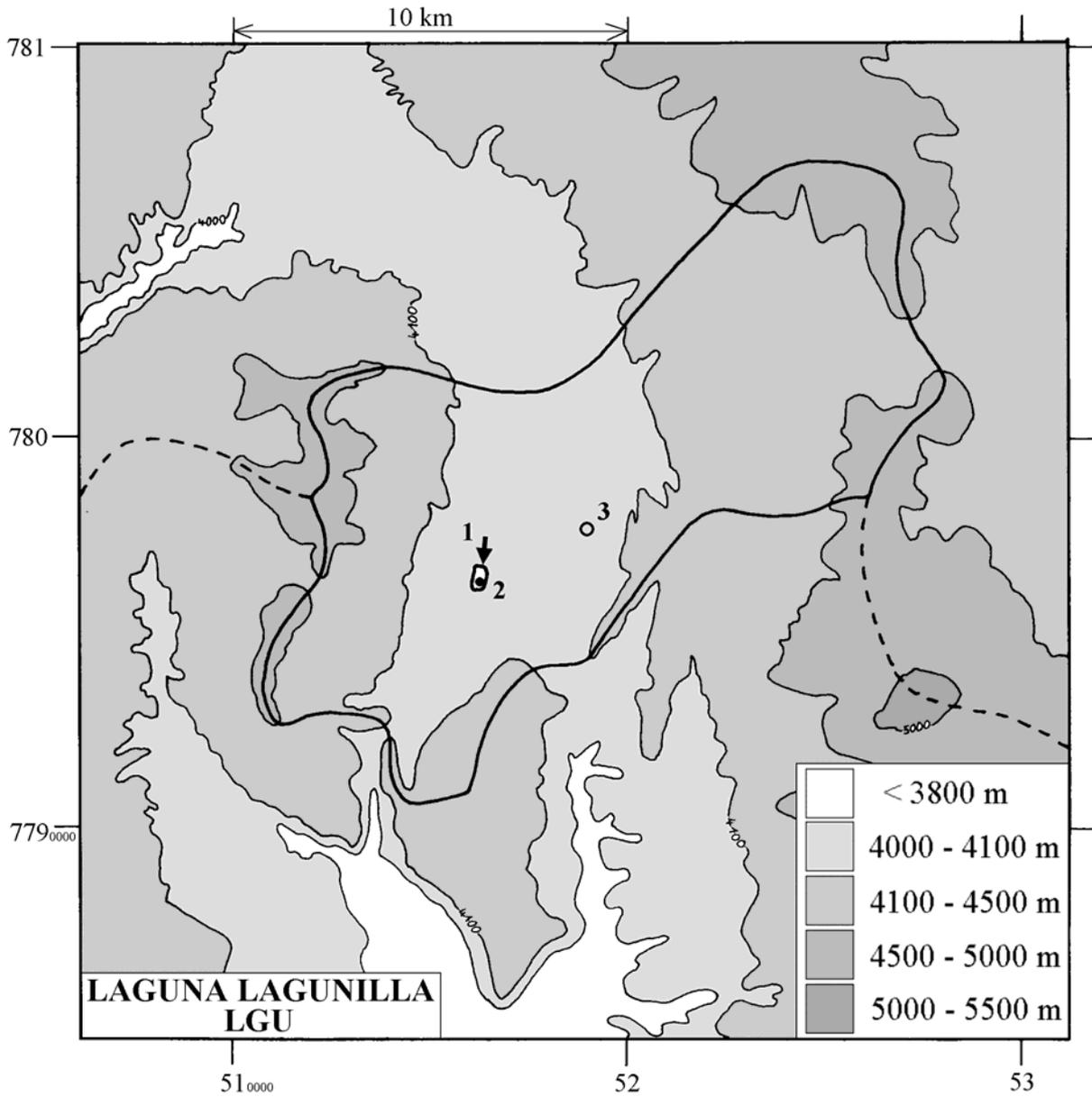
Volumen de infiltraciones : $V_i = S(H_c - H_p)/(1 - C_L/C_{ap}) = 50\,300 \text{ m}^3/\text{año} = 1,6 \text{ l/s}$



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

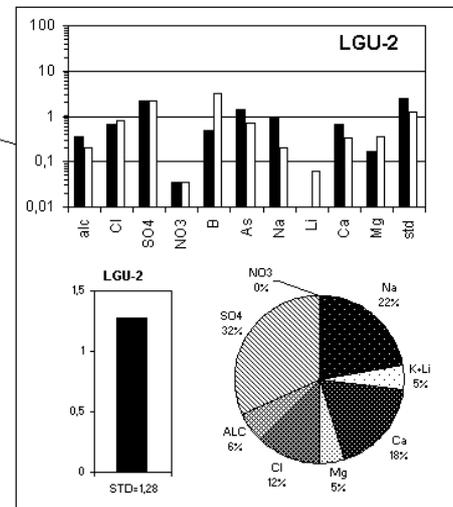
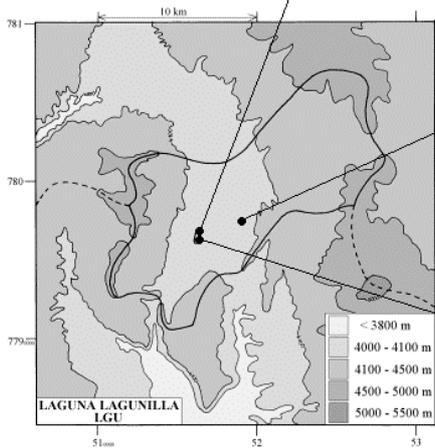
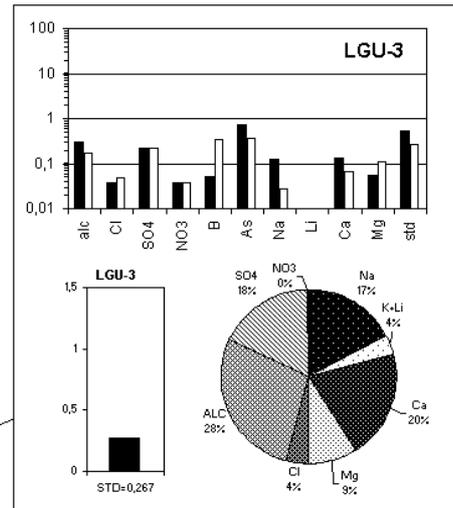
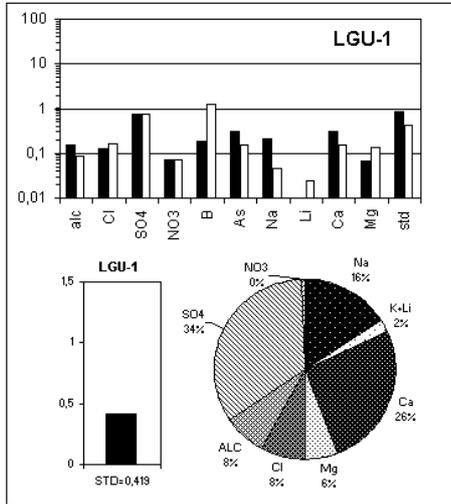
NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
LGU-1	07/09/96	13 ^H 35	516116	7796731	4070	Manantial corriente
LGU-2	07/09/96	13 ^H 55	516414	7796115	4070	Laguna
LGU-3	10/09/96	12 ^H 25	518592	7797261	4080	Napa (pozo 3 Cerro Colorado)

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 %



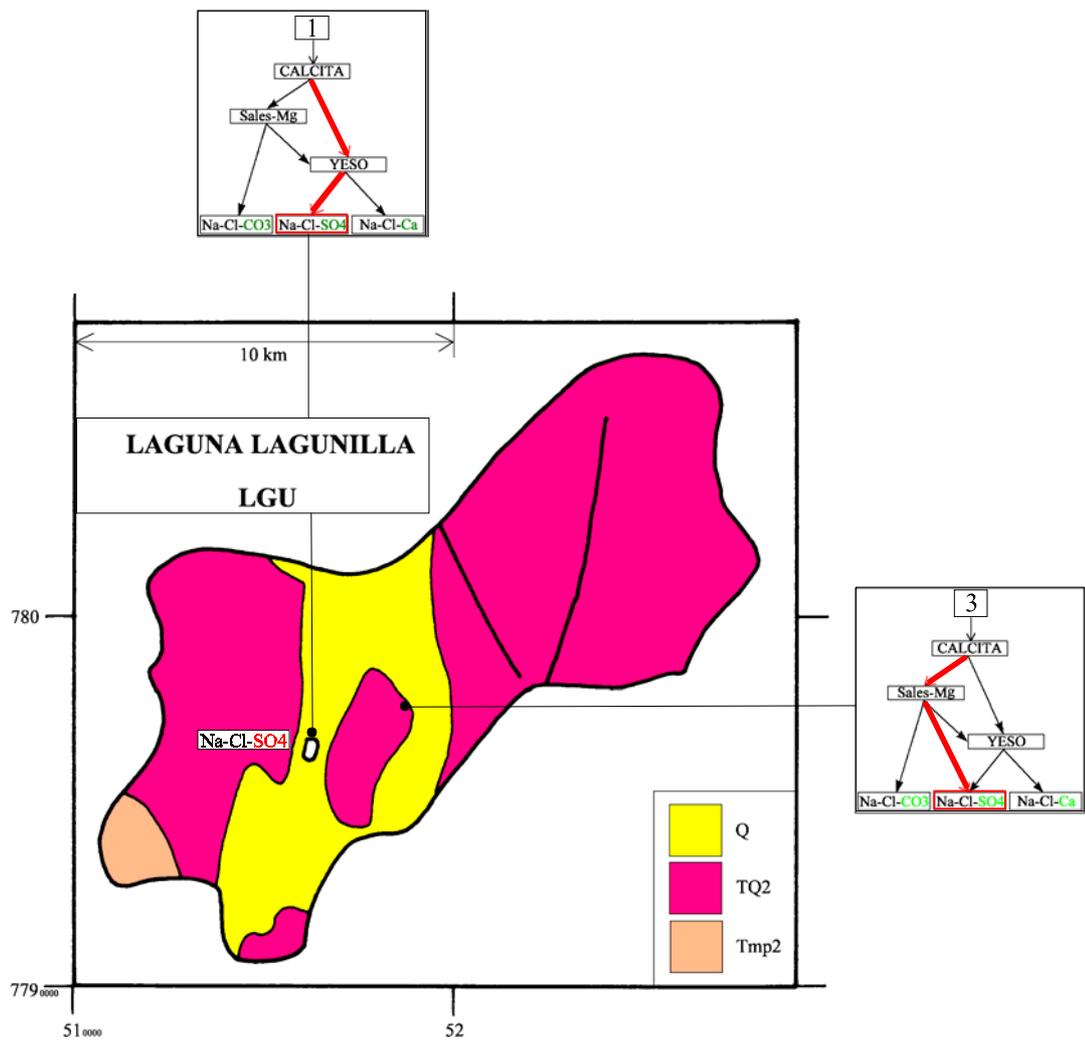
MAPA GEOLOGICO
Y
VIAS EVOLUTIVAS

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.

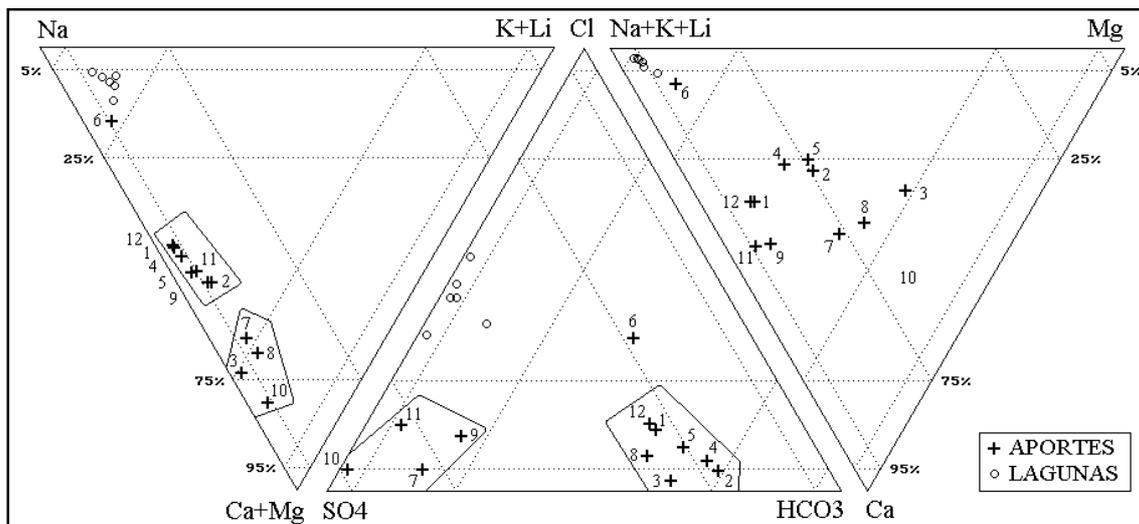


Fig.1: Composicion de aguas y salmueras del salar del Huasco.

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.

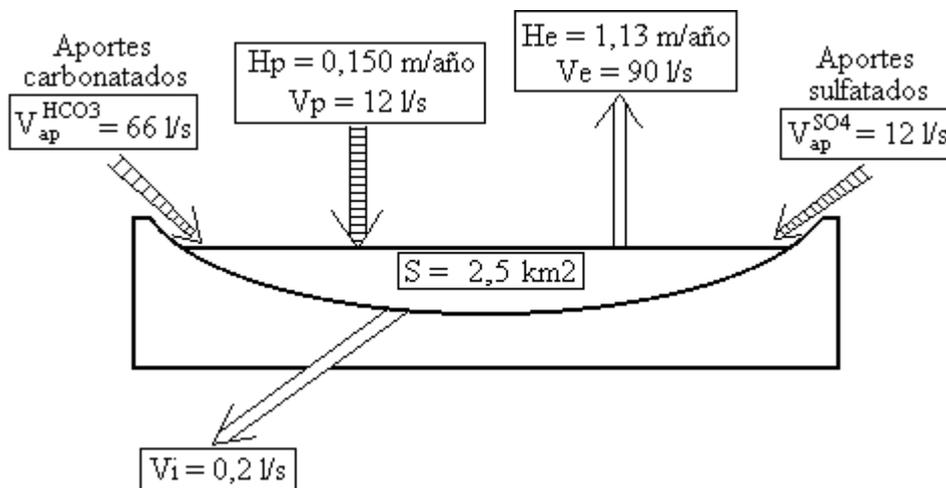


Fig.2 : Balance hídrico de la laguna principal del salar del Huasco.

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

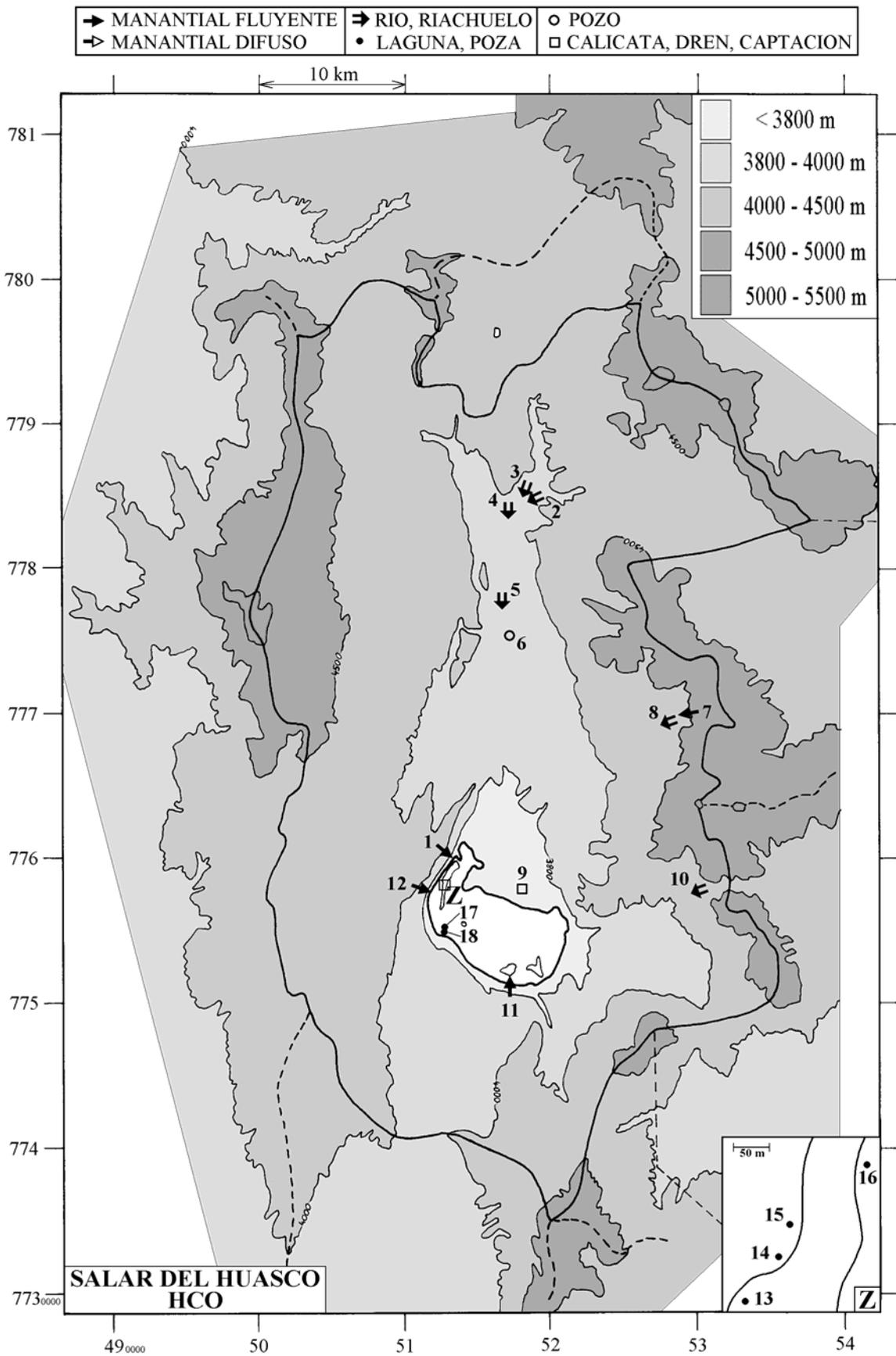
carbonatada. La alteración de las andesitas al este de la cuenca produce aguas de tipo Ca-Mg / SO₄-(HCO₃) de vía evolutiva alcalina sulfatada o neutra sulfatada. No se nota ninguna influencia de evaporitas antiguas en la composición de las aguas de aporte. Las sales disueltas provienen de la alteración 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.

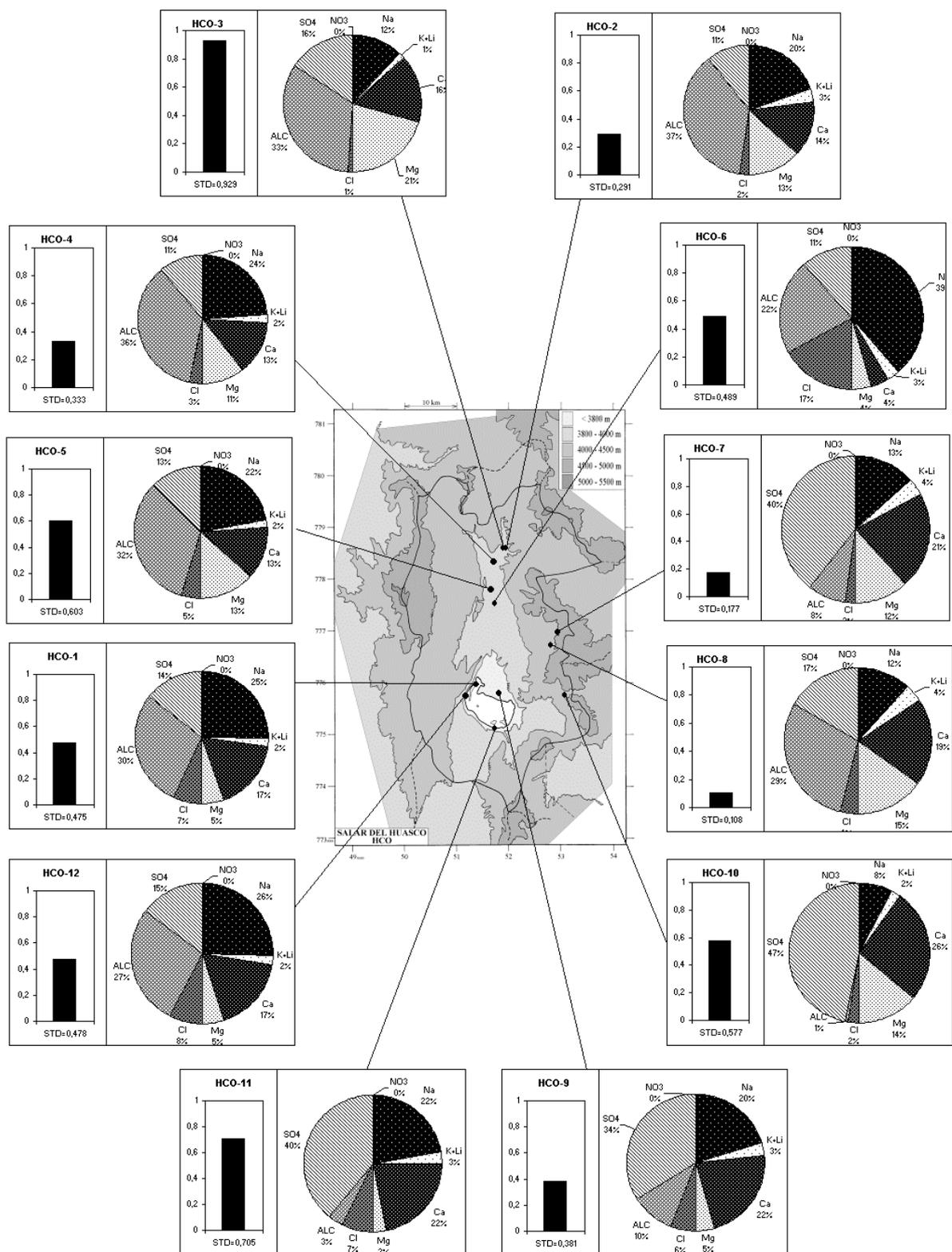
**SALAR DEL HUASCO
HCO**

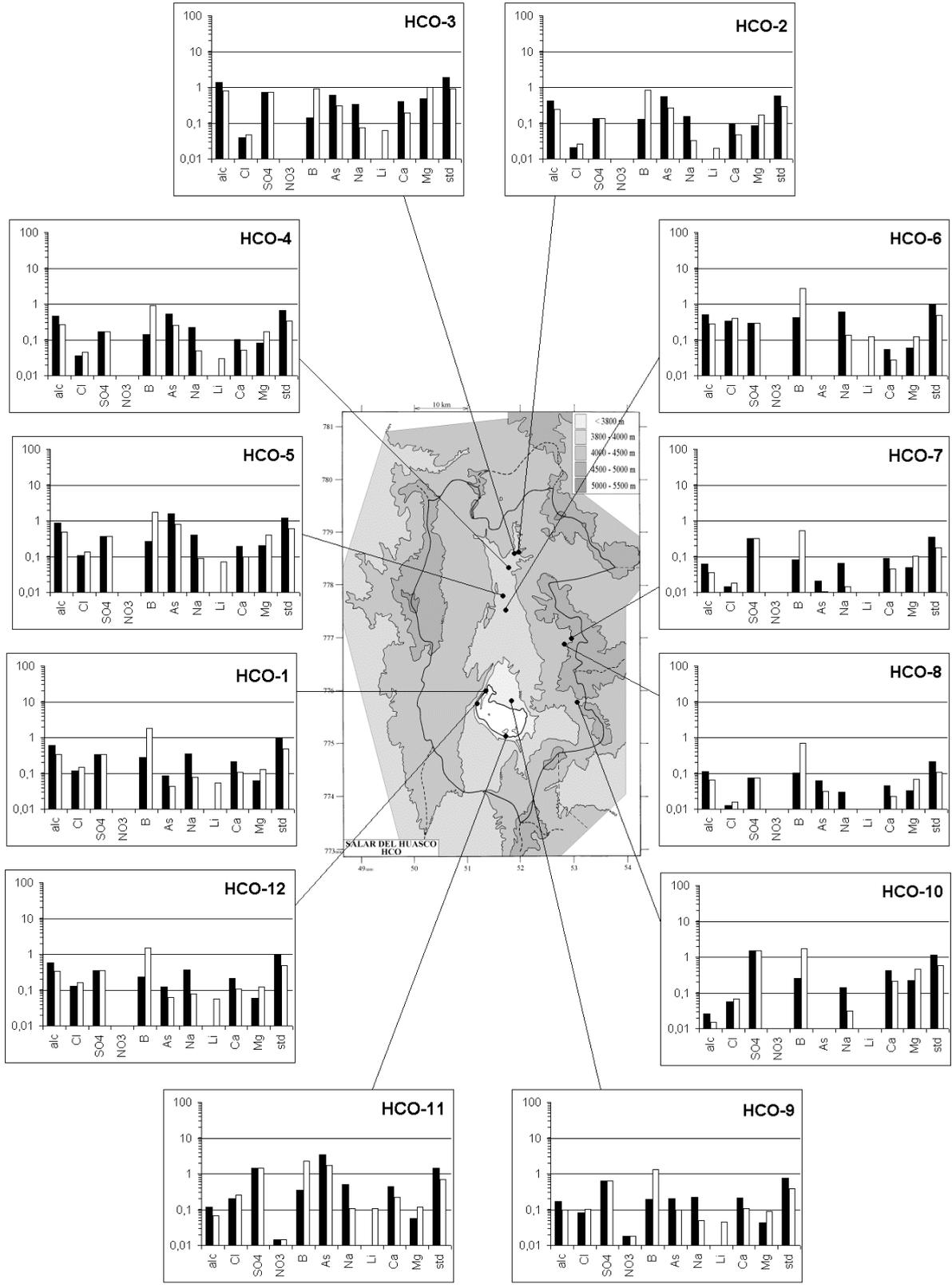
NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF. %
HCO-1	474,6	206	0,72	7,9	6,042	5,967	1,2
HCO-2	291,4	144	1,20	1,9	3,336	3,269	2,0
HCO-3	929,1	475	4,80	9,7	12,22	12,06	1,3
HCO-4	332,6	160	1,80	1,6	3,957	3,816	3,6
HCO-5	603,1	264	14,6	0,66	7,843	7,588	3,3
HCO-6	489,3	172	0,60	4,4	6,846	6,689	2,3
HCO-7	177,1	21,5	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

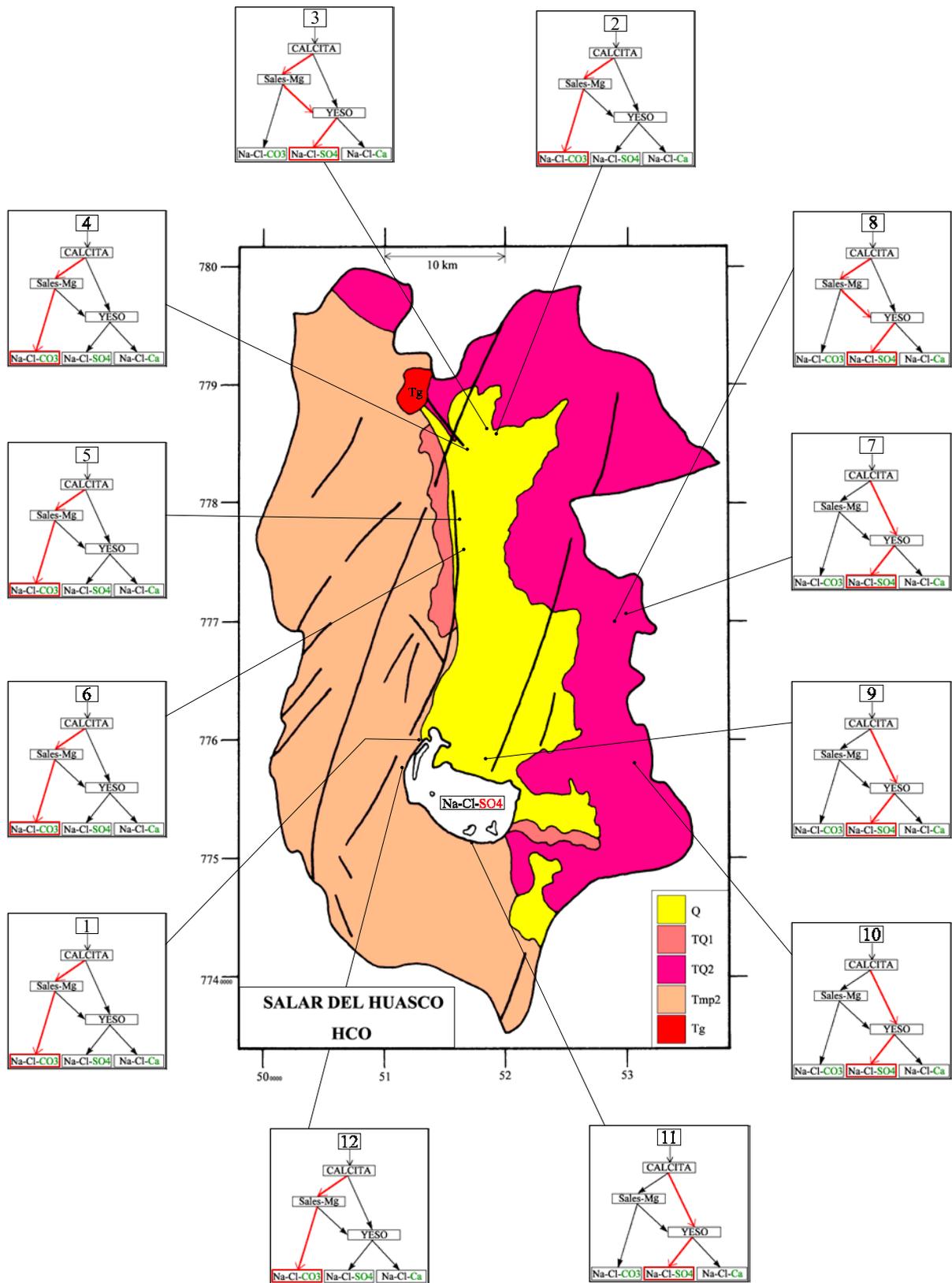
Q : *Cuaternario*. Sedimentos fluviales, lacustres, glaciales, eólicos aluviales, coluviales y laháricos.

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).

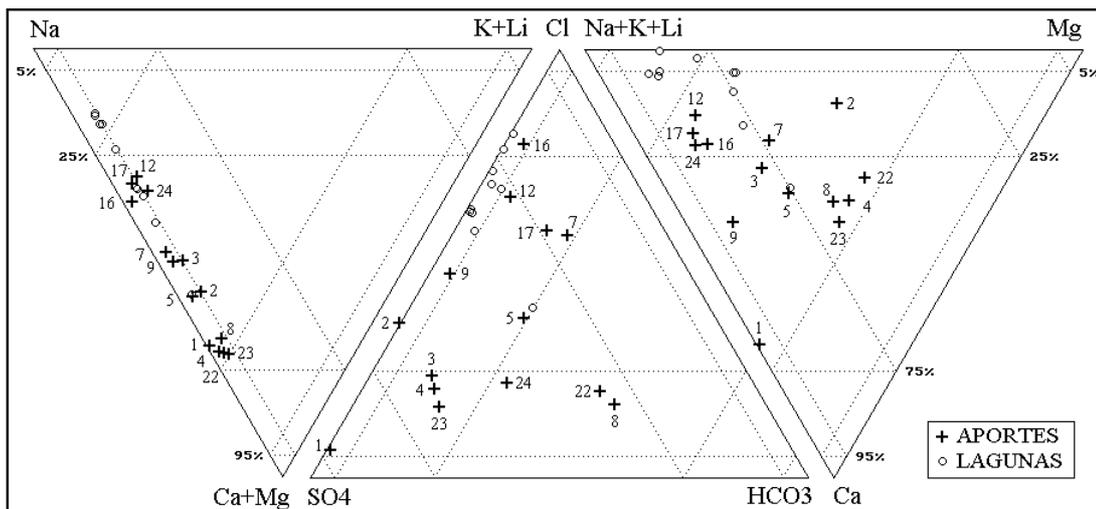


Fig.1: Composición de aguas y salmueras del salar de Coposa.

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.

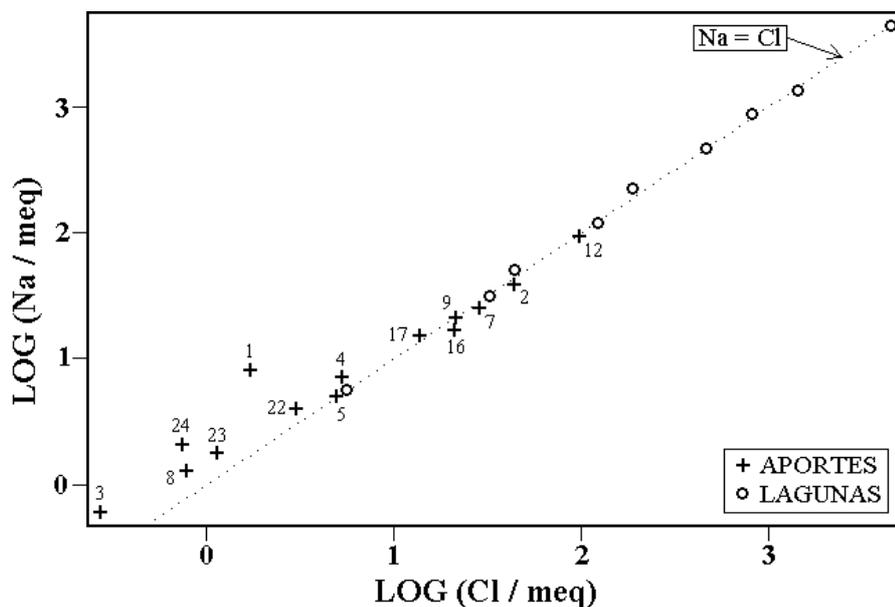


Fig. 2. Relación entre Cl y Na en meq/l en las aguas del salar de Coposa.

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.

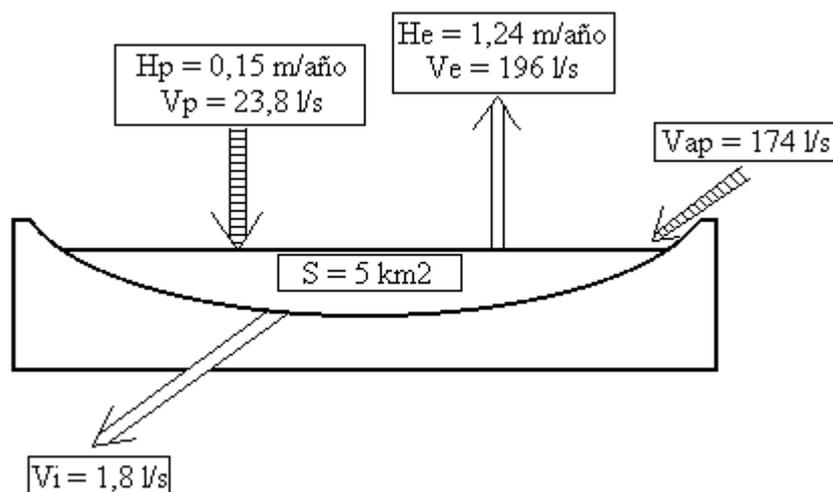


Fig.3 : Balance hídrico de la laguna Jachu Coposa

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 km², 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 l/s. Es exactamente el mismo valor que obtuvieron Grilli y Vidal (1986) utilizando la formula 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 aplica 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 / SO₄-HCO₃ 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

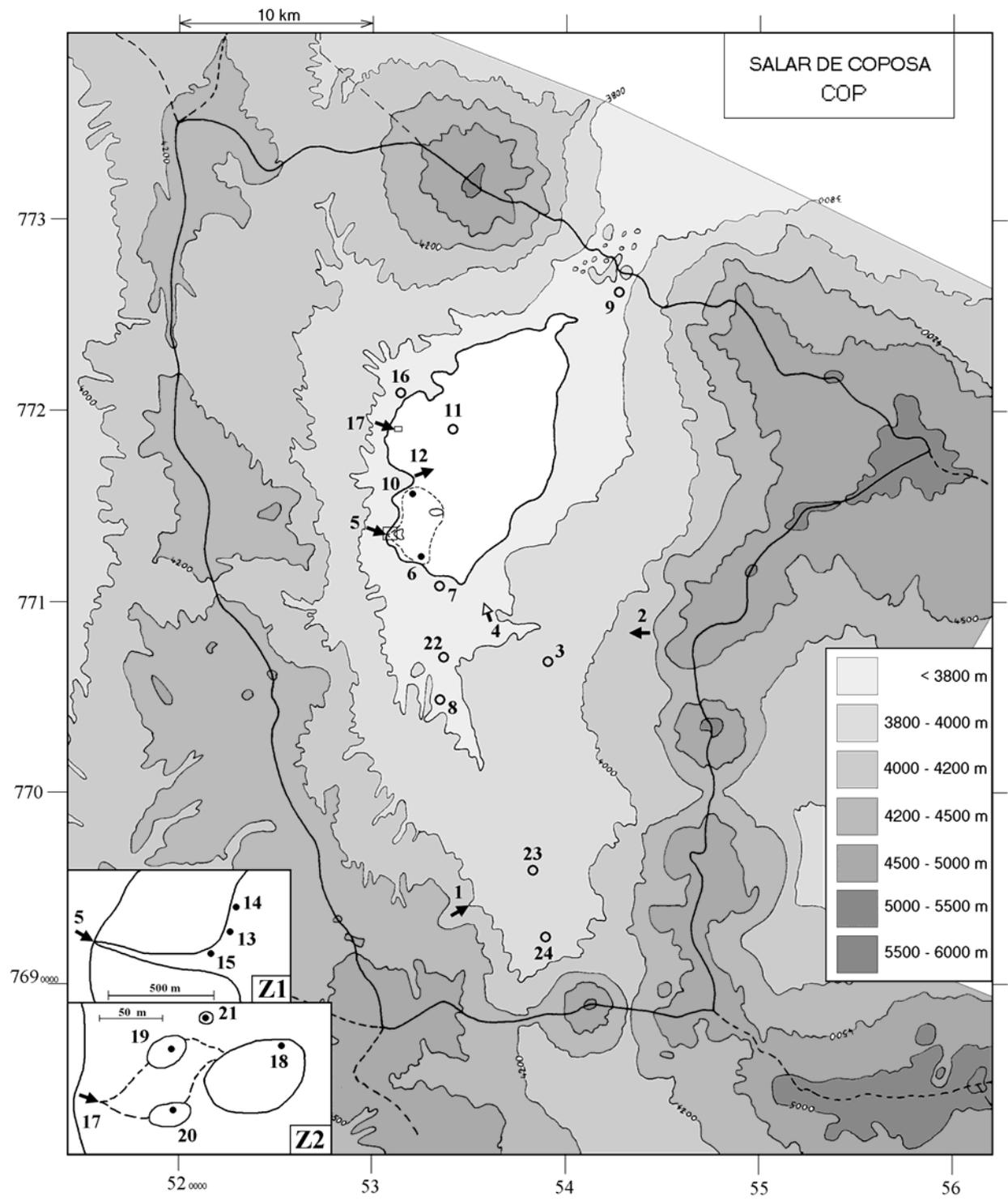
COP-21

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.

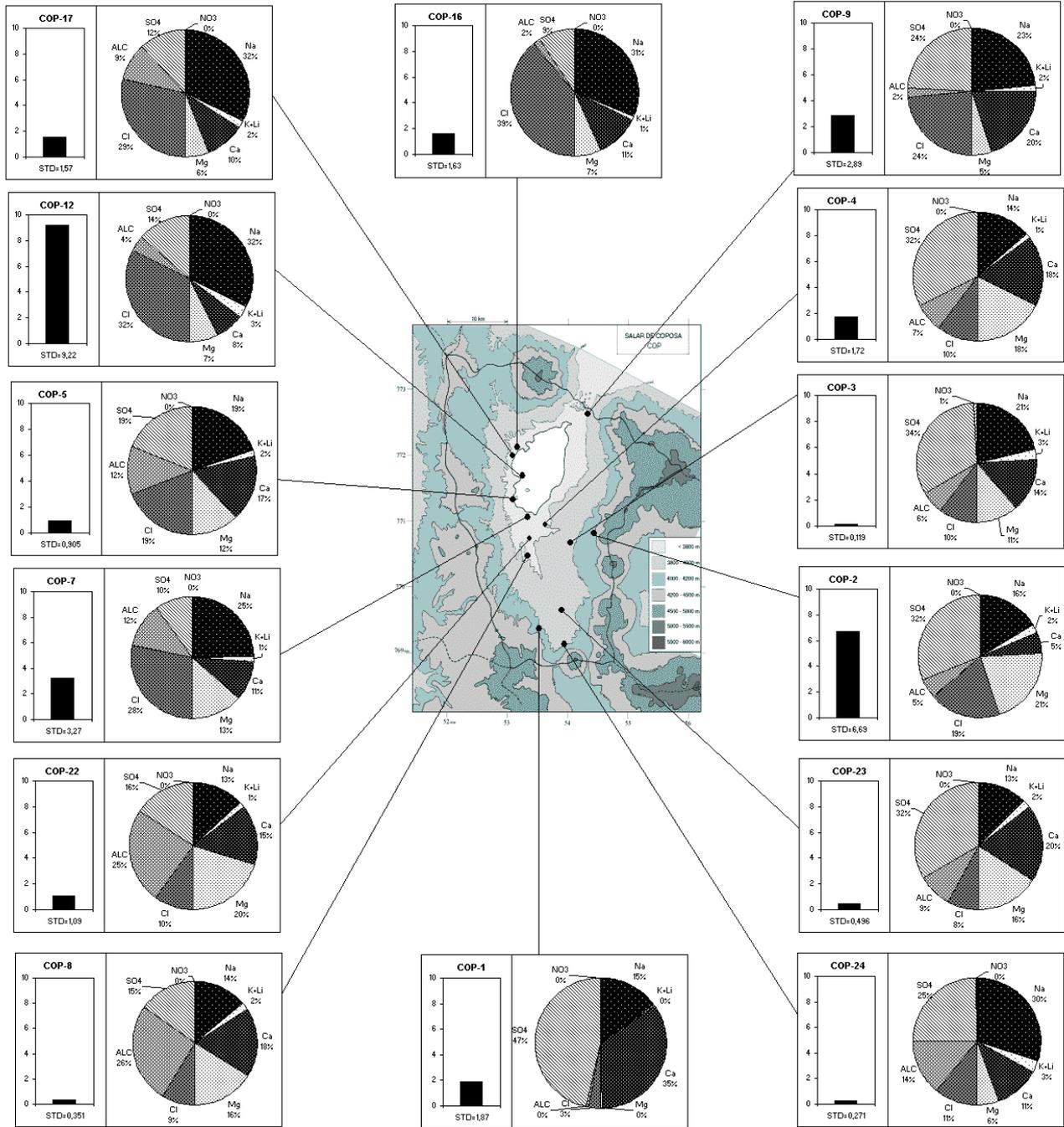
**SALAR DE COPOSA
COP**

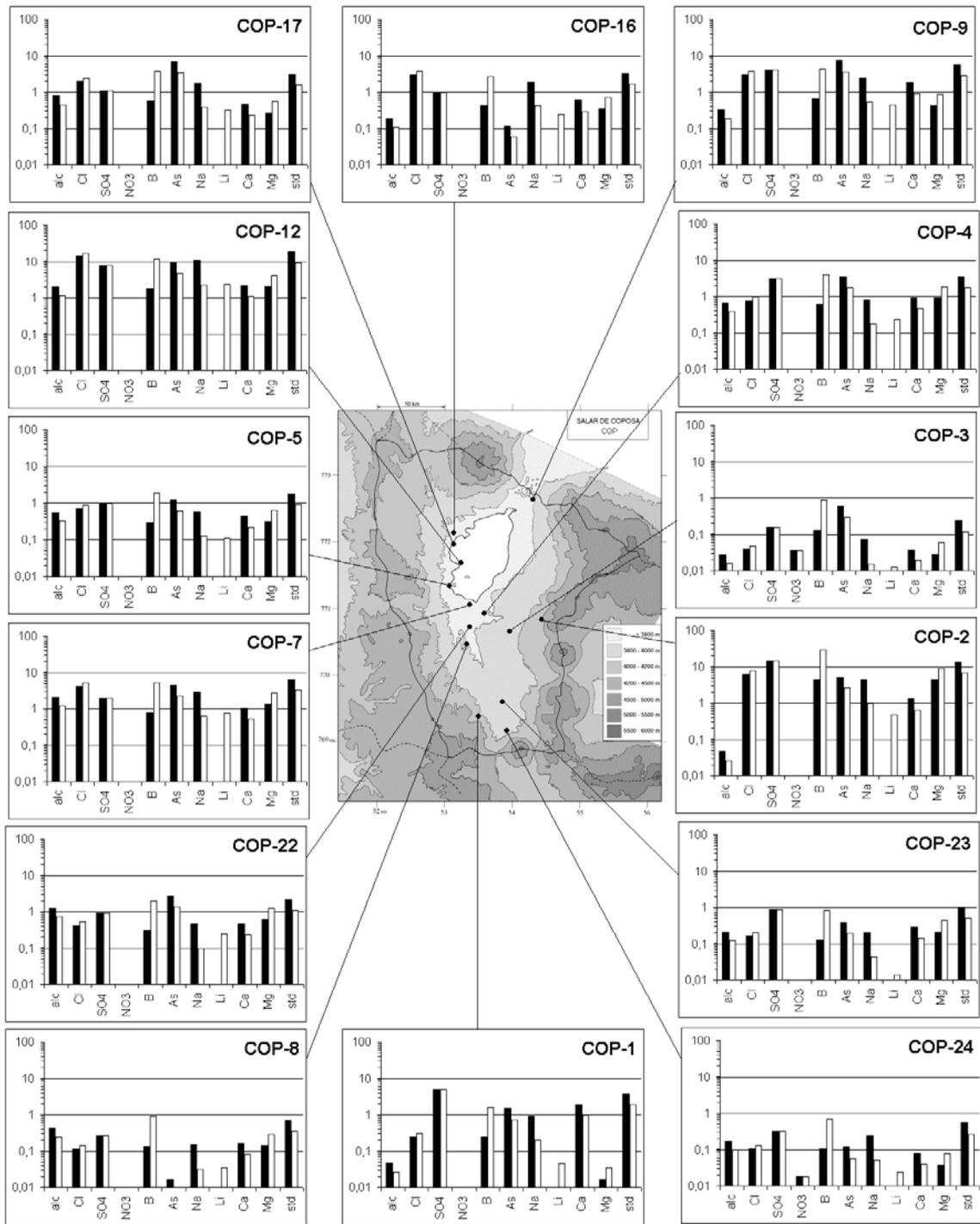
NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S (+)	S (-)	DIF. %
COP-1	1869	13,2	0,60	0,10	27,11	27,19	0,3
COP-2	7415	-	-	-	110,2	109,9	0,3
COP-3	119,1	9,46	0,0	1,6	1,343	1,241	7,9
COP-4	1716	209	8,64	1,4	25,91	25,62	1,1
COP-5	905,4	194	0,06	110	12,88	13,11	1,8
COP-6	45233	215	29,4	1,0	744,1	741,7	0,3
COP-7	3274	714	1,92	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 %

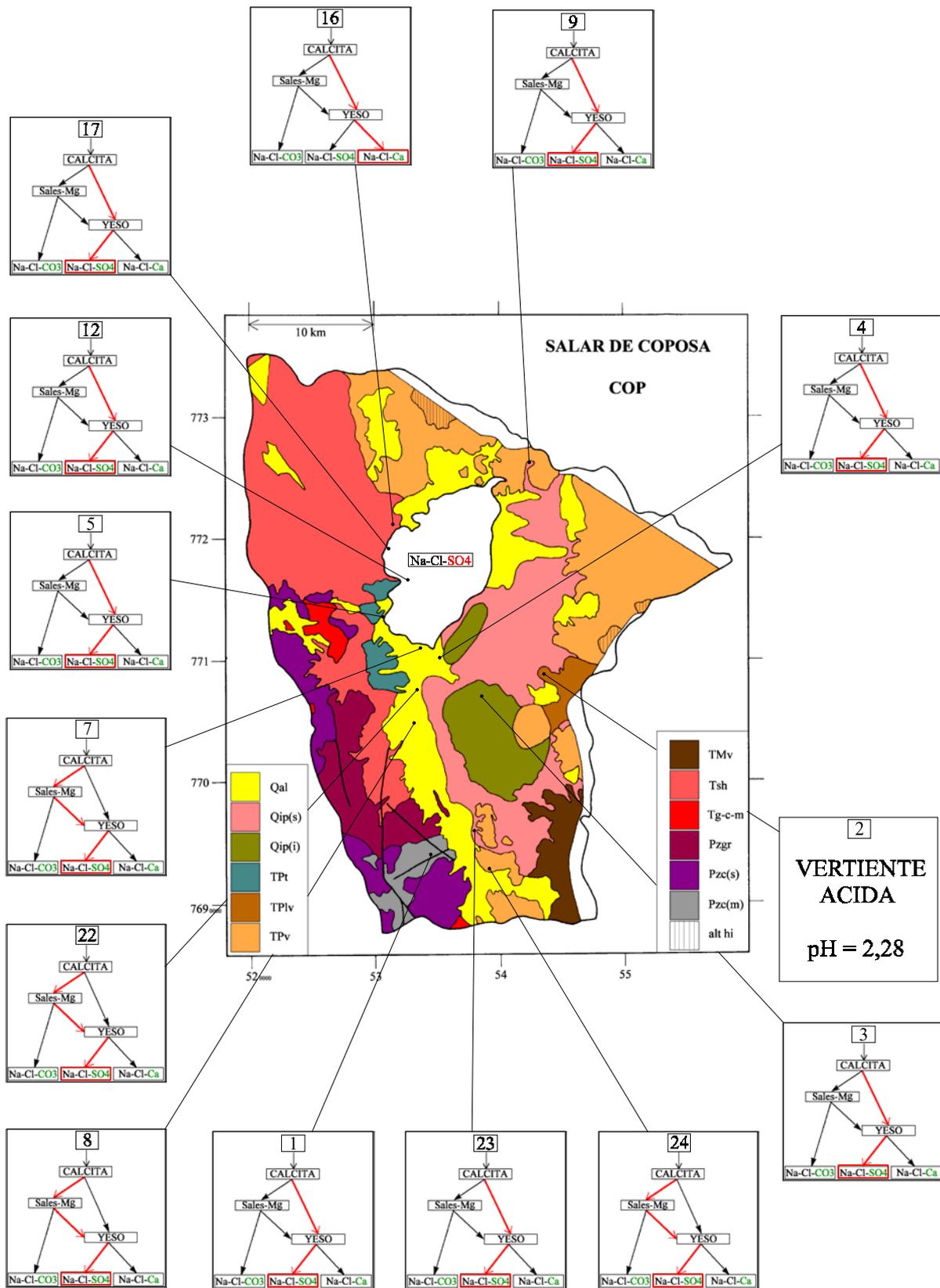




MAPA GEOLOGICO
Y
VIAS EVOLUTIVAS

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

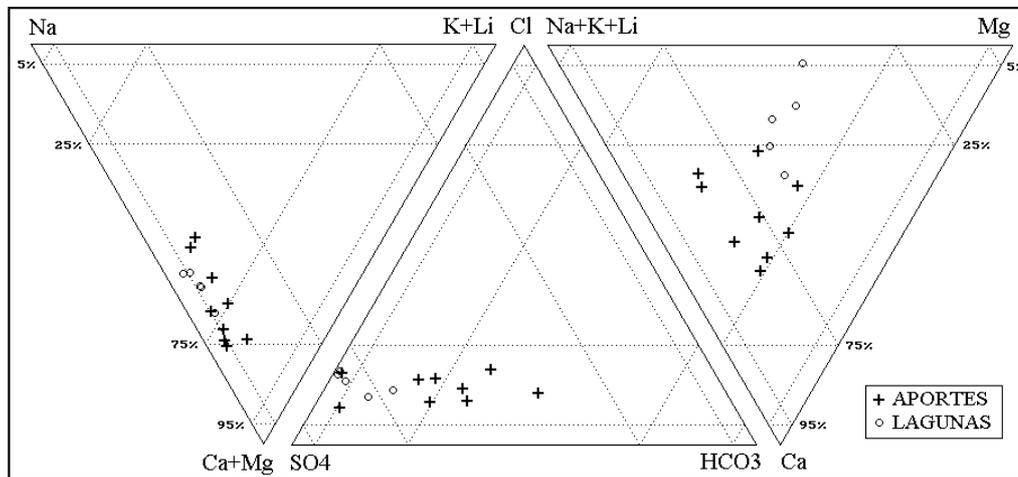


Fig.1. Composición de las aguas de aporte y de salmueras del salar de Michincha.

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.

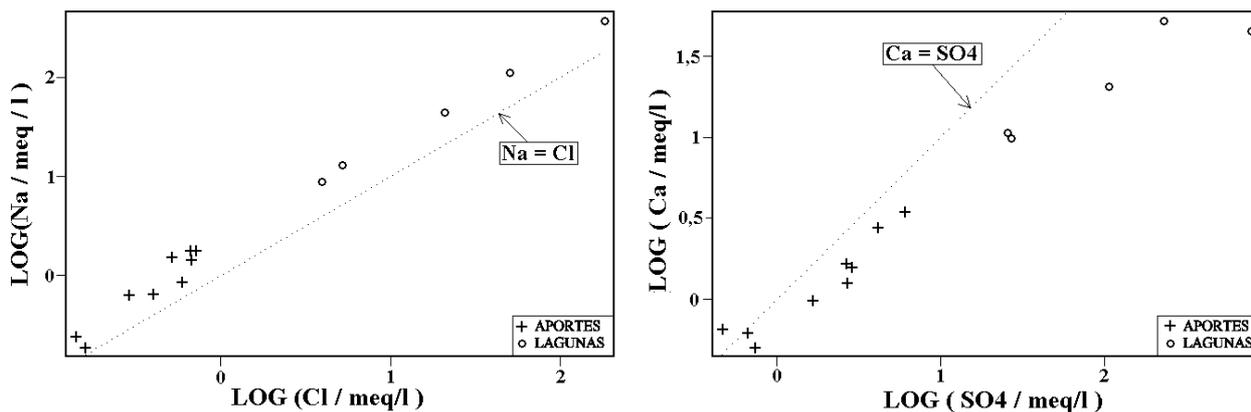


Fig.2. Relación entre Na vs Cl y Ca vs SO₄ en las aguas de Michincha

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.

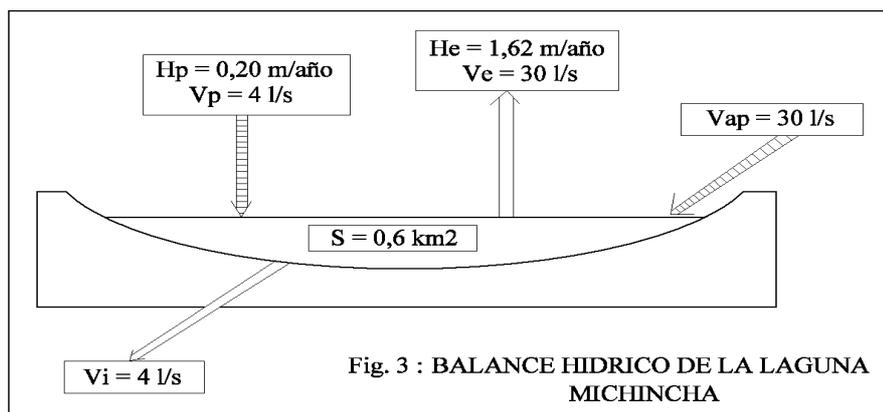
En los dos casos, el coeficiente de desviación no llega a valores muy elevados. En otros salares, llega comunamente por encima de 1,0. Eso confirma una vez más la similitud química de todas las aguas diluidas de la cuenca. Las dos soluciones evaporadas que más se asemejan a la laguna y a la salmuera 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

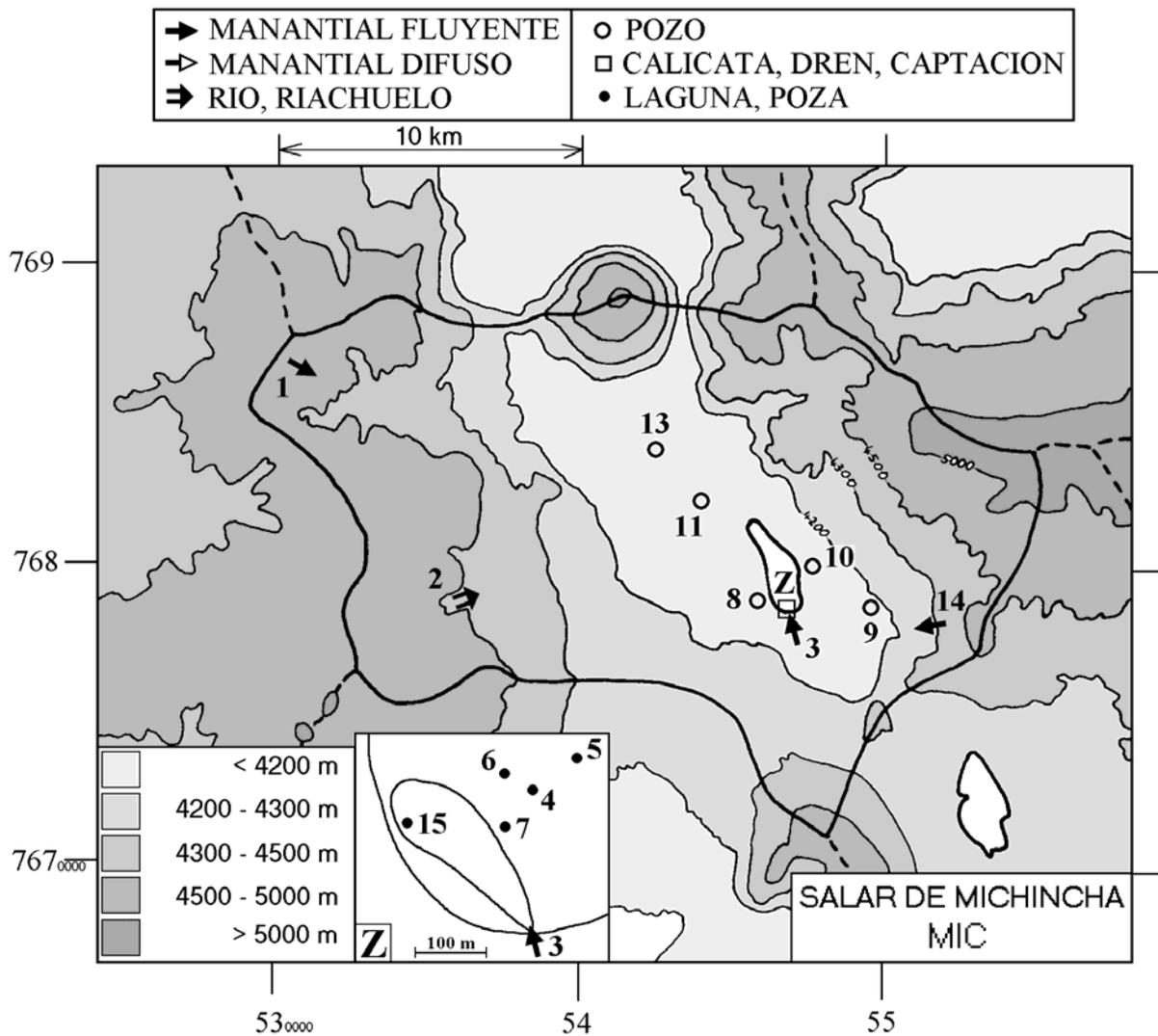
Volumen de infiltraciones : $V_i = S(H_c - H_p) / (1 - C_L / C_{ap}) = 124\ 000$ m³/año = 4 l/s

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.

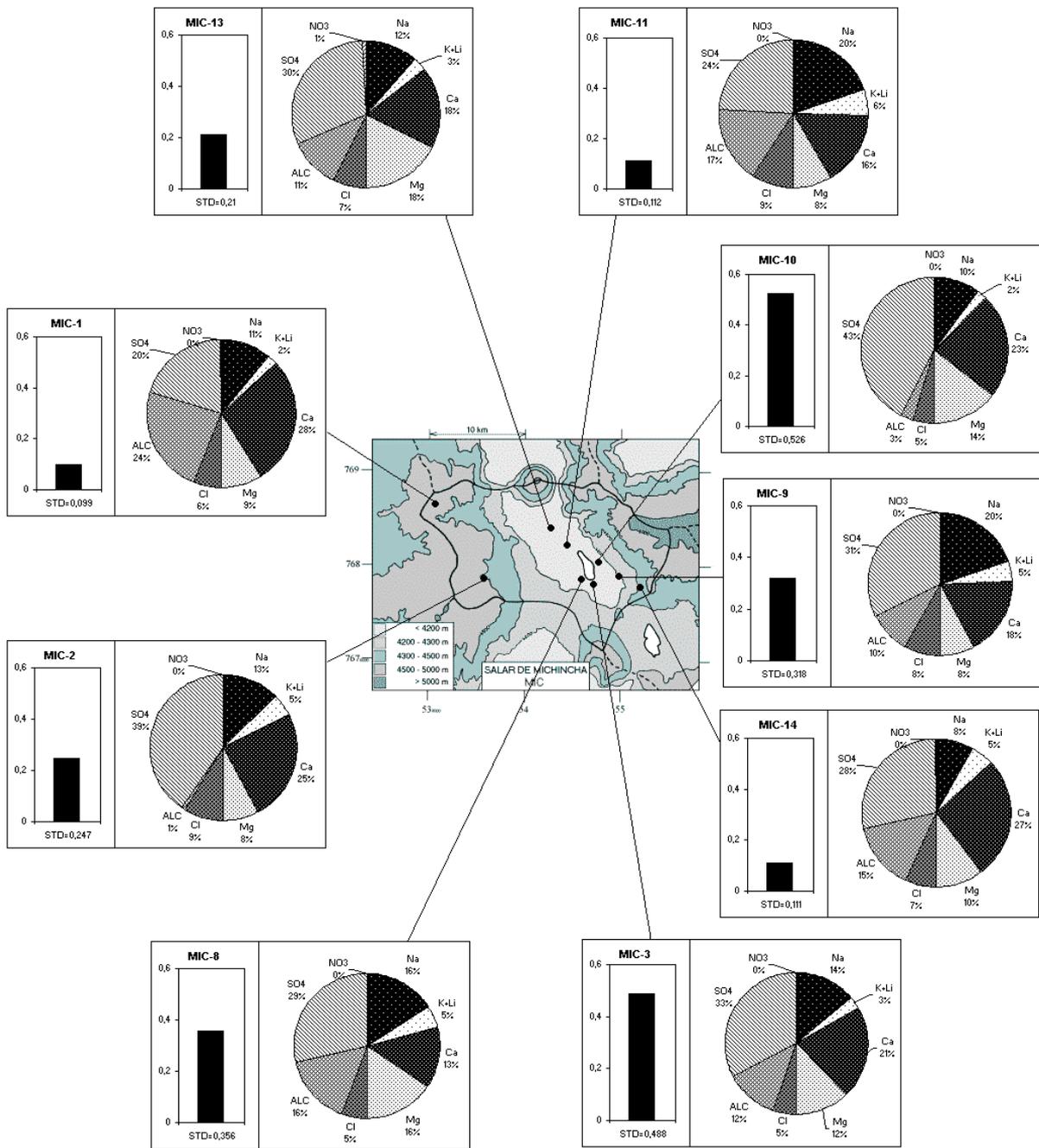
NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF. %
MIC-1	99,03	32,0	0,0	7,9	1,154	1,127	2,4
MIC-2	246,9	3,78	0	3,4	3,360	3,316	1,3
MIC-3	487,7	94,6	0,06	22	6,454	6,314	2,2
MIC-4	2243	168	16,1	0,57	32,85	32,82	0,1
MIC-5	62668	238	116	0,44	992,3	975,7	1,7
MIC-6	8689	165	50,8	0,24	134,9	132,3	1,9
MIC-7	18368	55,1	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

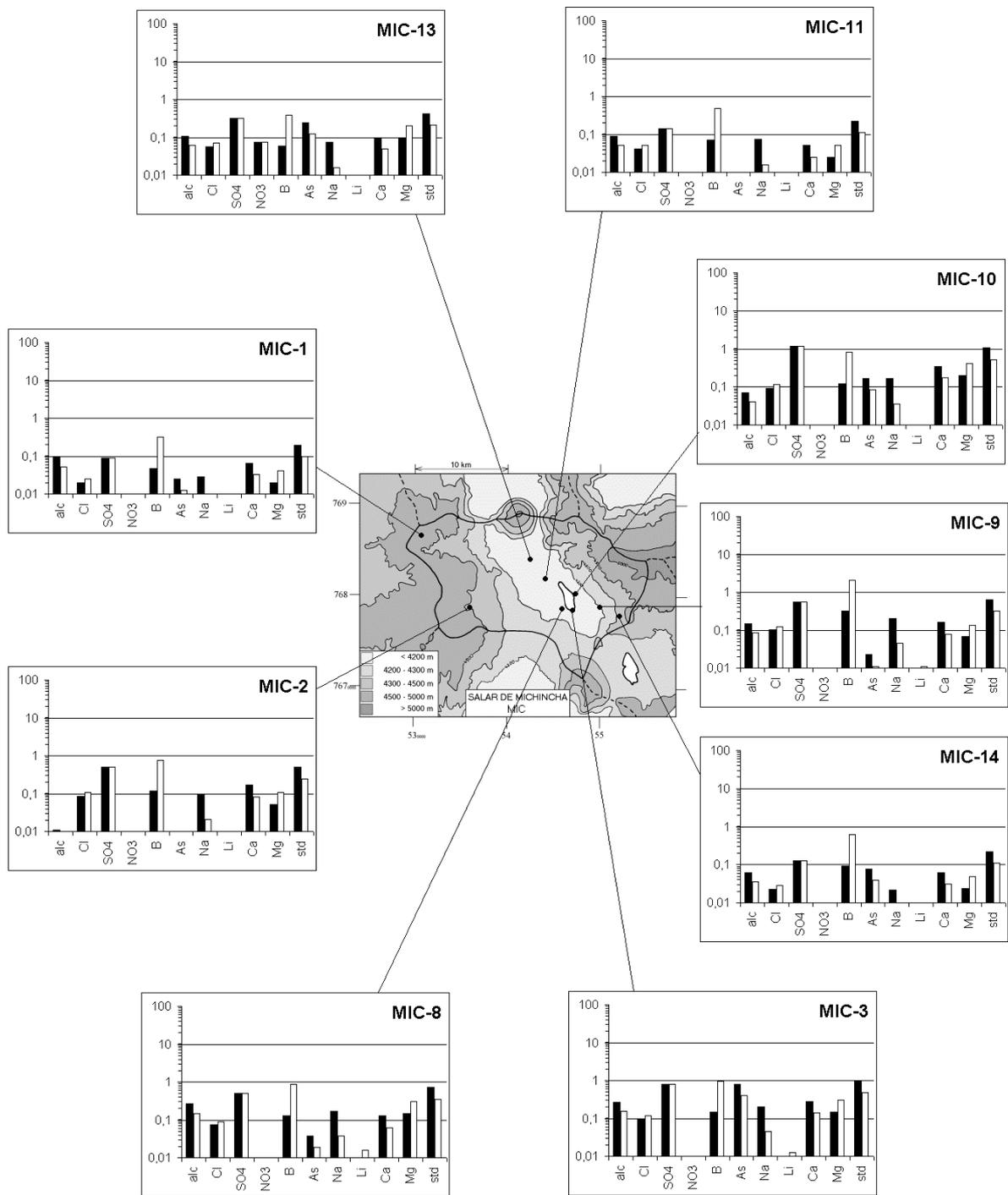
NUMERO	$\delta^{18}O$	δ^2H
MIC-1	-12,9	-100
MIC-3	-13,29	-100

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

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.

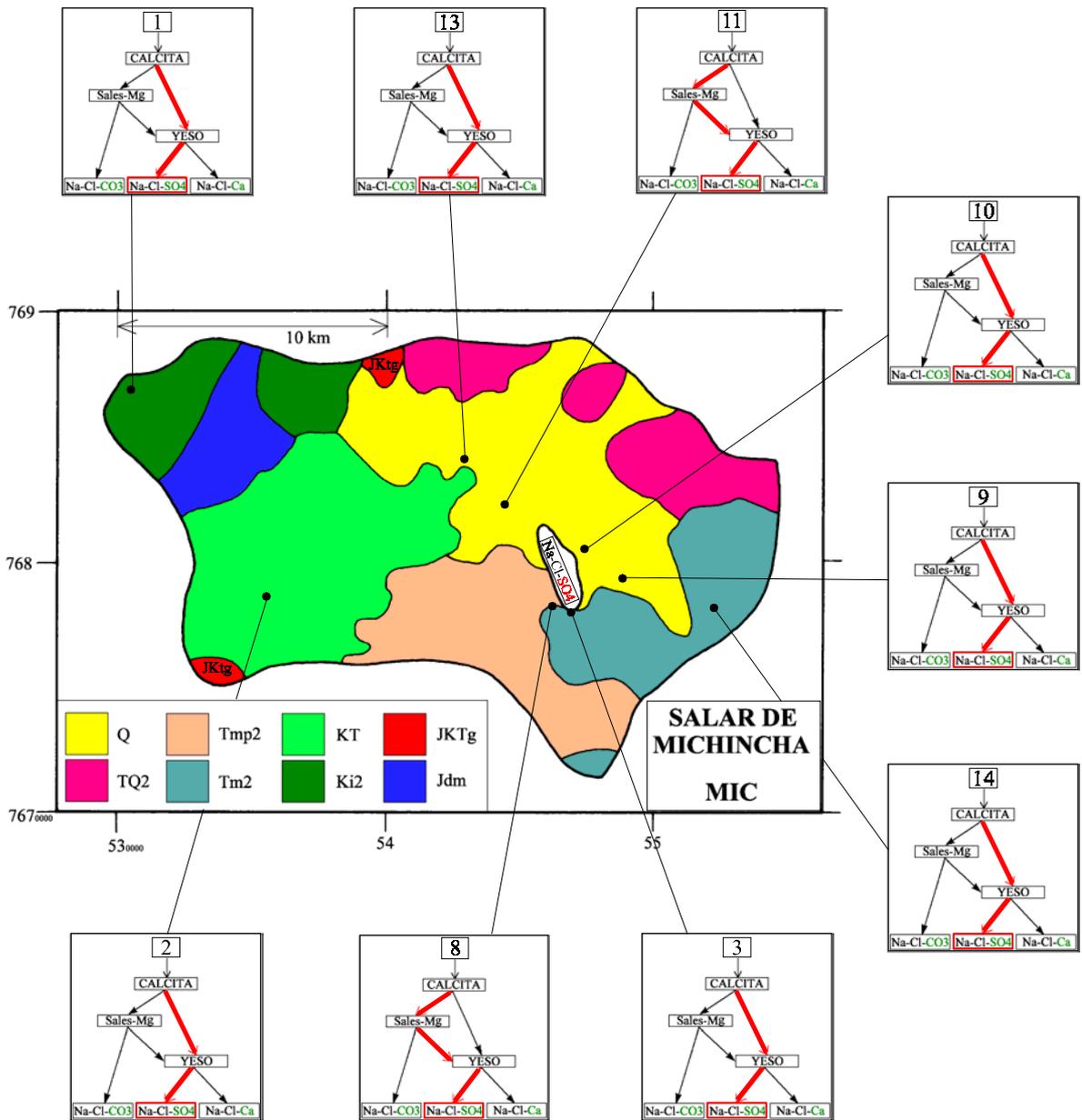
Tm2 : *Mioceno*. Tobas riolíticas y dacíticas, coladas andesíticas y dacíticas.

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.





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 I REGION**

REALIZADO POR:

**François Risacher
Hugo Alonso
Carlos Salazar**

S.I.T. N° 51

Santiago, Enero de 1999

INDICE

SEGUNDA REGION

Salar de Alconcha	1 - 13	[ALC]
Salar de Carcote	15 - 31	[CAR]
Salar de Ascotan	33 - 55	[ASC]
Salar de Atacama	57 - 75	[ATA]
Salar de Tara	77 - 87	[TAR]
Laguna Helada	89 - 97	[HEL]
Salar de Aguas Calientes 1	99 - 109	[AC1]
Salar de Pujsa	111 - 119	[PSA]
Salar de Loyoques	121 - 133	[LOY]
Lag. Trinchera / Chivato Muerto	135 - 143	[TRI/MUE]
Salar de Aguas Calientes 2	145 - 153	[AC2]
Laguna Lejia	155 - 165	[LEJ]
Laguna Miscanti	167 - 175	[MIS]
Laguna Miñiques	177 - 185	[MIN]
Salar del Laco	187 - 195	[LAC]
Laguna Tuyajto	197 - 205	[TUY]
Salar de Aguas Calientes 3	207 - 219	[AC3]
Salar de Capur	221 - 229	[CPR]
Salar de Imilac	231 - 241	[IMI]
Salar de Punta Negra	243 - 261	[PUN]
Salar de Aguas Calientes 4	263 - 273	[AC4]
Laguna de la Azufrera	275 - 283	[LAZ]
Salar de Pajonales	285 - 295	[PAJ]

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. N° 83, del Ministerio de Relaciones Exteriores.

SALAR DE ALCONCHA

Introducción

La cuenca del salar de Alconcha se encuentra en la Cordillera de los Andes al extremo norte de la II Región. Colinda al este con la cuenca de Michincha y al sur con la cuenca del río Loa. Aunque su hidrogeología ha sido investigada por empresas mineras, no se explota las napas de la cuenca. Sus principales características morfométricas y climatológicas son:

- altura: 4250 m
- superficie de la cuenca: 128 km²
- superficie del salar: 3,8 km²
- superficie de la laguna: 0,5 - 1 km²
- precipitaciones: 200 mm/año
- evaporación potencial: 1620 mm/año
- temperatura media: 3,5°C

El salar está parcialmente recubierto por una laguna salada poco profunda y de superficie variable. Varios manantiales surgen en las laderas. Sus aguas se infiltran alimentando las napas alrededor del salar. La orilla sur-oeste es un gran bofedal con vertientes fluyentes y difusas y numerosas pozas de evaporación. Es la única alimentación visible de la laguna.

Aguas de aporte

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.

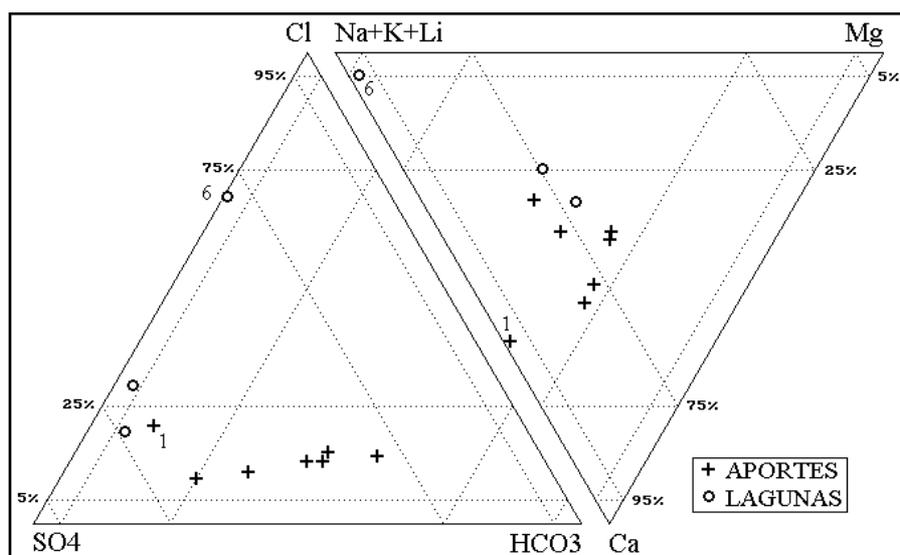


Fig.1. Composición de las aguas de aporte y de las salmueras del salar de Alconcha.

Hemos muestreado 6 aguas de vertiente (5 fluyentes y una difusa) y el agua termal de un pozo surgente (ALC-1). Las aguas de vertiente tienen una composición relativamente homogénea y son de tipo catiónico Na - Ca - Mg. Se ubican casi al centro del triángulo Na-Ca-Mg. Su tipo aniónico se extiende en un estrecho huso desde un polo SO_4 (4) hasta un polo HCO_3 (3), con una concentración porcentual de Cl baja y casi constante. Este contenido relativo en SO_4 y HCO_3 es el punto relevante que diferencia y caracteriza cada agua de vertiente. Por otra parte, las aguas de vertientes fluyentes son muy diluidas: desde 120 mg/l hasta 230 mg/l. El agua de la vertiente difusa es mucho más salada: 1165 mg/l, pero no se distingue de las aguas muy diluidas en lo que se refiere a sus concentraciones porcentuales. Esas aguas de vertientes se parecen mucho a las aguas de aporte del vecino salar de Michincha. El agua termal de la napa surgente (ALC-1) es distinta. Es de tipo Ca-Na / SO_4 , con muy poco magnesio. Notamos, al paso, que se observa la misma deficiencia en Mg en las aguas *termales* de la cuenca de Pintados.

La figura 2 presenta las relaciones Na versus Cl y Ca versus SO_4 para todas las aguas y salmueras. No se observa concentraciones equimolares entre Na y Cl, pero sí entre Ca y SO_4 .

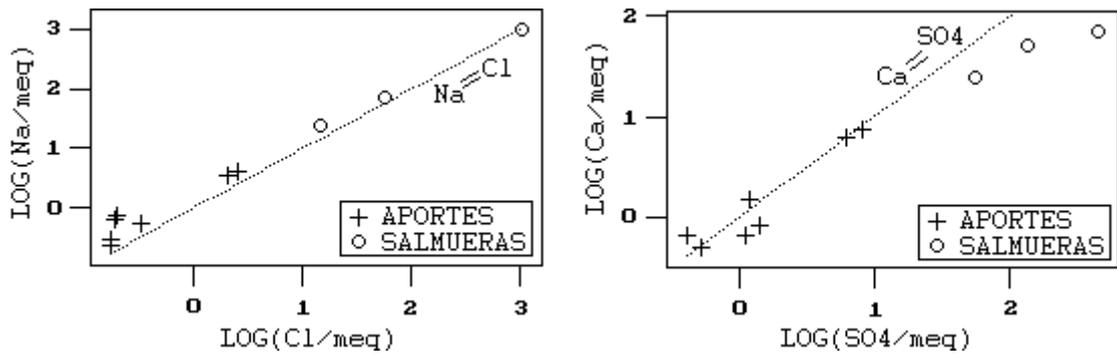


Fig.2. Relación entre Na - Cl y Ca - SO_4 en las aguas del salar de Alconcha

Podría ocurrir alguna disolución de sulfato de calcio (yeso) para las dos aguas de aporte más concentradas (7 y 10). Para las aguas más diluidas, a pesar de agruparse cerca de la recta de equimolaridad $\text{Ca} = \text{SO}_4$, es poco probable un aporte sustancial de Ca y SO_4 por disolución de yeso. Estas aguas son demasiado diluidas para ser aguas de lixiviación de sales. Es más probable que los componentes disueltos en las aguas de vertientes provengan 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 la laguna

La laguna principal del salar (6) es salada (100 g/l STD). En el bofedal circundante, las pozas de evaporación (8 y 9) presentan soluciones menos concentradas: 3 - 15 g/l STD. Sus composiciones químicas, de tipo Na-Mg / SO_4 , son distintas de la composición de la laguna de tipo Na / Cl- SO_4 (ver Fig.1).

Vías evolutivas

Todas las aguas de aporte evolucionan por evaporación hacia salmueras sulfatadas, sea por la vía neutra sulfatada (1, 5, 10) sea por la vía alcalina sulfatada (2, 3, 4, 7). Esta uniformidad refleja la similitud de los aportes. A pesar de su composición distinta, el agua de napa ALC-1 sigue también una vía sulfatada. La vía sulfatada corresponde bien a aguas de terrenos volcánicos con azufre. La vía neutra sulfatada podría reflejar la presencia de rocas volcánico-sedimentarias o un contenido más elevado de azufre en las rocas lixiviadas. Sin embargo, la baja salinidad de las vertientes caracteriza más los terrenos volcánicos o cristalinos que los sedimentarios. La geología de la cuenca es esencialmente volcánica con ocurrencias de azufre, en particular en el volcán Aucanquillcha (6100 m) al sur del salar. Se puede asumir entonces una buena correlación entre la litología de la cuenca y las vías evolutivas de las aguas.

Evolución cuantitativa de aguas

Veamos ahora la evolución cuantitativa de las aguas de aporte cuando se evaporan. La tabla 1 presenta la composición calculada de todas las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta la salinidad de la poza en bofedal (ALC-9) y también hasta la concentración de la salmuera de la laguna (ALC-6). Las soluciones reales están muy sobresaturadas en calcita y la salmuera (6) 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 (ALC-xxE) y la solución real equilibrada (ALC-xx.EQL).

NUMERO	PH	ALC	NA	K	LI	CA	MG	CL	SO4	B	SI	DESV.
ALC-9.EQL	7,91	1,82	1670	1050	1,86	494	636	2080	5580	66,3	33,6	
ALC-10E	8,20	1,77	1470	1010	1,62	461	741	1360	6260	88,4	32,7	0,034
ALC-7E	8,35	2,38	1680	1000	1,51	226	808	1510	6320	77,0	32,8	0,080
ALC-2E	8,35	2,91	1520	1050	--	225	805	1380	5790	124	32,8	0,130
ALC-3E	8,38	3,20	1520	1420	--	188	678	1650	5360	135	32,9	0,159
ALC-4E	8,45	2,49	2070	1110	1,12	154	539	867	6790	49,6	33,1	0,223
ALC-5E	8,22	1,51	1670	963	0,231	428	660	724	7170	49,2	32,9	0,355
ALC-1E	8,14	1,50	3080	397	4,44	528	70,1	2840	4570	94,2	32,6	0,466
ALC-6.EQL	8,13	2,90	23800	14600	14,1	724	375	37600	19900	157	15,9	
ALC-1E	7,97	7,69	28900	3740	41,9	612	660	26700	32700	803	26,2	0,516
ALC-4E	8,14	7,06	17500	9340	9,41	529	4370	7300	55300	417	28,6	0,723
ALC-7E	8,04	9,87	14400	8590	13,0	513	6810	13000	50800	662	27,1	0,735
ALC-10E	8,04	11,9	13500	9250	14,9	519	6780	12500	48800	814	27,2	0,764
ALC-3E	7,97	12,9	12900	12100	--	533	5650	14100	43300	1080	27,6	0,826
ALC-2E	8,01	14,5	13000	9030	--	528	6790	11800	46300	1050	27,3	0,896
ALC-5E	8,08	7,12	15200	8770	2,10	516	5960	6600	57300	448	28,2	0,999

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

El agua de la poza (9) proviene de la evaporación de las vertientes (7) y (10) que se descargan en el bofedal. Las desviaciones son mínimas. El agua de napa (1) no parece tener mucha influencia sobre la composición de las pozas del bofedal. Al contrario, el agua de aporte evaporada que más

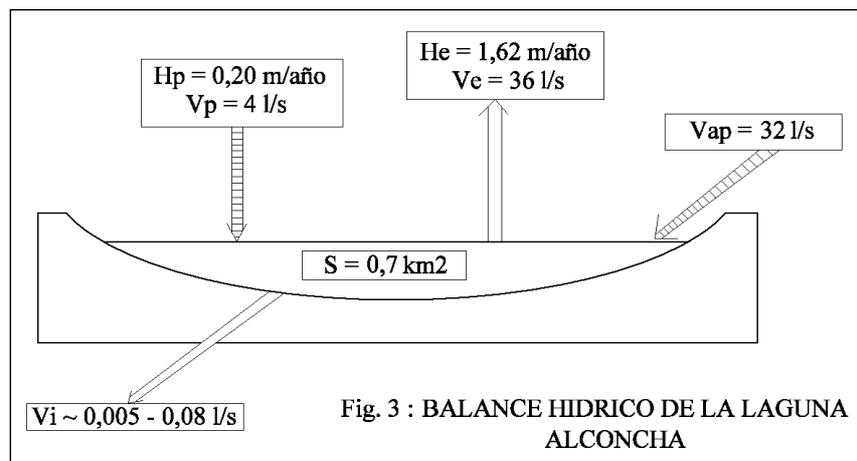
se asemeja a la salmuera de la laguna es el agua de la napa termal, pero con un coeficiente de desviación bastante mediocre de 0,5. Las demás aguas evaporadas tienen una desviación todavía más importante, lo que sugiere que la alimentación principal de la laguna no proviene del lado del bofedal. Tampoco es posible obtener una composición de salmuera similar a la laguna partiendo de una mezcla ponderada de distintos aportes. Los aportes superficiales visibles no son los principales. Es probable que la laguna sea alimentada en gran parte por vertientes difusas a lo largo de su orilla oriental con aguas de composición más parecida a ALC-1 que a las vertientes diluidas de la cuenca.

Calidad de agua

Todas las aguas de vertientes cuenca arriba son de excelente calidad tanto para el uso doméstico como para el uso agrícola. Las aguas de vertientes en el bofedal son de calidad aceptable o al límite de potabilidad. El agua de napa tiene cuatro veces más arsénico que el máximo permisible para el uso humano y tres veces más boro para el uso agrícola.

Balance hídrico de la laguna Alconcha

Tenemos un problema para estimar las infiltraciones. No conocemos la composición promedio de las aguas de aporte por faltar un componente difuso importante. Por eso damos un rango de tasa de infiltración basado en las concentraciones extremas de los aportes encontrados.



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

- $H_e = 1,62$ m/año
- $H_p = 0,20$ m/año
- $S = 0,6$ km²
- $C_{ap} = 6 - 90$ mg/l
- $C_L = 36\ 600$ mg/l

Volumen de aporte : $V_{ap} = S(H_e - H_p)/(1 - C_{ap}/C_L) = 995\ 000$ m³/año = 32 l/s

Volumen de infiltraciones : $V_i = S(H_e - H_p)/(1 - C_L/C_{ap}) = 160 - 2500$ m³/año
= 0,005 - 0,08 l/s

A pesar de la gran imprecisión sobre la composición de las aguas de aporte, es posible adelantar que las infiltraciones son mínimas.

Conclusiones

El salar de Alconcha está alimentado por dos tipos de aguas :

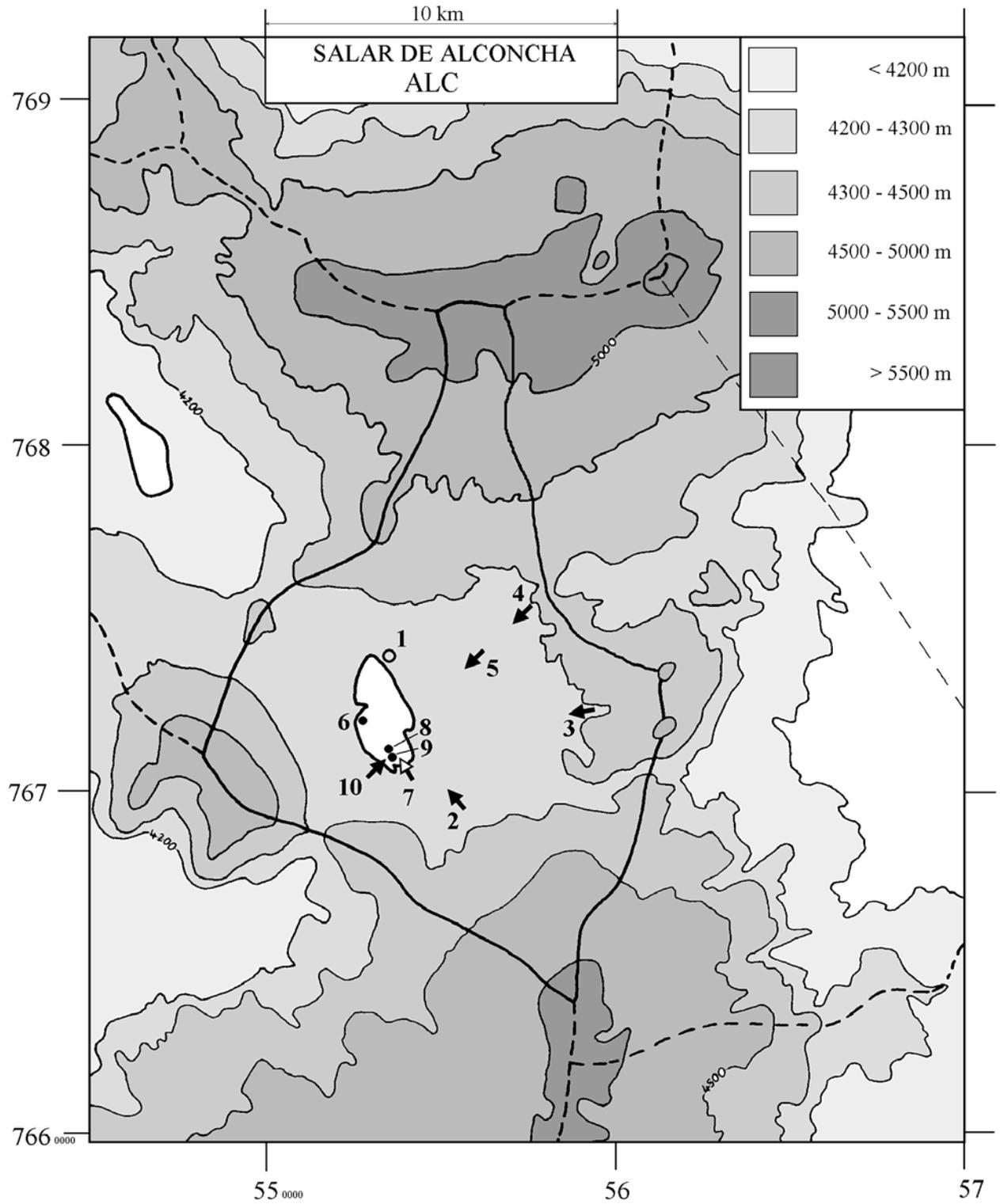
- aguas diluidas (120-230 mg/l STD) de tipo Na-Ca-Mg / $\text{HCO}_3\text{-SO}_4$ en vertientes cuenca arriba que alimentan el gran bofedal al sur del salar. La salmuera de la laguna principal no proviene de la evaporación de estas aguas.

- aguas de napa más concentradas (1000 mg/l) de tipo Ca-Na / SO_4 .

Hay buena concordancia entre los tipos químicos, las vías evolutivas y la geología de la cuenca. Basicamente, las aguas de aporte provienen de la alteración de rocas volcánicas con azufre. Ningún agua de aporte produce por evaporación, de manera satisfactoria, una salmuera similar a la de la laguna principal del salar. Su principal alimentación se hace probablemente por descarga de napas en su orilla oriental.

Referencias y estudios anteriores

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.



**SALAR DE ALCONCHA
ALC**

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
ALC-1	09/04/97	12 ^H 35	553482	7673910	4185	Napa (pozo 7 hierro, surgente)
ALC-2	09/04/97	14 ^H 10	556036	7669738	4190	Manantial corriente AW-5
ALC-3	09/04/97	15 ^H 00	558891	7672378	4280	Manantial corriente
ALC-4	09/04/97	16 ^H 05	557316	7675280	4250	Manantial corriente
ALC-5	09/04/97	16 ^H 30	555648	7674175	4200	Manantial corriente
ALC-6	09/04/97	17 ^H 15	552647	7671824	4180	Laguna
ALC-7	14/04/97	10 ^H 15	553926	7670791	4181	Manantial difuso en bofedal
ALC-8	14/04/97	10 ^H 45	553618	7671065	4180	Poza de evaporación en bofedal
ALC-9	14/04/97	11 ^H 05	553623	7671003	4180	Poza de evaporación en bofedal
ALC-10	14/04/97	11 ^H 25	553434	7670905	4181	Manantial corriente en bofedal

**SALAR DE ALCONCHA
ALC**

NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
ALC-1	1170	43,4	0,2	1,000	6,46	1,43	89,5	0,217	0,036	396	na	2,97	22,8	0,213	97,1	12,5	0,140	150	2,21
ALC-2	142,0	12,6	5,2	1,000	7,42	0,629	6,00	0,039	0,0029	25,2	2,2	0,541	19,4	0,0026	6,60	4,57	nd	10,2	5,08
ALC-3	141,0	16,1	5,3	1,000	8,07	0,746	5,96	0,046	0,0016	19,4	1,4	0,486	15,7	0,0032	5,50	5,12	nd	13,1	3,67
ALC-4	220,0	19,2	5,0	1,000	7,78	0,678	6,99	0,024	0,0005	53,3	1,2	0,400	35,6	0,0068	17,5	8,95	0,009	13,0	5,22
ALC-5	235,0	11,7	5,4	1,000	7,10	0,542	6,53	0,032	0,0003	67,3	1,1	0,443	27,3	0,0055	15,1	8,68	0,002	16,8	5,95
ALC-6	112000	13,1	4,4	1,072	8,65	8,66	36600	29,6	0,229	21300	na	157	15,9	1,93	24400	14600	14,0	1440	374
ALC-7	1384	2,8	0,0	1,000	7,37	7,15	72,1	0,217	0,0099	301	na	3,68	40,3	0,0494	80,0	47,7	0,072	126	58,3
ALC-8	5950	5	8,8	1,005	8,47	5,15	529	1,93	0,143	2670	na	24,6	53,5	0,251	541	305	0,660	493	267
ALC-9	14900	6,2	4,7	1,012	8,46	6,97	2080	8,63	0,256	6440	na	66,2	51,0	1,20	1730	1050	1,86	1010	634
ALC-10	288,0	6,1	4,0	1,000	7,94	1,19	11,6	0,081	0,0042	57,4	1,7	0,757	26,0	0,0186	12,6	8,60	0,014	29,4	6,34

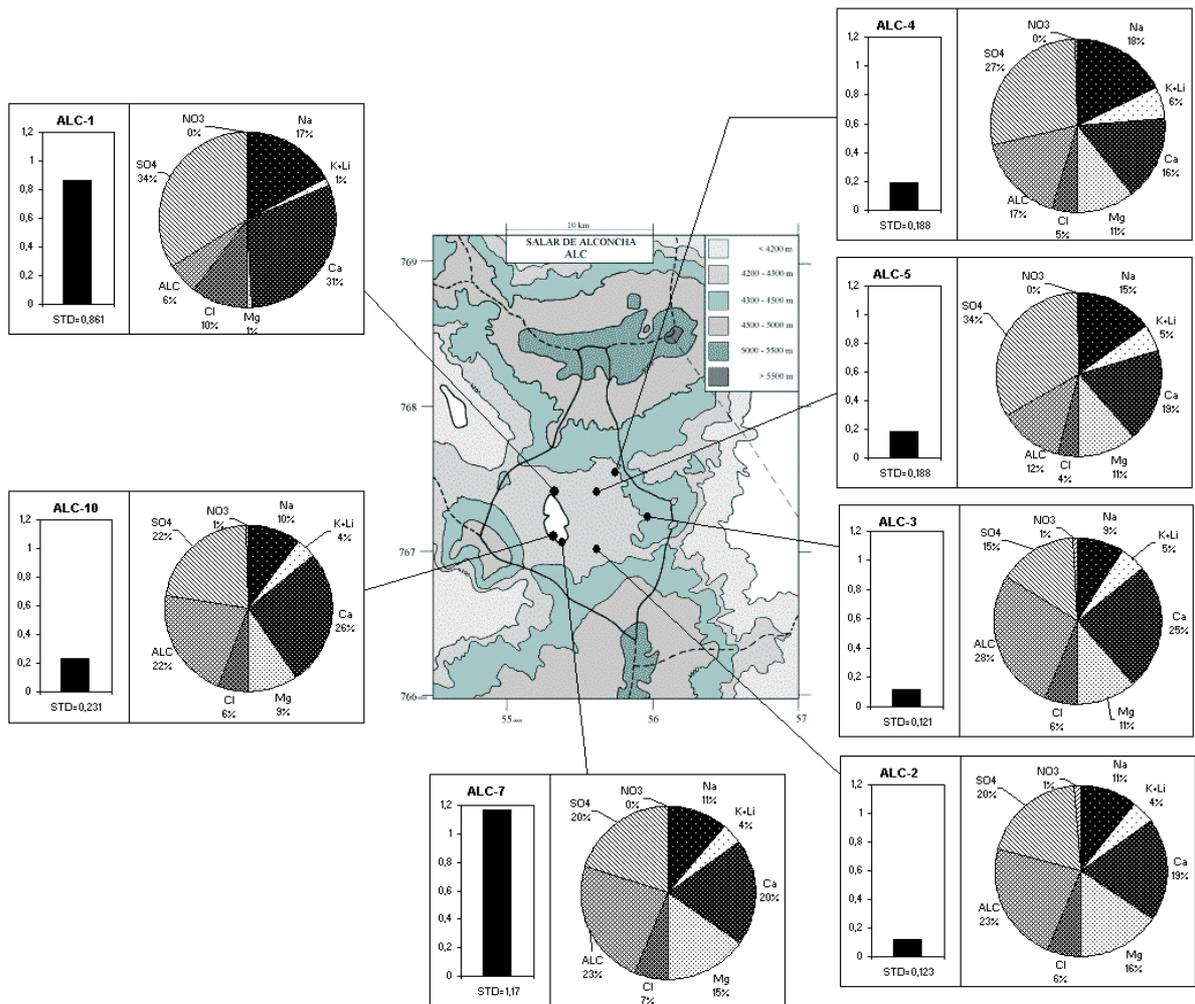
T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l.

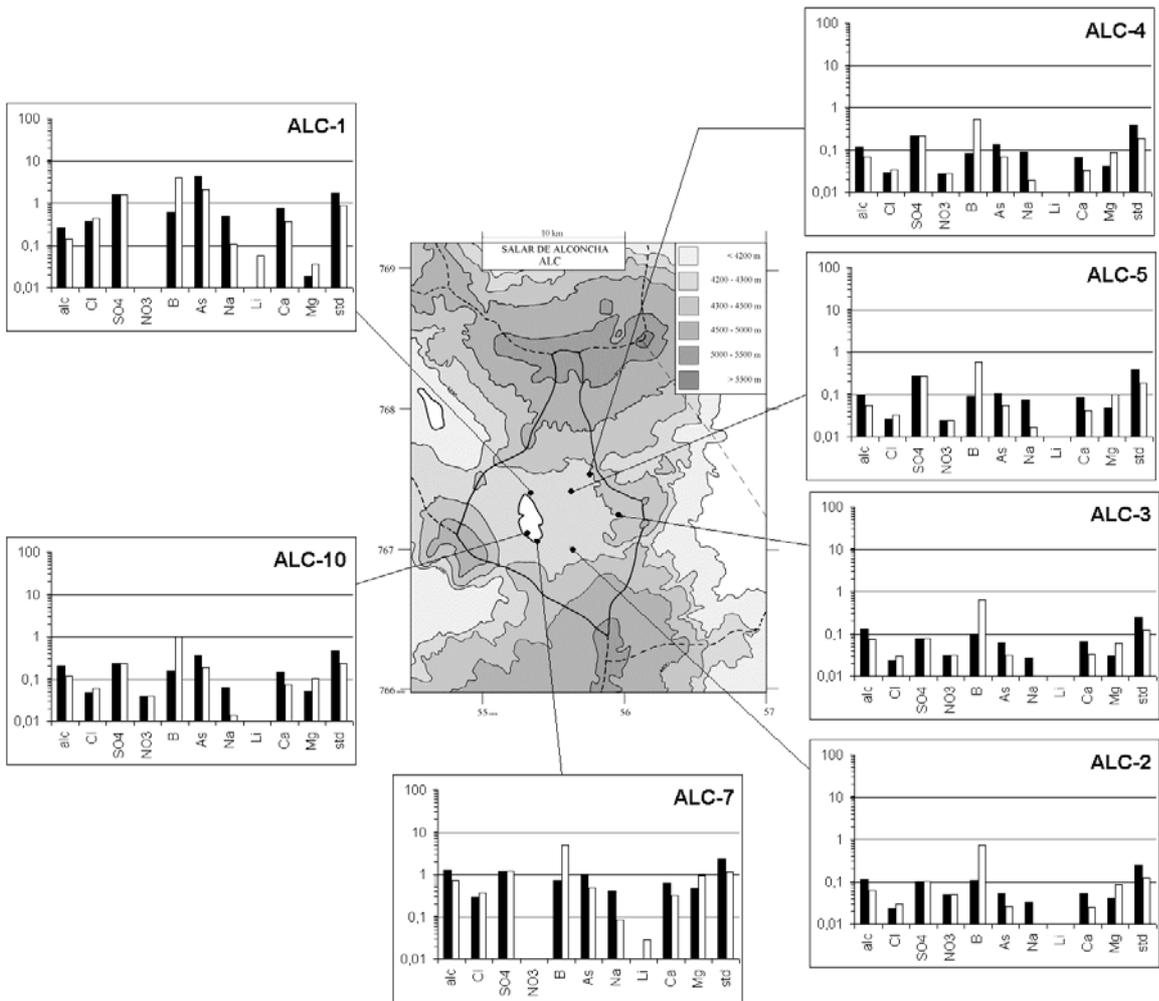
CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF. %	NUMERO	$\delta^{18}O$	δ^2H
ALC-1	860,7	87,2	0,06	37	12,24	12,19	0,4	ALC-1	-14,42	-108
ALC-2	123,2	38,1	0,06	2,6	1,330	1,357	2,0	ALC-3	-14,71	-111
ALC-3	120,9	44,3	0,30	0,7	1,326	1,340	1,1	Análisis de oxígeno-18 y deuterio		
ALC-4	188,3	40,3	0,18	1,1	2,067	2,004	3,1			
ALC-5	187,6	32,9	0,0	4,8	2,206	2,145	2,8			
ALC-6	99366	139	25,8	0,3	1538	1483	3,6			
ALC-7	1165	434	1,02	40	15,77	15,46	2,0			
ALC-8	5201	260	14,8	1,5	77,99	75,65	3,0			
ALC-9	13489	301	25,3	1,6	204,9	199,8	2,5			
ALC-10	230,8	71,4	0,36	1,7	2,757	2,742	0,6			

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

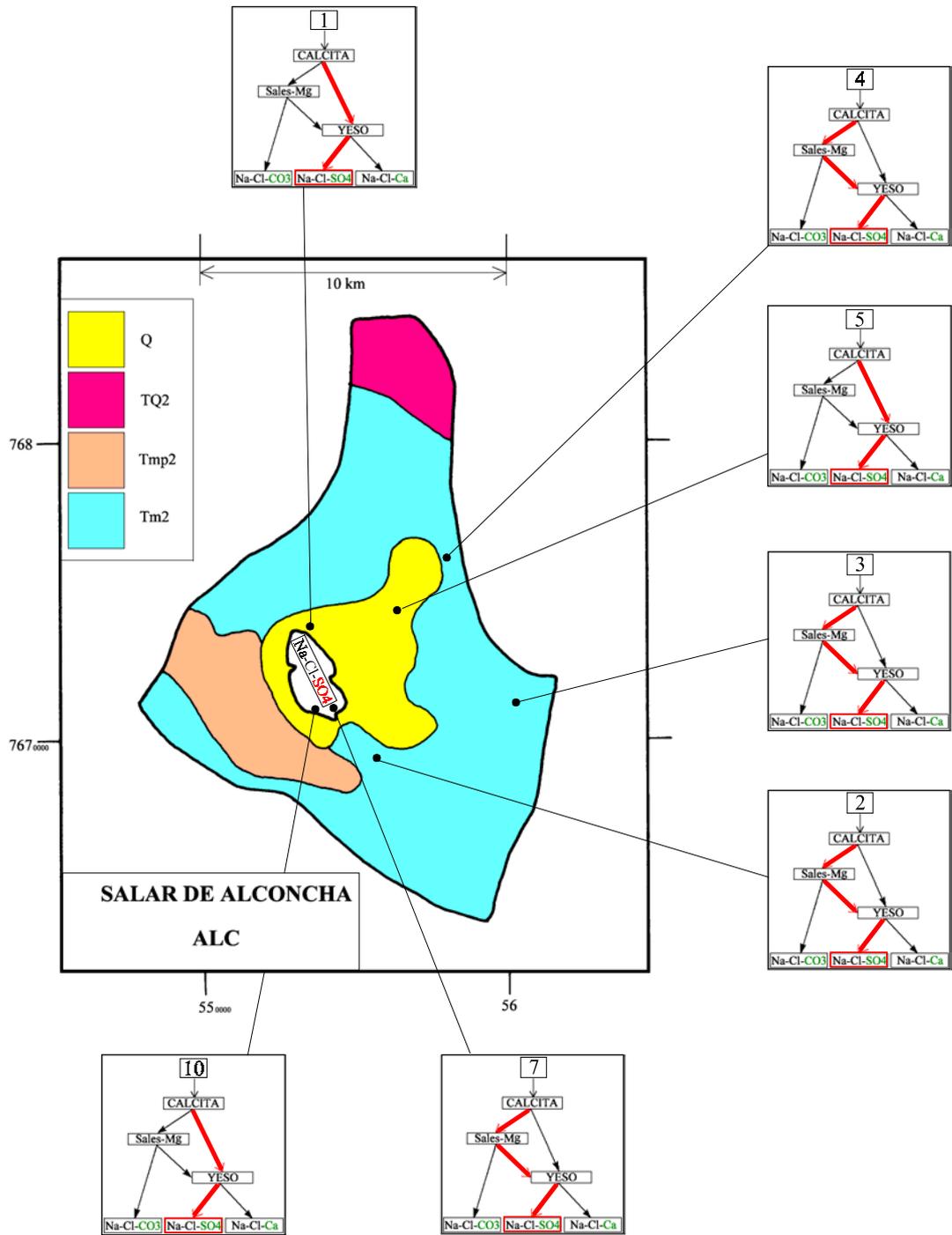
ALC

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.



SALAR DE CARCOTE

Introducción

La cuenca del salar de Carcote se encuentra al norte de la II Región. Colinda al sur con la cuenca del salar de Ascotán y al oeste con la cuenca del río Loa. Su hidrogeología ha sido investigada por Mardones (1977) y más recientemente por CODELCO- Chuquicamata, pero con información reservada. Sus principales características morfométricas y climatológicas son:

- altura: 3690 m
- superficie de la cuenca: 561 km²
- superficie del salar: 108 km²
- superficie de las lagunas 3 - 4 km²
- precipitaciones: 100 - 150 mm/año
- evaporación potencial: 1630 mm/año
- temperatura media: 5,8°C

Es un salar de tipo playa constituido de limos salinos y costras de sales. A unos decímetros de profundidad se encuentra una napa de salmuera. Existen varias lagunas superficiales generalmente ubicadas cerca de las orillas y alimentadas por vertientes al borde el salar. En época seca, la superficie total de estas lagunas apenas alcanza unos 4% de la superficie total del salar.

Aguas de aporte

Representamos en la figura 1 la composición química de todas las aguas de aporte de Carcote.

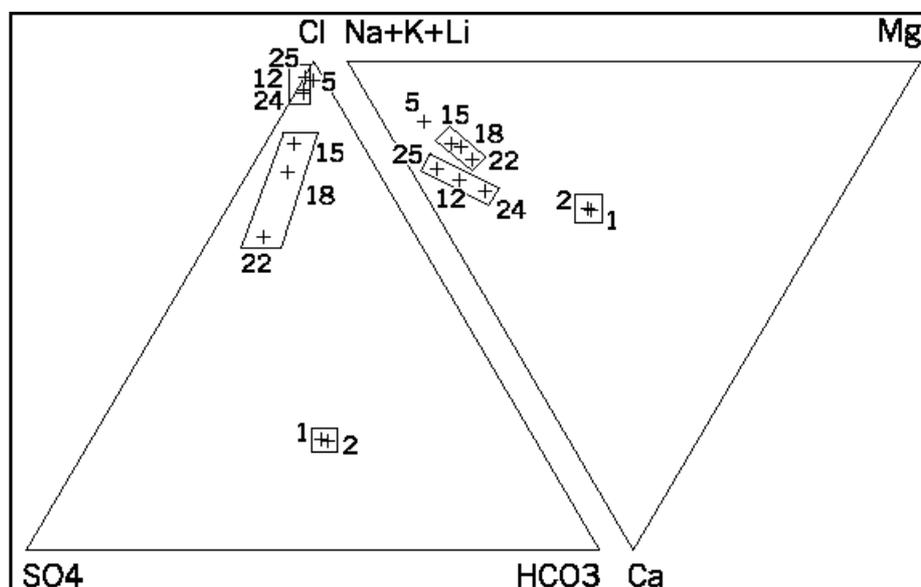


Fig.1. Composición de las aguas de aporte del salar de Carcote.

Se puede distinguir en estos diagramas triangulares cuatro tipos de aguas de aporte :

- aguas muy diluidas (110 mg/l STD) de vertientes ubicadas muy cuenca arriba (1 y 2). Son de tipo Na-Ca-Mg / $\text{HCO}_3\text{-SO}_4$, muy parecidas a las aguas diluidas de Michincha y Alconcha. Se infiltran antes de llegar al salar.

- aguas de mediana salinidad (700 - 1300 mg/l STD) de vertientes al norte del salar (15, 18, 22). Son de tipo Na-(Ca)-(Mg) / Cl-(SO_4).

- aguas de alta salinidad (7000 - 25 000 mg/l STD) de vertientes al sur del salar (12, 24, 25). Son de tipo Na-(Ca) / Cl.

- en la orilla oeste se encuentra una vertiente (5) de agua salobre (2900 mg/l STD) con más Cl y Na.

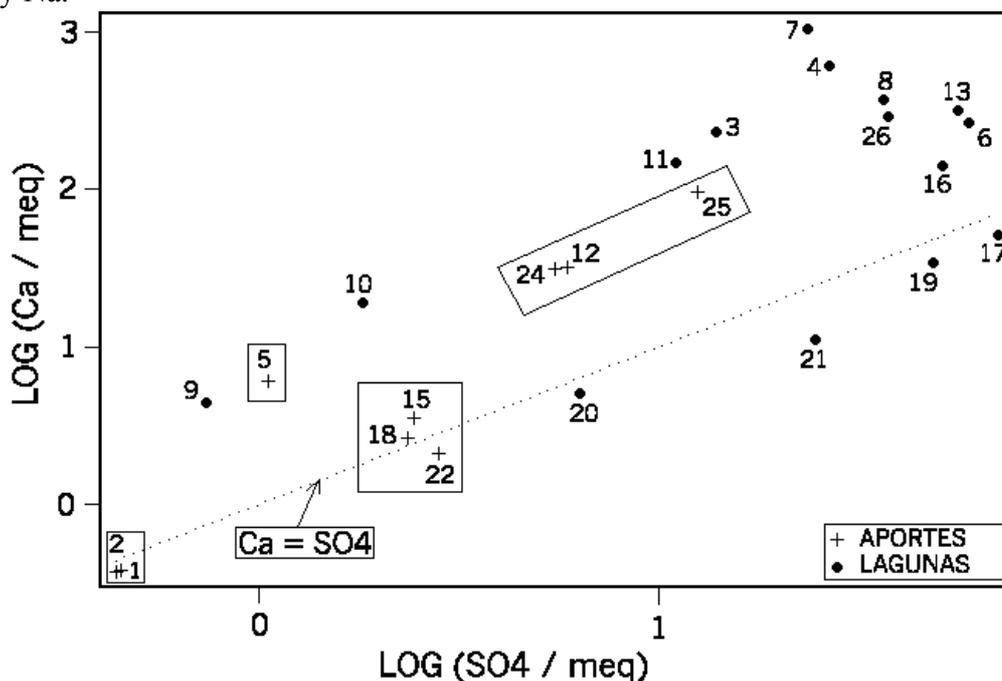


Fig.2. Relación entre Ca - SO_4 en las aguas de aporte y las salmueras del salar de Carcote.

A parte de las dos vertientes de agua muy diluidas (1 y 2), todos los demás aportes presentan una influencia termal, cualquier que sea su tipo químico. Sus temperaturas se escalonan entre 20° y 24° C. Las aguas de aporte se caracterizan también por su relación Ca versus SO_4 (Fig. 2). Las aguas del norte del salar (1, 2, 15, 18, 22) tienen sus puntos cerca de la recta de equimolaridad $\text{Ca} = \text{SO}_4$, mientras que las aguas de las orillas sur y oeste (5, 12, 24, 25) los tienen netamente por encima, lo que señala un contenido en Ca muy superior al de SO_4 .

Podemos finalmente reagrupar los cuatro tipos definidos anteriormente en dos grandes familias de aguas de aporte :

- aguas diluidas a medianamente salobres con $\text{Ca} \sim \text{SO}_4$, en el norte de la cuenca.
- aguas salobres a muy salinas con Ca superior a SO_4 al sur y al oeste de la cuenca.

Esta clasificación es la más relevante para la evolución de aguas por evaporación.

La figura 3 presenta la relación entre Cl y Na para todas las aguas y salmueras de Carcote. Se observa que tantos los puntos de aguas de aportes como los de lagunas y napas se alinean según una recta ligeramente distinta de la recta de equimolaridad. También hemos visto que las aguas de aporte más saladas tienen mucho más Ca que SO_4 . De eso se puede inferir que la alta salinidad

de los aportes al sur del salar no se debe a la habitual redisolución de yeso y halita en las formaciones geológicas de la cuenca.

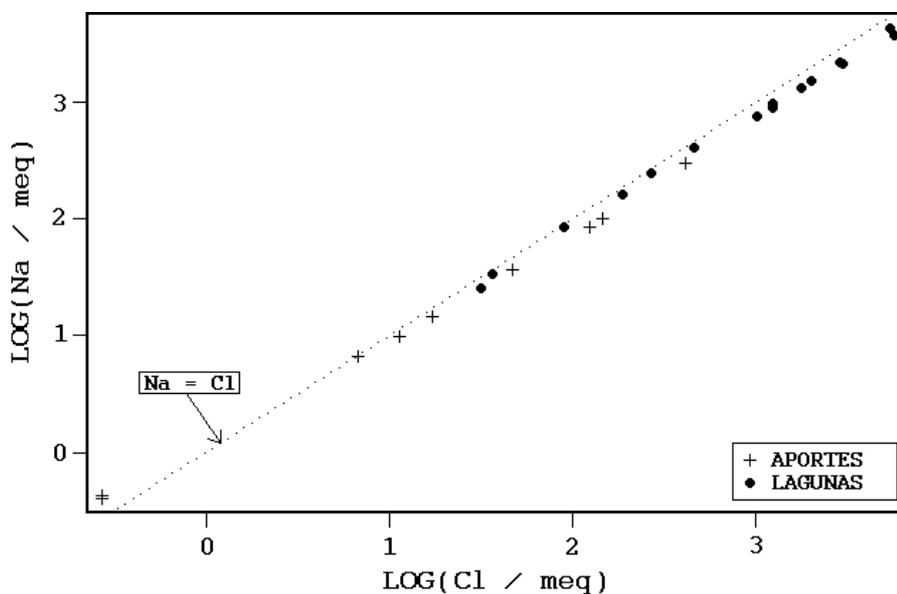


Fig.3 : Relación entre Na y Cl en las aguas de aporte y las salmueras del salar de Carcote.

La figura 4 presenta la relación Cl versus Na+Ca. Aquí se nota que conforme se van salinizando, las aguas de aporte tienen sus puntos acercándose a la recta de equimolaridad Na+Ca = Cl.

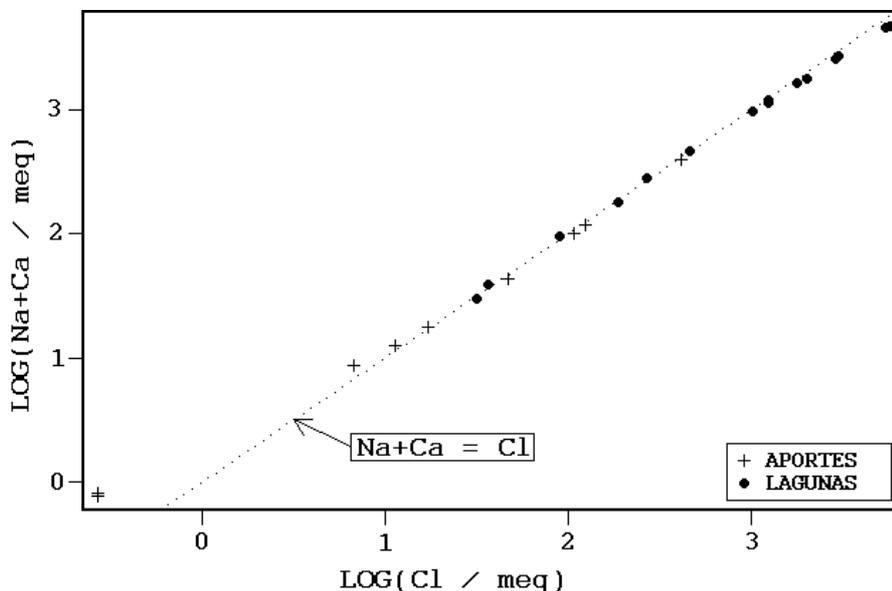


Fig.4 : Relación Na+Ca versus Cl en las aguas de aporte y las salmueras del salar de Carcote.

Esta última correlación sugiere que las altas salinidades de las aguas de aporte del sur provienen de la salinización de las napas de la cuenca por salmueras de tipo Na-Ca / Cl. No consideramos la posibilidad de redisolución de antiguas evaporitas de este tipo químico, puesto que el cloruro de calcio es una sal extremadamente soluble que solamente cristaliza a temperaturas muy bajas

(< - 40° C) no habituales en el área. No tenemos explicación para el origen de estas salmueras salinizantes, que también lo hacen a las aguas de aporte al salar de Ascotán.

Química de las lagunas y napas

Si se sigue estrictamente las normas de clasificación de aguas, las salmueras de Carcote son todas de tipo Na / Cl. Sin embargo, si observamos la figura 2 : Ca versus SO₄, notamos la existencia de dos tipos de salmueras según la posición de sus puntos en relación a la recta de equimolaridad Ca = SO₄. Cuatro soluciones se encuentran por debajo de la recta (17, 19, 20, 21) o sea, tienen más SO₄ que Ca (en meq/l). La más concentrada de estas aguas (17) tiene solamente 32 g/l de salinidad. Si se concentrara más estas soluciones, la precipitación del yeso induciría un aumento de la concentración en SO₄ en desmedro de Ca. Podemos entonces clasificar estas salmueras en el tipo Na / Cl-(SO₄). Al contrario, las salmueras cuyos puntos se encuentran por encima de la recta Ca = SO₄ son mucho más concentradas (hasta 330 g/l STD) y tienen mucho más Ca que SO₄. Son del tipo Na-Ca / Cl. Existen entonces dos tipos de aguas saladas en las napas y lagunas del salar :

- en la parte central y sur, las salmueras son del tipo Na-Ca / Cl. Se encuentran en los mismos sectores que las vertientes salobres y salinas con Ca > SO₄. Llegan hasta el centro - norte (3 y 4). Ocupan entonces la mayor parte del salar.
- en el extremo norte, las salmueras son de tipo Na / Cl-(SO₄) asociadas a las vertientes menos concentradas con Ca ~ SO₄.

Vías evolutivas y relación con la geología

Las aguas de aporte siguen al evaporarse, tres vías evolutivas que reflejan su composición química :

- las dos aguas muy diluidas cuenca arriba (1 y 2), siguen la vía alcalina sulfatada
- las dos vertientes (18 y 22) en el extremo norte, siguen la vía neutra sulfatada
- todas las vertiente al sur y oeste de salar siguen la vía neutra cálcica.

El agua (15) del extremo norte está clasificada en la vía neutra cálcica. Sin embargo, las concentraciones en Ca de las salmueras calculadas, son apenas superiores a las de SO₄. Se trata de un caso límite entre la vía neutra cálcica y la vía neutra sulfatada. Debemos recalcar también que Carcote es el salar más septentrional de Chile, que presenta netamente la vía evolutiva neutra cálcica.

Si bien estas vías evolutivas corresponden al tipo real de salmueras que se encuentran en el salar, no se relacionan tan bien con la geología de la cuenca de drenaje. Toda la cuenca está constituida de estrato-volcanes andesíticos y dacíticos y los dos más importantes, el Ollagüe y el Aucanquillcha, contienen yacimientos de azufre que han sido explotados. Con tal litología, las aguas de aporte deberían ser todas ricas en azufre y de vía evolutiva alcalina sulfatada o neutra sulfatada. Las salmueras de Carcote deberían ser todas de tipo Na / Cl-SO₄. En realidad existe solamente una pequeña parte del salar que responde a esta previsión : el extremo norte. La composición de las aguas de aporte de vía evolutiva neutra cálcica, no proviene de la alteración de las rocas de la cuenca de drenaje.

Evolución cuantitativa de aguas

En la tabla I presentamos la composición calculada de todas las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta la salinidad de cuatro de las salmueras más representativas del salar. 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 (CAR-xxE) y las salmueras reales CAR-n.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
<u>CAR-4</u>	7,06	4,52	107000	1280	426	15,8	49500	2880	136	12000	1990	
CAR-25E	7,34	3,16	105000	1250	385	14,8	48800	3710	146	12400	1780	0,010
CAR-12E	7,32	4,63	105000	1260	579	14,6	46600	3960	190	12200	2850	0,044
CAR-24E	7,32	3,58	107000	1130	406	14,4	44100	3070	138	13600	4200	0,057
CAR-5E	7,51	4,37	104000	2310	490	14,3	52800	4600	192	6240	2770	0,120
CAR-15E	7,60	5,46	101000	5570	587	14,2	53800	5270	150	2570	4100	0,421
CAR-18E	7,56	5,89	95100	11300	728	14,6	52400	6250	158	1360	4750	0,662
CAR-22E	7,70	8,06	79800	27600	839	17,5	50100	7030	145	774	5070	0,841
CAR-2E	7,58	10,3	37900	70400	1470	22,0	31500	18600	54,5	424	8160	1,400
CAR-1E	7,65	11,4	35800	72700	1380	22,1	31100	17600	44,2	468	8760	1,430
<u>CAR-6</u>	7,85	7,58	71700	2830	396	37,0	35400	2990	133	5330	2000	
CAR-5E	7,65	3,01	71100	2140	336	19,1	36200	3150	132	4510	1900	0,055
CAR-12E	7,50	3,21	72000	1620	397	19,4	31900	2710	130	8650	1950	0,093
CAR-25E	7,50	2,17	72100	1600	264	19,5	33400	2540	100	8770	1220	0,144
CAR-15E	7,77	4,29	68100	5430	408	19,1	36400	3570	101	2440	2770	0,157
CAR-24E	7,49	2,45	73300	1490	278	19,2	30200	2100	94,5	9620	2870	0,163
CAR-18E	7,85	6,14	64400	9060	532	19,5	35500	4240	107	1540	3220	0,319
CAR-22E	7,98	8,55	54400	19600	627	21,7	34200	4790	98,7	883	3460	0,542
CAR-2E	7,92	11,5	24200	50600	1030	25,6	22500	12100	34,7	553	5200	1,160
CAR-1E	7,95	12,3	23600	51000	1010	25,5	21700	11800	29,2	552	5790	1,200
<u>CAR-17</u>	8,41	5,02	16400	3350	101	35,3	9480	1100	23,6	1030	547	
CAR-15E	7,93	1,26	16700	3150	100	29,3	8930	876	24,9	1360	681	0,023
CAR-18E	7,98	1,59	15700	4150	130	29,4	8680	1030	26,2	1190	786	0,032
CAR-22E	8,07	2,17	13600	6350	157	30,0	8540	1200	24,7	831	863	0,090
CAR-12E	7,79	0,98	18600	1180	102	29,1	8220	698	33,6	2550	504	0,205
CAR-5E	7,94	1,17	19000	571	89,7	28,9	9650	841	35,1	1210	506	0,235
CAR-24E	7,77	0,78	18800	1280	71,3	29,1	7750	539	24,2	2840	737	0,246
CAR-25E	7,79	0,77	19000	753	69,4	20,4	8780	668	26,3	2450	320	0,325
CAR-2E	8,30	5,45	6240	13600	294	31,4	5820	3130	8,97	378	1360	0,678
CAR-1E	8,28	5,06	6090	13800	276	31,4	5600	3040	7,53	419	1500	0,699
<u>CAR-16</u>	7,02	9,00	195000	2440	386	7,56	101000	12500	339	2810	6850	
CAR-15E	6,94	3,92	179000	4060	937	6,20	95300	9340	265	2060	7270	0,124
CAR-5E	6,81	3,31	183000	913	784	6,38	92800	8090	338	9610	4870	0,283
CAR-18E	6,95	5,01	170000	16000	1200	6,50	93500	11200	282	609	8480	0,500
CAR-12E	6,51	3,31	187000	456	939	6,50	82600	7020	338	20800	5060	0,537
CAR-25E	6,83	4,11	183000	488	644	6,91	84700	6450	254	20700	3090	0,546
CAR-24E	6,64	4,21	198000	350	708	5,72	81600	5680	255	24400	7770	0,590
CAR-22E	6,90	5,52	165000	30600	1500	8,46	91800	14500	299	502	10500	0,651
CAR-2E	6,71	9,09	94800	99100	3310	13,0	43900	44500	136	78,6	20400	1,410
CAR-1E	6,80	10,2	90000	104000	3080	13,0	42800	42100	111	86,9	22000	1,440

Tabla 1. Comparación de la composición química de las aguas de aporte evaporadas con algunas salmueras del salar de Carcote. ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

La primera salmuera investigada es CAR-4, una laguna superficial sin ningún aporte visible cerca de la orilla centro-norte. Las aguas de aporte ubicadas justo cuenca arriba son las más diluidas (1 y 2). Sin embargo, notamos que el agua de aporte cuya evaporación produce la salmuera más

parecida es CAR-25, al otro extremo del salar. Su coeficiente de desviación es particularmente bajo. La correlación entre CAR-25E y CAR-4 es excelente. Las demás aguas de aporte del sur y del oeste del salar (12, 24, 5) también tienen buena correlación con CAR-4. Al contrario, las aguas muy diluidas (1 y 2) presentan un pésimo coeficiente de desviación. No son ellas las que producen las salmueras del centro norte del salar. La salmuera de la napa vecina CAR-3 presenta las mismas características que CAR-4.

CAR-6 es una salmuera de la laguna superficial alimentada por CAR-5. La simulación de evaporación muestra que la salmuera deriva bien de esta vertiente y que las aguas diluidas (1 y 2) no tienen relación con este sistema. CAR-17 es la salmuera de una laguna superficial del extremo norte de tipo Na / Cl-(SO₄). Las tres aguas de aporte que más se asemejan a (17), una vez evaporadas, provienen justamente de las vertientes del extremo norte (15, 18, 22). CAR-16 es una salmuera de napa justo al límite entre la zona central y el extremo norte. El agua de la vertiente (15), la más próxima, es la que más se acerca a la salmuera cuando se evapora. Pero el coeficiente de desviación no es tan bueno como los primeros de los grupos vistos anteriormente. Las aguas que siguen en el orden de similitud, provienen tanto del extremo norte como del sur y del oeste del salar. Finalmente, recalcamos que ninguna salmuera presenta una influencia de las aguas más diluidas que surgen en las laderas del principal volcán de la cuenca de drenaje. Esto sugiere que las napas diluidas superficiales que se descargan en esas vertientes no deben tener un flujo importante.

Calidad de aguas

En toda la cuenca, solamente las aguas muy diluidas de vertientes en las laderas del volcán Aucanquillcha son de buena calidad para cualquier uso, doméstico y agrícola. Lastimosamente las napas que las originan no parecen tener un flujo notable. La menos concentrada de las aguas de aporte del extremo norte (CAR-22 : 700 mg/l STD) tiene nueve veces más arsénico que lo máximo permisible. Las aguas de las orillas sur y oeste son totalmente impropias para cualquier uso potable o agrícola.

Balances hídricos

Tenemos suficientes datos para establecer el balance hídrico de cuatro lagunas de Carcote. Identificamos cada laguna por el número de su salmuera. Se utiliza el cloruro como elemento conservativo. Los parámetros considerados son para cada laguna :

Laguna	S (m ²)	H _e (m)	H _p (m)	C _{ap}	C _L
CAR-21	250 000	1,63	0,12	239 ⁽²²⁾	3210 ⁽²¹⁾
CAR-17	480 000	1,63	0,12	512 ⁽¹⁵⁺¹⁸⁾	16400 ⁽¹⁷⁾
CAR-6	280 000	1,63	0,12	1670 ⁽⁵⁾	71700 ⁽⁶⁾
CAR-13	460 000	1,63	0,12	4470 ⁽¹²⁾	63900 ⁽¹³⁾

Los números entre paréntesis en las columnas C_{ap} y C_L son los números de las muestras utilizadas. Los caudales de aporte y de infiltración están dados por :

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

- Volumen de infiltraciones : $V_i = S(H_e - H_p)/(1 - C_i/C_{ap}) \text{ m}^3/\text{año}$

Para cambiar a litros/segundos se dividen los $\text{m}^3/\text{año}$ por 31536. Los resultados están presentados en la figura 5. Los caudales de aporte corresponden prácticamente a los caudales de las vertientes que alimentan cada laguna.

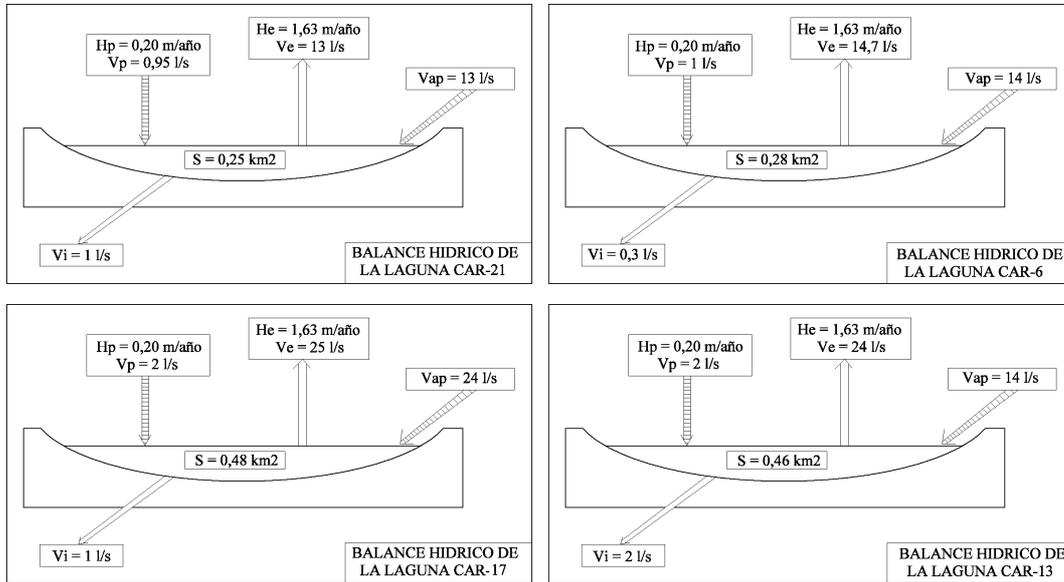


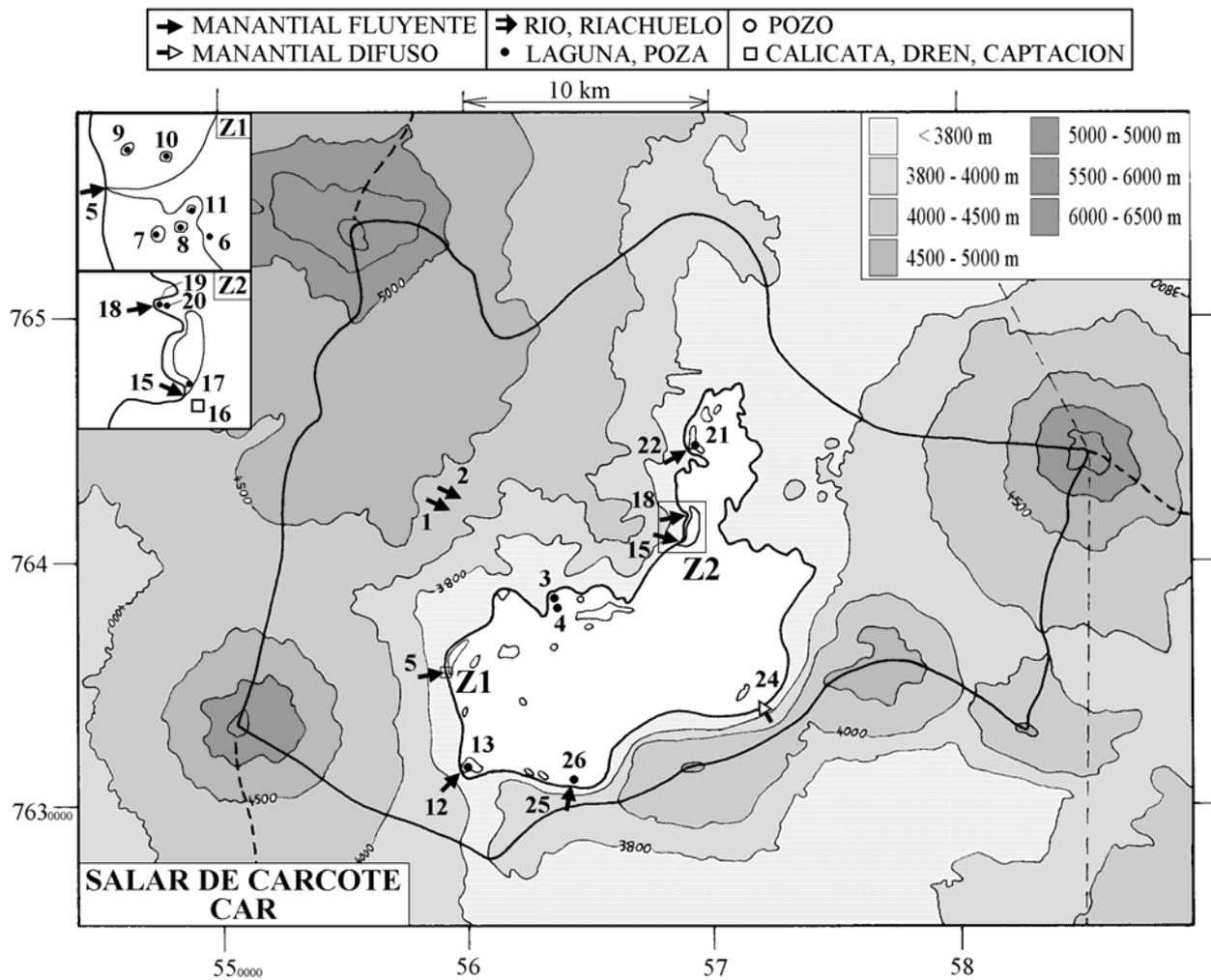
Fig.5 : Balances hídricos de cuatro lagunas del salar de Carcote.

Conclusiones

La cuenca de Carcote está dividida por su hidroquímica en dos partes, tanto en su cuenca de drenaje como en el salar mismo. Las vertientes del sur y oeste del salar son saladas, de tipo Na-(Ca) / Cl y Na / Cl y de vía evolutiva neutra cálcica. No provienen de la alteración de la cuenca de drenaje constituida de rocas volcánicas ricas en azufre. Estas aguas han sido salinizadas por salmueras de tipo Na-Ca / Cl de origen desconocido. Con excepción del extremo norte, la influencia de estas aguas se extiende a la mayor parte del salar, donde producen al evaporarse salmueras de tipo Na-Ca / Cl. En el norte del salar surgen aguas diluidas a salobres de tipo Na-Ca-Mg / HCO₃-SO₄ y Na-(Ca)-(Mg) / Cl-(SO₄), de vía evolutiva sulfatada. Estas aguas corresponden mejor con la litología de la cuenca de drenaje. Su influencia en el salar mismo se reduce al extremo norte donde producen salmueras sulfatadas. Las aguas diluidas en la ladera del volcán Aucanquillcha no tienen ninguna influencia sobre la química del salar, lo que sugiere que no son muy abundantes.

Referencias y estudios anteriores

Mardones, L. 1977. Geología e hidrogeología de los salares de Ascotán y Carcote, II Región, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad del Norte, Departamento de Geología, Antofagasta, 178p.



**SALAR DE CARCOTE
CAR**

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
CAR-1	06/10/94	10 ^H 30	559050	7642250	4100	Manantial corriente
CAR-2	06/10/94	11 ^H 00	559325	7642325	4100	Manantial corriente
CAR-3	06/10/94	12 ^H 20	563250	7638700	3690	Laguna
CAR-4	06/10/94	12 ^H 45	563300	7638525	3690	Napa ("ojo" en el salar)
CAR-5	06/10/94	14 ^H 15	559160	7634690	3691	Manantial corriente
CAR-6	06/10/94	14 ^H 30	559293	7634650	3690	Laguna
CAR-7	06/10/94	14 ^H 45	559231	7634650	3690	Poza
CAR-8	06/10/94	15 ^H 00	559260	7634664	3690	Poza
CAR-9	06/10/94	15 ^H 15	559185	7634735	3690	Napa (cateo)
CAR-10	06/10/94	15 ^H 25	559229	7634728	3690	Poza
CAR-11	06/10/94	15 ^H 40	559270	7634685	3690	Poza
CAR-12	06/10/94	16 ^H 40	560125	7631200	3691	Manantial corriente
CAR-13	06/10/94	17 ^H 00	560200	7631375	3690	Laguna
CAR-15	07/10/94	11 ^H 10	568900	7640815	3691	Manantial corriente
CAR-16	07/10/94	11 ^H 40	569100	7640800	3690	Napa (cateo)
CAR-17	07/10/94	12 ^H 25	569040	7640900	3690	Laguna
CAR-18	07/10/94	12 ^H 45	568750	7641775	3691	Manantial corriente
CAR-19	07/10/94	13 ^H 00	568755	7641775	3690	Napa (cateo)
CAR-20	07/10/94	13 ^H 25	568790	7641775	3690	Laguna muy superficial
CAR-21	07/10/94	14 ^H 30	569000	7644775	3690	Laguna
CAR-22	07/10/94	15 ^H 25	569150	7645250	3691	Manantial corriente
CAR-24	07/10/94	16 ^H 30	571625	7633875	3690	Manantial difuso
CAR-25	07/10/94	17 ^H 15	564400	7630975	3691	Manantial corriente
CAR-26	07/10/94	17 ^H 30	564625	7631200	3690	Laguna

**SALAR DE CARCOTE
CAR**

NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
CAR-1	141,0	12	11,5	1,000	7,58	0,485	9,55	0,030	0,0060	21,6	0,335	0,432	14,7	0,043	9,38	4,77	0,012	7,66	4,23
CAR-2	143,0	11,5	11,5	1,000	7,44	0,503	9,66	0,026	0,0053	21,0	0,040	0,454	16,9	0,041	9,45	4,85	0,014	7,54	4,13
CAR-3	80400	12	na	1,045	6,94	1,69	36600	4,67	0,608	662	1,36	162	21,9	0,34	17400	985	46,0	4570	654
CAR-4	172600	8	4,1	1,123	7,06	4,52	107000	10,3	0,355	1280	0,260	426	15,8	0,38	49500	2880	136	12000	1990
CAR-5	5280	22,9	7,1	1,002	7,21	0,866	1670	0,244	0,0143	50,4	3,61	7,92	19,6	0,011	856	74,3	3,10	122	44,7
CAR-6	135700	24,5	7,9	1,087	7,85	7,58	71700	7,56	0,211	2830	1,57	396	37,0	2,5	35400	2990	133	5330	2000
CAR-7	200000	22,5	0,5	1,220	6,38	24,5	202000	42,4	1,18	1120	2,23	1070	26,0	0,008	86000	10600	537	21100	8970
CAR-8	170100	24,8	3,8	1,119	7,12	8,78	103000	15,3	0,364	1740	0,905	384	31,1	0,029	51300	4220	189	7340	2940
CAR-9	3720	12,2	7,5	1,001	6,84	1,08	1130	0,181	0,0135	35,3	0,024	4,91	25,8	0,005	593	52,8	2,00	88,2	32,1
CAR-10	19140	20	na	1,009	7,82	3,90	6750	0,700	0,0586	87,4	0,118	24,4	18,2	0,026	3700	217	9,09	385	169
CAR-11	94800	19,5	10,8	1,053	7,70	4,78	44400	5,62	0,102	528	0,384	179	31,6	0,013	22600	1790	76,3	2930	1180
CAR-12	13000	24,2	5,4	1,006	7,08	1,92	4470	1,01	0,0538	283	1,90	24,5	18,2	0,44	1960	167	8,05	646	121
CAR-13	121400	10,1	8,4	1,078	7,74	9,62	63900	15,0	0,299	2680	1,98	397	29,4	8,2	31100	2690	131	6260	1770
CAR-15	2270	23,4	7,3	1,001	7,78	1,06	618	0,186	0,0360	117	0,601	3,72	30,0	0,30	334	32,5	0,923	71,0	25,3
CAR-16	200000	6,9	1,2	1,212	7,02	9,00	195000	10,4	0,110	2440	1,49	386	7,56	8,2	101000	12500	339	2810	6850
CAR-17	43300	21	11,3	1,024	8,41	5,02	16400	6,99	0,445	3350	0,180	101	35,3	9,0	9480	1100	23,6	1030	547
CAR-18	1710	23,1	8,3	1,001	7,58	1,01	405	0,205	0,0584	112	0,353	3,37	30,2	0,31	228	26,9	0,680	52,1	20,4
CAR-19	28800	14	na	1,015	8,08	3,06	9690	3,84	0,345	2320	0,180	66,0	34,7	6,8	5680	712	14,2	678	352
CAR-20	4790	26	4,8	1,002	9,01	1,45	1310	0,605	0,159	304	0,155	13,5	33,9	0,19	787	107	2,03	101	42,3
CAR-21	10600	21	6,0	1,006	8,92	1,17	3210	0,895	0,195	1180	0,130	16,9	30,2	0,58	1970	282	5,46	221	93,6
CAR-22	1200	20,3	7,7	1,000	7,59	0,970	239	0,177	0,0704	134	0,676	2,78	29,4	0,39	152	21,2	0,437	42,5	15,3
CAR-24	11500	24,3	5,5	1,005	6,87	1,93	3870	0,674	0,0622	263	0,688	14,7	37,0	0,19	1600	111	5,00	622	152
CAR-25	37800	21	6,6	1,019	7,44	0,899	14900	1,78	0,112	595	2,55	54,8	16,1	2,7	7020	528	20,8	1940	253
CAR-26	94300	15	8,8	1,055	7,52	2,63	44400	5,49	0,225	1790	0,750	168	33,0	8,2	20800	1480	62,8	5810	787

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

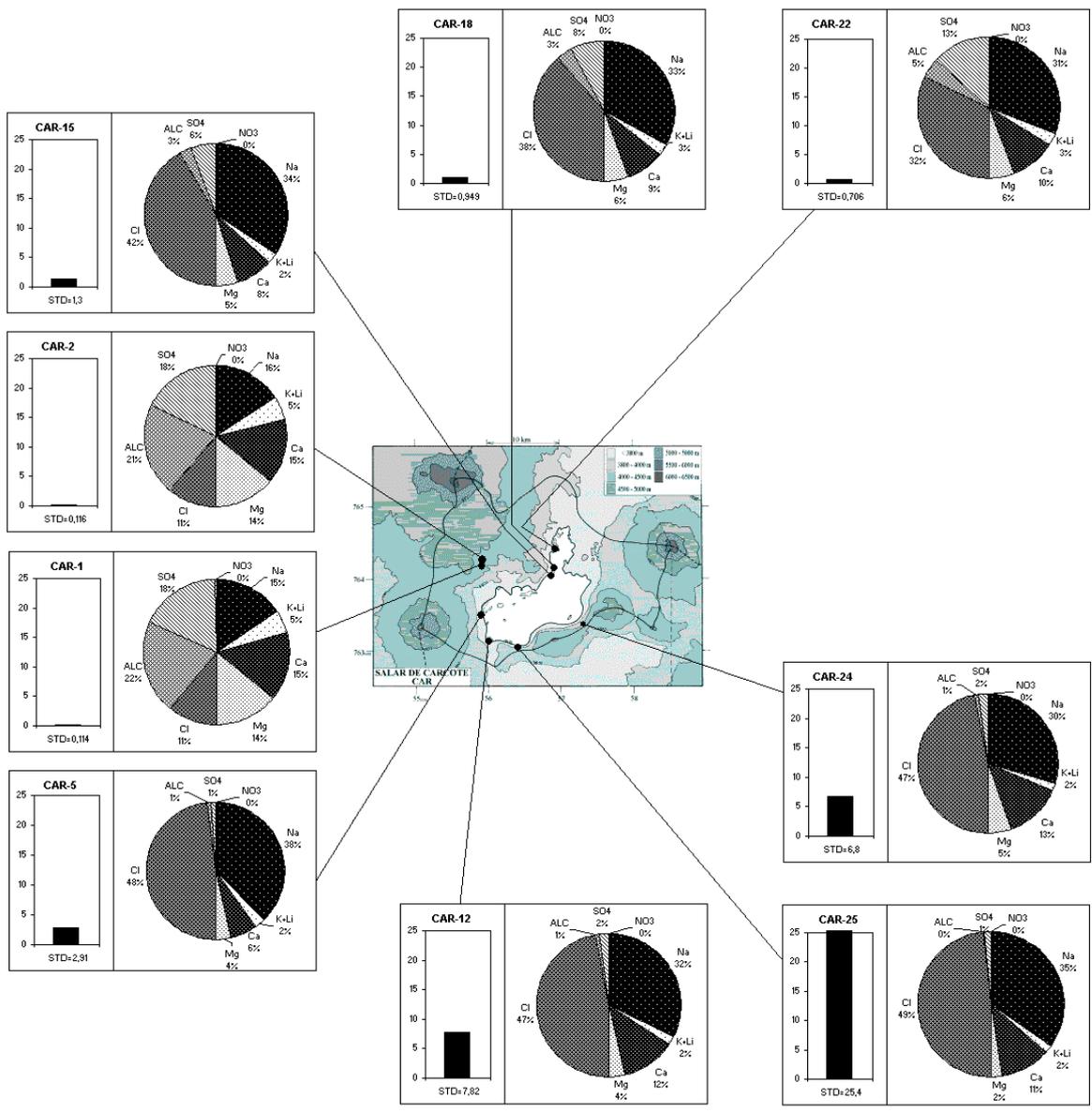
CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

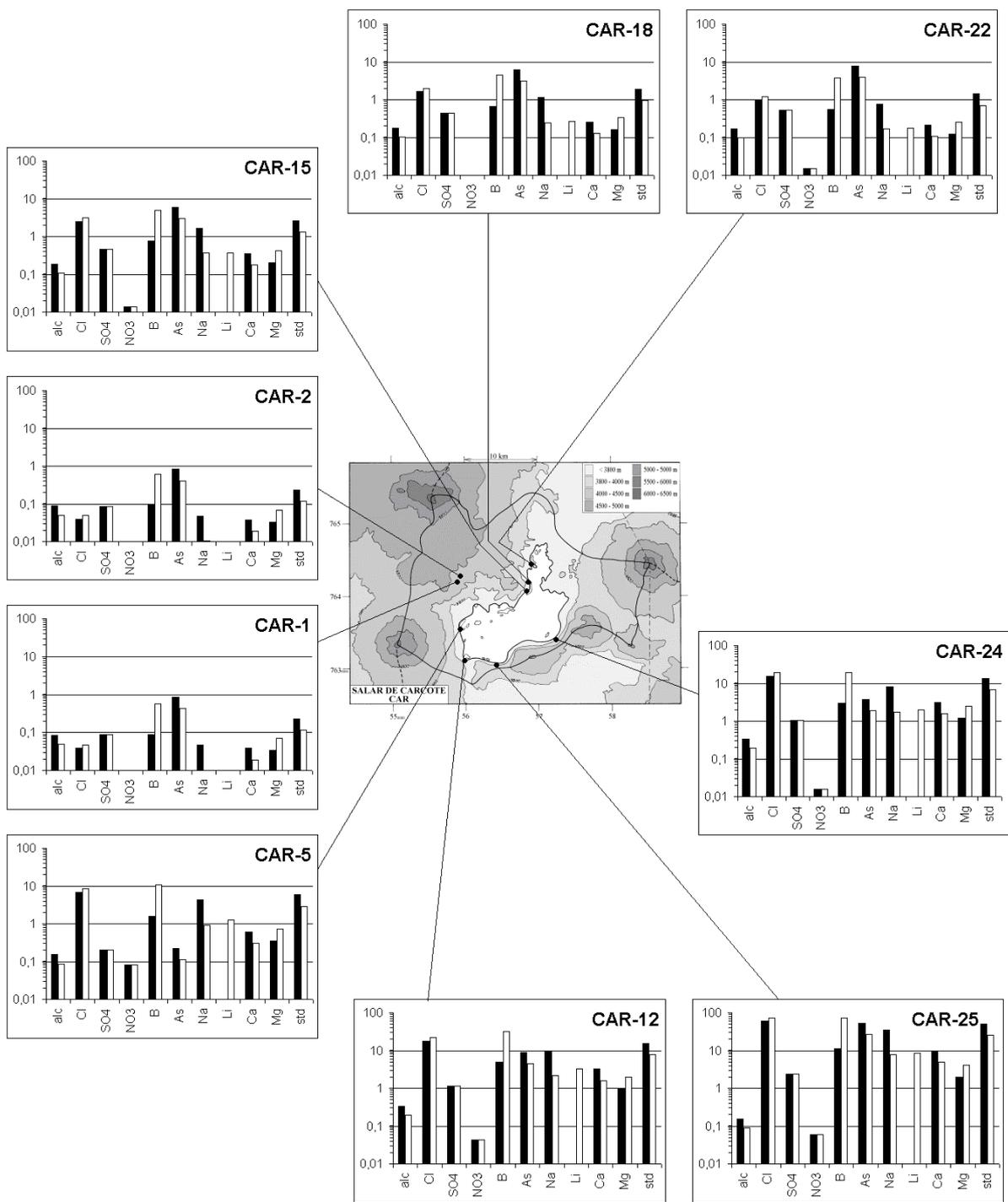
**SALAR DE CARCOTE
CAR**

NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF. %
CAR-1	113,7	29,3	0,06	1,4	1,262	1,209	4,2
CAR-2	116,2	30,5	0,06	2,1	1,253	1,214	3,2
CAR-3	61207	85,4	0,84	14	1072	1046	2,5
CAR-4	175699	134	5,94	21	3007	3051	1,4
CAR-5	2913	51,9	0,12	4,3	49,33	49,07	0,5
CAR-6	121326	-	-	-	2067	2087	1,0
CAR-7	333198	-	-	-	5875	5748	2,2
CAR-8	171623	335	20,5	29	2973	2945	1,0
CAR-9	2033	65,9	0,06	15	34,48	33,52	2,8
CAR-10	11595	221	4,14	4,0	200,9	195,7	2,6
CAR-11	73976	166	9,72	3,7	1282	1266	1,3
CAR-12	7823	114	0,60	11	132,7	133,9	0,9
CAR-13	109510	236	22,1	6,2	1896	1865	1,6
CAR-15	1304	62,2	0,54	1,4	21,08	20,91	0,8
CAR-16	322227	-	-	-	5483	5550	1,2
CAR-17	32422	123	15,9	0,53	539,8	537,8	0,4
CAR-18	948,9	60,1	0,30	2,2	14,97	14,76	1,4
CAR-19	19745	136	5,16	1,4	330,1	324,5	1,7
CAR-20	2787	30,0	5,16	0,04	45,75	44,59	2,6
CAR-21	7087	17,3	2,88	0,03	112,3	116,3	3,5
CAR-22	705,7	58,0	0,24	2,2	10,62	10,52	0,9
CAR-24	6796	117	0,36	19	116,6	116,4	0,1
CAR-25	25365	40,9	0,78	1,8	439,1	432,3	1,6
CAR-26	75474	78,1	3,90	3,1	1306	1290	1,2

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

CAR

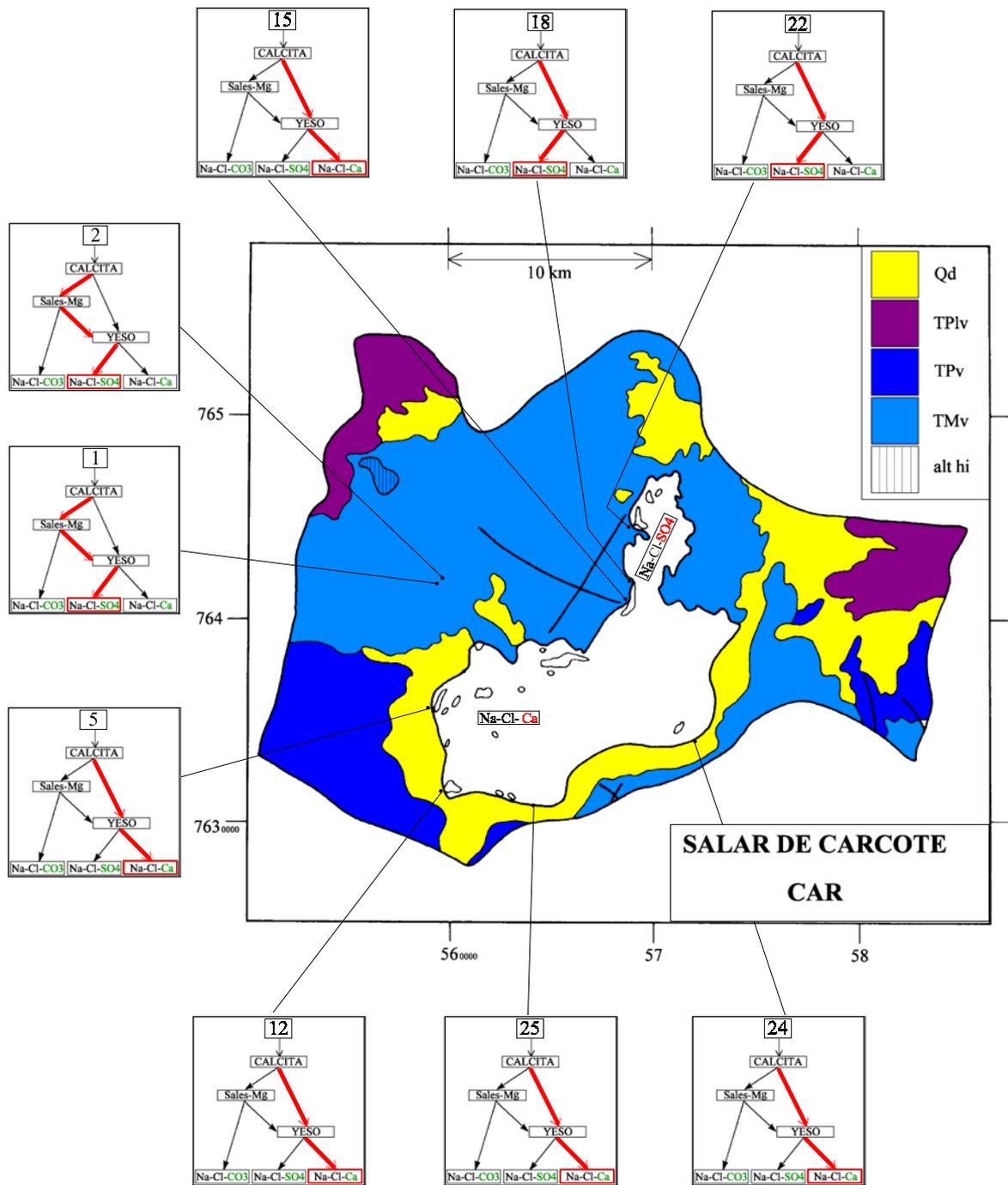
Qd : *Cuaternario*. Depósitos no consolidados.

TPlv : *Plioceno sup.* - Pleistoceno. Estrato-volcanes andesíticos y dacíticos.

TPv : *Plioceno*. Estrato-volcanes andesíticos moderadamente erosionados.

TMv : *Mioceno sup.* - Plioceno. Estrato-volcanes andesíticos intensamente erosionados.

alt hi : alteración hidrotermal.



SALAR DE ASCOTÁN

Introducción

El salar de Ascotán se encuentra en la II Región, al sur del salar de Carcote. Ambos salares se implantan en la parte más baja de una depresión flanqueada al este y al oeste por cadenas volcánicas terciarias y cuaternarias de orientación general norte-sur. Colinda al oeste con la cuenca del río Loa. Al este, la frontera con Bolivia no sigue la línea divisoria de aguas pues pasa dentro de la cuenca de drenaje de Ascotán. La geología y la hidrogeología de la cuenca han sido estudiadas detalladamente por el Proyecto CHI-535 de DGA y PNUD; Mardones, 1977; y más recientemente por CODELCO Chuquicamata (1994, 1996) que ha realizado más acabados estudios y perforado varios pozos a su alrededor para proveer de agua al yacimiento El Abra. Es un salar de tipo “playa” con limos salinos y costras de sales (yeso, halita). A unos decímetros debajo de la superficie se encuentra una napa de salmuera. Es una boratera donde se explota la ulexita cerca de la orilla centro-oeste (Cebollar; ASC-41). Se observa un complejo sistema de lagunas superficiales elongadas este-oeste o suroeste-noreste alimentadas por vertientes que surgen de la orilla oriental del salar. Lagunas más pequeñas y menos numerosas se encuentran cerca de la orilla oeste del salar. Las principales características morfométricas y climatológicas del salar son :

- altura: 3716 m
- superficie de la cuenca: 1757 km²
- superficie del salar: 243 km²
- superficie de las lagunas 18 km²
- precipitaciones: 100 - 150 mm/año
- evaporación potencial: 1630 mm/año
- temperatura media: 5,8°C

Una información actualizada (1998) proporcionada por Leonardo Mardónes (com. per.) da valores inferiores para las precipitaciones: 52,2 mm/año en Cebollar y 75,7 mm/año en Ascotán).

Aguas de aporte

La principal alimentación superficial al salar de Ascotán proviene de vertientes de aguas salobres que surgen en la orilla misma. Las vertientes de más flujo, que son también las más numerosas, se encuentran a lo largo de la orilla este. Se encontraron solamente dos vertientes de aguas muy diluidas en toda la cuenca (13 y 14) las que están cuenca arriba y se infiltran antes de llegar al salar. Hemos prelevado también aguas de napa todo alrededor del salar. Hay cuatro puntos que fueron muestreados dos veces, en julio y en octubre de 1994 (ASC -8 y 22; ASC-5 y 24; ASC-6 y 28; ASC-11 y 33) sin notar cambios significativos en las composiciones químicas. Descartaremos entonces las muestras dobles (22, 24, 28 y 33) de la discusión. La figura 1 presenta la composición química de los aportes en diagramas triangulares. Hemos distinguido los aportes por su ubicación geográfica : al este, al oeste y al sur del salar. Los aportes salobres del este del salar presentan sus puntos representativos bien agrupados. Son aguas de tipo Na-(Ca) / Cl. Con excepción de una (16), las aguas del sur del salar también son de tipo Na-(Ca) / Cl, pero se diferencian ligeramente de las aguas orientales por un leve aumento de HCO₃ y Na. El agua de

napa 16, que se encuentra mucho más al sur, es distinta. Es netamente más diluida (411 mg/l STD) que las aguas de la orilla sur del salar (1, 3, 15, 36 ; STD promedio = 2500 mg/l). Su tipo químico es Na-(Ca) / Cl-(HCO₃)-(SO₄). Las aguas de aporte del sector occidental de la cuenca tienen una composición mucho más variada. Se distingue un grupo homogéneo de cinco aguas (2, 17, 37, 38, 42) y cuatro otras de composición muy distinta :

- grupo principal : Na-(Ca)-(Mg) / Cl-(HCO₃)-(SO₄)
- ASC-13 : Na-Ca-Mg / HCO₃-(SO₄)
- ASC-14 : Na-Ca-Mg / SO₄-(HCO₃)
- ASC-44 : Na-Mg / HCO₃-(Cl)
- ASC-47 : Na / Cl-(HCO₃)

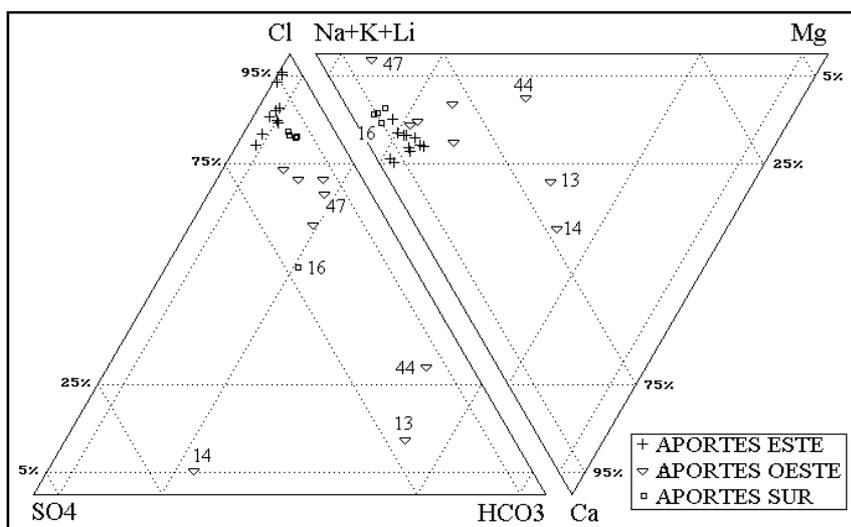


Fig.1. Composición de las aguas de aporte del salar de Ascotán.

Es sorprendente que las dos aguas de vertientes cuenca arriba (13 y 14), vecinas y de similar salinidad (~ 100 mg/l STD), tengan composiciones tan diferentes. De esta clasificación algo compleja de las aguas de aporte, el punto más importante a retener es que las aguas del oeste de la cuenca tienen un contenido porcentual más elevado en SO₄ que las aguas del este y del sur.

Casi todas las aguas de aporte de Ascotán tienen influencia termal aunque no se puede correlacionar el termalismo con ningún parámetro químico de las aguas. Solamente el contenido porcentual del magnesio parece disminuir cuando la temperatura aumenta, una característica observada más claramente en otras cuencas como Pintados.

La figura 2 presenta la relación entre Cl y Na para todas las aguas y salmueras de Ascotán. Se observa que tantos los puntos de aguas de aportes como los de lagunas y napas no se alinean exactamente sobre la recta de equimolaridad. La figura 3 presenta la relación Ca versus SO₄ y tampoco se observa una alineación de los puntos sobre la recta de equimolaridad Ca = SO₄. La figura 4 presenta la relación Cl versus Na + Ca en la cual se nota que las aguas de aporte del este del salar tienen sus puntos sobre la recta de equimolaridad Na+Ca = Cl. De eso se puede inferir que la alta salinidad de los aportes orientales no se debe a la habitual redisolución de yeso y halita en formaciones geológicas de la cuenca. Esta última correlación sugiere que las altas

salinidades de las aguas de aporte del este provienen de la salinización de las napas de la cuenca por salmueras de tipo Na-Ca / Cl. No consideramos la posibilidad de redisolución de antiguas evaporitas de este tipo químico puesto que el cloruro de calcio es una sal extremadamente soluble que solamente cristaliza a temperaturas muy bajas ($< - 40^{\circ} \text{C}$) no habituales en la zona. No tenemos idea del origen de estas salmueras salinizantes, las que también contaminan la mayor parte de las aguas de aporte en el salar de Carcote.

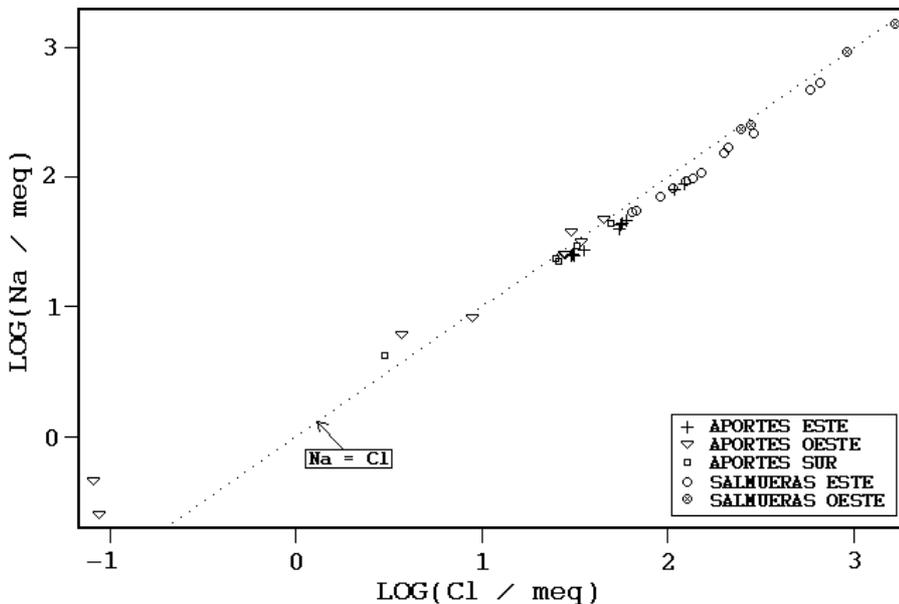


Fig.2 : Relación entre Na - Cl en las aguas de aporte y las salmueras de Ascotán.

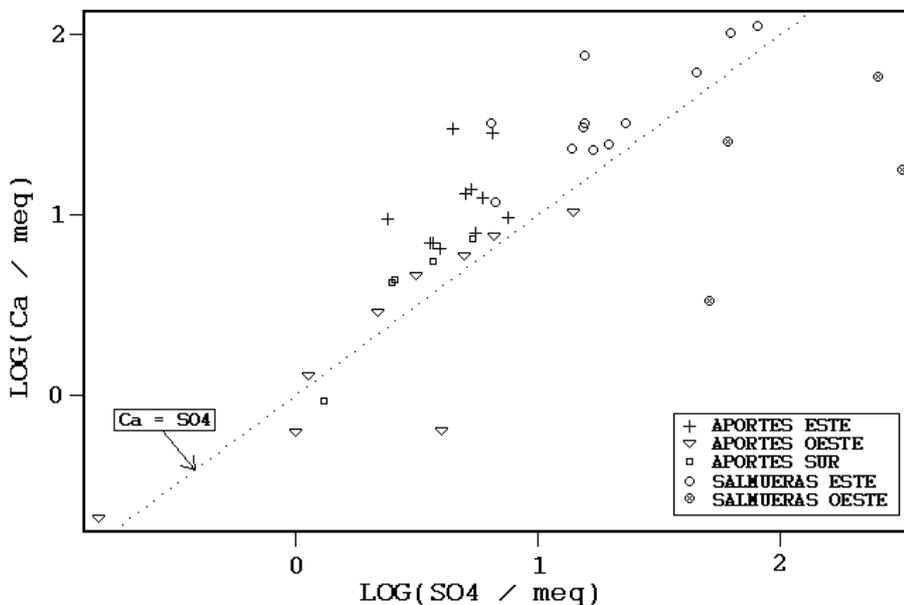


Fig.3 : Relación Ca versus SO_4 en las aguas de aporte y las salmueras de Ascotán.

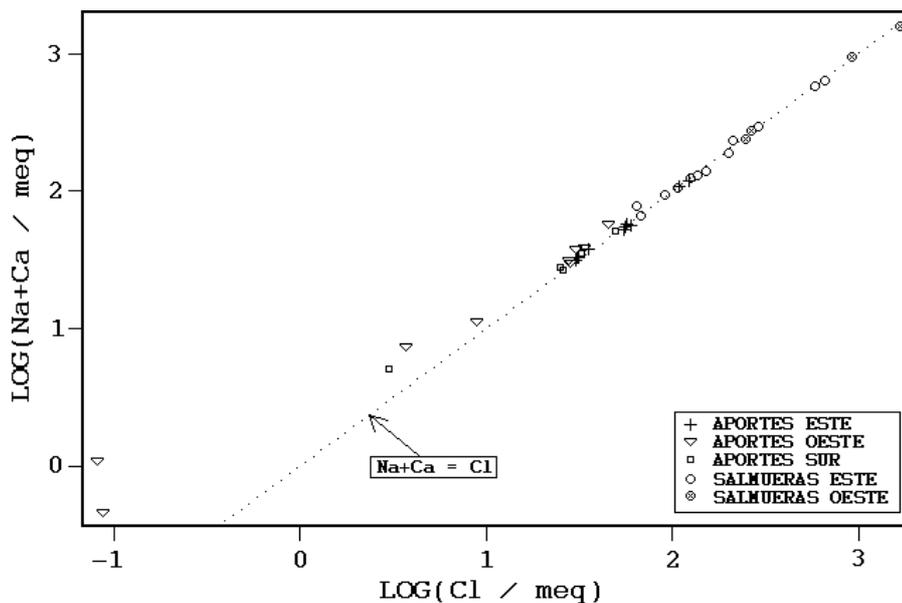


Fig.4 : Relación Na+Ca versus Cl en las aguas de aporte y las salmueras de Ascotán.

Química de lagunas y napas

Las salmueras de lagunas y napas de Ascotán no llegan a salinidades muy elevadas dando valores de 75 g/l STD para la laguna más salada (43) y 118 g/l para la napa (41) del salar. Si se sigue estrictamente las normas de clasificación de aguas, las salmueras de Ascotán son todas de tipo Na / Cl con pequeñas variaciones *aparentemente* no importantes en Ca y SO₄. Sin embargo, si observamos la figura 3 : Ca versus SO₄, notamos la existencia de dos tipos de salmueras según la posición de sus puntos en relación a la recta de equimolaridad Ca = SO₄.

Las soluciones cuyos puntos se encuentran por debajo de la recta Ca = SO₄ tienen más SO₄ que Ca (en meq/l). Podemos entonces clasificar estas salmueras en el tipo Na / Cl-(SO₄). Al contrario las salmueras cuyos puntos se encuentran por encima de la recta Ca = SO₄ tienen mucho más Ca que SO₄. Son del tipo Na-(Ca) / Cl. Existen entonces dos tipos de aguas saladas en las napas y lagunas del salar :

- las salmueras de las lagunas alimentadas a partir de las vertientes orientales son de tipo cálcico : Na-(Ca) / Cl. Debido a la gran extensión de estas lagunas, llegan casi hasta la orilla occidental (18, 40, 45).

- la napa del salar y las pequeñas lagunas alimentadas a partir de las vertientes occidentales son de tipo sulfatado : Na / Cl-(SO₄).

Vías evolutivas y relación con la geología

Las aguas de aporte siguen al evaporarse todas las vías evolutivas :

- cuatro aguas siguen la vía carbonatada. Tres se encuentran en el sector occidental (13, 44, 47) y una al extremo sur de la cuenca (16).

- cuatro aguas siguen la vía alcalina sulfatada (2, 17, 38, 42). También se encuentran en el sector occidental, mezcladas con las aguas de vía alcalina sulfatada.

- cuatro aguas siguen la vía neutra cálcica. Tres se encuentran al sur del salar (15, 36, 37) y la cuarta es una de las dos vertientes muy diluidas de la ladera occidental de la cuenca (14).

- Trece aguas siguen la vía neutra cálcica. Se encuentran todas en el sector oriental de la cuenca (ver Fig.5).

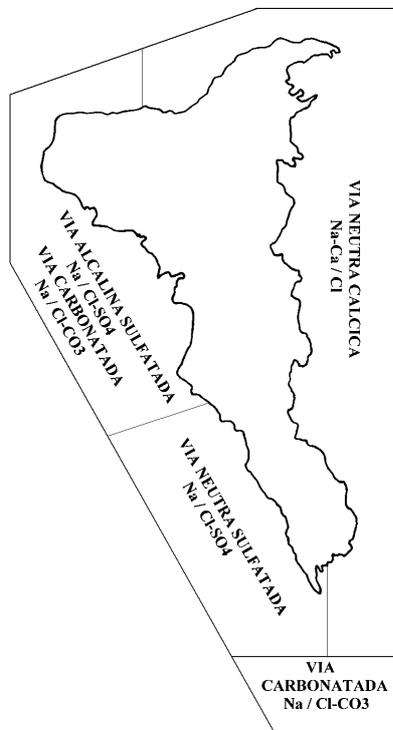


Fig.5 : Distribución de las vías evolutivas en la cuenca de Ascotán

Estas vías evolutivas corresponden bien al tipo real de salmueras que se encuentran en el salar : sulfatadas al oeste y cálcicas al este. Las aguas de vía evolutiva carbonatada, poco abundantes, se mezclan con aguas sulfatadas y no logran evolucionar hacia salmueras alcalinas. Sin embargo, cabe notar que ASC-47 es un agua salobre (2,9 g/l STD) de vía evolutiva carbonatada. Generalmente las aguas de aporte de vía carbonatada son muy diluidas. Esta alta salinidad sugiere que la napa en este sector ha sido evaporada siguiendo la vía carbonatada.

Al contrario, las vías evolutivas no se relacionan tan bien con la geología de la cuenca de drenaje. Toda la cuenca está constituida de estrato-volcanes andesíticos y dacíticos de los cuales los más importantes, el Ollague y el Cañapa, contienen yacimientos de azufre. Con tal litología, las aguas de aporte deberían ser todas ricas en azufre y de vía evolutiva alcalina sulfatada o neutra sulfatada. Las salmueras de Ascotán deberían ser todas de tipo Na / Cl-SO₄. En realidad existe solamente una parte del salar que responde a esta previsión y es la orilla oeste. La composición de las aguas orientales de aporte, de vía evolutiva neutra cálcica, no proviene de la alteración de las rocas de la cuenca de drenaje.

Relación con las cuencas bolivianas colindantes

La pregunta que se hace naturalmente para el origen de las aguas de aporte cálcicas del este de la cuenca de Ascotán es si ellas provienen de las vecinas cuencas bolivianas más elevadas. La figura 6 muestra la relación SO_4 versus Ca para las aguas del este de Ascotán y para todas las aguas de aporte y salmueras de los 7 salares bolivianos colindantes con Ascotán: Cañapa, Hedionda, Chiar Kota, Honda, Pujio, Ramaditas y Balivian (Risacher y Fritz, 1991).

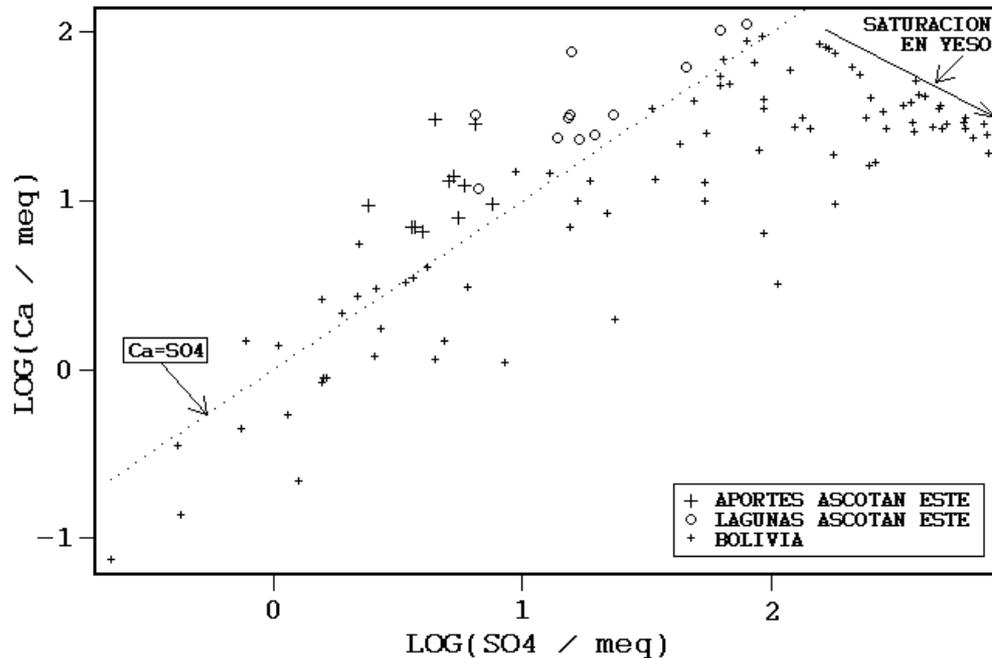


Fig.6 : Relación Ca versus SO_4 en las aguas del sector oriental de Ascotán y de las cuencas colindantes de Bolivia.

Las aguas de los salares bolivianos evolucionan todas hacia la vía sulfatada. Se observa la distribución de los puntos de las salmueras bolivianas más concentradas a lo largo de la línea de saturación del yeso. Estas salmueras se concentran todas en SO_4 en desmedro de Ca. Al contrario todas las salmueras *del sector oriental* de Ascotán son más concentradas en Ca que SO_4 . Todas provienen de la vía neutra cálcica. Las aguas del lado boliviano, al contrario que en Ascotán, están en buen acuerdo con la litología de la cuenca de drenaje: rocas volcánicas con azufre. Por lo tanto, no son estas aguas las que surgen en el lado oriental de Ascotán.

Evolución cuantitativa de aguas

En la tabla I presentamos la composición calculada de todas las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta la salinidad de dos salmueras representativas del salar. 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 (ASC-xxE) y las salmueras reales ASC-n.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
ASC-32	8,22	9,05	23300	3010	373	28,3	12200	1410	81,9	2050	790	
ASC-6E	7,83	1,90	24200	2850	210	27,7	11800	1210	63,3	2240	960	0,045
ASC-30E	7,81	1,93	24500	2580	221	27,7	11500	1200	58,7	2500	1010	0,053
ASC-11E	7,81	1,82	24500	2550	208	27,7	11600	1170	55,0	2520	974	0,064
ASC-5E	7,86	1,61	23900	3230	162	27,7	12200	1400	104	1940	774	0,069
ASC-26E	7,86	1,54	24100	3150	152	27,7	12200	1350	75,2	2000	827	0,072
ASC-4E	7,86	1,56	24000	3170	158	27,7	12400	1410	103	1970	682	0,074
ASC-8E	7,88	1,52	23800	3350	146	27,7	12500	1280	82,9	1870	746	0,080
ASC-9E	7,90	1,55	23500	3710	142	27,7	12700	1300	90,3	1690	741	0,091
ASC-10E	7,83	1,68	25500	1380	186	26,8	12500	1280	59,6	2140	700	0,114
ASC-37E	8,06	6,00	20600	5320	548	28,6	11800	1680	100	847	987	0,128
ASC-36E	8,10	6,14	22300	3280	542	28,5	12700	1600	112	679	704	0,128
ASC-1E	7,95	5,60	21600	3300	700	28,0	12400	1840	138	805	402	0,190
ASC-15E	8,00	6,06	21900	2980	693	28,0	12500	1840	140	636	517	0,200
ASC-3E	8,01	6,24	21900	2910	694	28,0	12600	1850	140	563	513	0,219
ASC-38E	8,31	8,73	20900	5060	491	28,7	12500	1680	93,0	269	1100	0,286
ASC-42E	8,28	3,62	23600	3490	157	28,2	13300	1610	56,8	291	1240	0,329
ASC-2E	8,28	4,40	20400	6830	210	28,3	12700	1680	44,0	319	1300	0,369
ASC-7E	7,73	0,85	25400	1820	88,8	27,8	12100	909	33,1	3580	260	0,399
ASC-19E	7,72	0,87	25800	1290	91,6	27,7	12200	914	37,0	3520	257	0,420
ASC-47E	9,62	83,9	19400	3420	366	39,9	14900	1690	73,0	0,93	3,69	0,819
ASC-16E	9,16	38,4	15500	9080	515	33,1	13500	2150	136	6,90	26,2	0,919
ASC-44E	9,92	206	13000	5370	309	52,4	13900	2870	33,0	0,44	1,67	1,020
ASC-14E	8,16	4,63	1910	28500	274	30,7	6980	1560	19,9	445	3450	1,060
ASC-13E	9,61	94,8	6740	16100	495	42,2	12500	2990	10,9	1,37	4,85	1,410
ASC-41	7,77	26,4	58600	12200	1030	55,2	35400	4890	245	1170	2410	
ASC-37E	7,33	4,62	56600	12300	1300	21,5	32500	4630	276	1180	2720	0,087
ASC-36E	7,30	4,01	59800	8640	1230	21,3	34100	4300	299	1590	1890	0,114
ASC-38E	7,64	6,76	56300	13600	1030	21,5	33500	4520	250	510	2960	0,147
ASC-3E	7,07	3,48	58800	7800	1620	20,2	33700	4960	376	1330	1370	0,176
ASC-15E	7,05	3,38	58700	7950	1630	20,3	33400	4940	376	1520	1390	0,178
ASC-2E	8,05	8,91	53900	18100	554	20,8	33400	4430	116	843	3390	0,208
ASC-1E	7,02	3,26	58400	7880	1680	20,4	33700	4990	375	1580	1090	0,211
ASC-42E	8,05	6,86	62500	9230	415	20,9	35000	4260	150	770	3230	0,212
ASC-9E	7,77	4,02	66100	5120	399	19,5	35600	3640	254	2530	2080	0,301
ASC-8E	7,74	3,95	66900	4200	409	19,5	35100	3580	232	3070	2090	0,354
ASC-5E	7,71	4,24	67000	3920	455	19,5	34300	3910	292	3280	2170	0,357
ASC-4E	7,71	4,07	67100	3790	441	19,5	34600	3960	288	3390	1910	0,374
ASC-26E	7,71	4,03	67400	3720	427	19,5	34300	3770	211	3470	2320	0,382
ASC-6E	7,65	5,13	67700	3090	587	19,4	33000	3380	177	4210	2680	0,418
ASC-30E	7,59	5,01	68200	2600	610	19,4	31900	3350	164	5050	2820	0,477
ASC-11E	7,61	4,93	68300	2570	578	19,4	32200	3250	153	5120	2710	0,492
ASC-10E	7,61	4,14	68200	2510	497	19,6	33400	3440	160	5220	1870	0,511
ASC-47E	9,77	208	52900	9340	567	38,3	40200	4610	199	0,62	2,27	0,863
ASC-19E	7,51	1,98	69700	1590	247	20,0	32900	2470	99,8	8700	692	0,947
ASC-7E	7,52	1,98	69700	1640	244	19,9	33200	2500	90,9	8420	714	0,948
ASC-14E	8,00	11,4	5150	75200	736	26,4	18800	4210	53,5	526	9290	0,951
ASC-44E	10,0	552	35000	14500	741	53,8	37500	7760	89,1	0,42	1,54	0,952
ASC-16E	9,29	56,2	43900	25600	445	28,8	37200	6080	385	4,16	14,7	0,974
ASC-13E	9,84	284	23900	36300	671	46,6	33100	10600	38,6	0,71	2,44	1,260

Tabla 1. Comparación de la composición química de las aguas de aporte evaporadas con dos salmueras de Ascotán. ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

ASC-32 es una salmuera del sistema lagunar al este del salar. Las aguas de aporte cuya evaporación produce las salmueras más parecidas provienen todas del sector este del salar con coeficientes de desviación mínimos ($< 0,1$). Las que más discrepan son las aguas de aporte del sector occidental, en particular las aguas de vía evolutiva carbonatada. Todas las demás aguas del gran sistema lagunar tienen el mismo origen.

ASC-41 es la napa subterránea del sector occidental del salar precisamente donde se explota la ulexita. Las aguas de aporte que más se asemejan a esta salmuera cuando se evaporan provienen del sur-oeste del salar, es decir el sector marcado en la figura 5 con la vía evolutiva neutra sulfatada. Esto sugiere un flujo subterráneo globalmente de sur a norte. Aquí también, las aguas que más discrepan son las de vía evolutiva carbonatada.

Relación con la cuenca de Carcote

En la orilla sur del salar de Carcote surgen vertientes saladas (CAR-12, 24, 25). Se supone generalmente que provienen de infiltraciones de salmueras del salar de Ascotán. Las aguas de vertientes CAR-12 y 24, que son las más representativas de la alimentación del sur de Carcote, son muy parecidas, tanto en salinidad (7 g/l STD) como en composición (cálcica), a las aguas de napas y vertientes del nor-este de Ascotán (ASC-7, 19). Esta similitud no implica una comunicación de una cuenca a la otra, sino solamente un origen común, probablemente afuera de las dos cuencas. Sin embargo, hemos encontrado una vertiente fluyente, CAR-25, de salinidad netamente más elevada (25 g/l STD), lo que plantea un problema en cuanto a su origen. Vamos a comparar la composición de esta vertiente salada de Carcote con aguas evaporadas de la cuenca de Ascotán (Tabla 2). ASC-20 y 21E son aguas evaporadas de lagunas al norte del salar, es decir cerca de Carcote.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
CAR-25	7,44	0,899	14900	595	54,8	16,1	7020	528	20,8	1940	253	
ASC-19E	7,82	0,678	14700	731	52,0	30,0	6920	519	21,0	2000	146	0,070
ASC-7E	7,82	0,662	14300	1150	50,0	30,1	6810	512	18,7	2070	147	0,109
ASC-20E	7,75	0,632	14400	1010	52,0	41,4	6810	521	19,6	2070	150	0,131
ASC-21E	7,72	0,625	14400	1050	52,9	45,6	6740	526	21,4	2120	154	0,147
ASC-8E	7,92	1,00	12800	2770	78,2	30,2	6720	686	44,5	1410	401	0,309
ASC-9E	7,93	1,02	12600	2960	76,2	30,2	6800	696	48,5	1320	398	0,334
ASC-42E	8,37	2,88	13400	1980	89,0	30,5	7510	914	32,2	166	710	0,601
ASC-2E	8,37	3,31	11600	3870	119	30,6	7170	951	24,9	182	744	0,724
ASC-44E	9,84	115	7260	3010	173	49,0	7790	1610	18,5	0,47	1,8	1,340

Tabla 2. Comparación de la composición química de aguas evaporadas del norte de Ascotán con la salmuera de la vertiente salada CAR-25 de Carcote. ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

Se observa una buena correlación entre las aguas evaporadas del sector noreste de Ascotán (19, 7, 20, 21), en particular la vertiente ASC-19, con la vertiente salada de Carcote. Al contrario, las aguas de Ascotán de los sectores norte y oeste, aunque más cercanas de CAR-25, no tienen relación con el agua de Carcote. Es probable que las salmueras cálcicas del noreste de Ascotán se infiltran hacia Carcote, pero no las salmueras sulfatadas, aunque más cercanas. La vertiente CAR-25 tiene un flujo muy débil. Alimenta una pequeña laguna superficial de superficie máxima de 10 000 m². El balance hídrico de esta lagunita da un caudal entrante de 0,7 l/s. Eso sugiere que las infiltraciones de Ascotán hacia Carcote son mínimas y no influyen en el balance hídrico del salar de Carcote.

Calidad de aguas

La cuenca de Ascotán se caracteriza por la mala calidad de sus aguas. Se ha encontrado solamente 4 aguas de calidad aceptable para el consumo humano (2, 13, 14, 44) las que se encuentran todas al nor-oeste del salar en el sector de vías evolutivas carbonatada y alcalina sulfatada (ver figura 5). Las aguas (13) y (14), de las dos únicas vertientes cuenca arriba, son de excelente calidad. Sin embargo, no parecen tener mucha influencia en la hidroquímica del salar. La importancia hidrogeológica de las napas que las originan debe ser mínima. Las aguas (2) y (44) son al límite de potabilidad, pero tienen demasiado boro para el uso agrícola. El agua de napa (16), al sur del salar, es bien diluida (411 mg/l STD) y hubiera constituido una excelente agua potable si no fuera por su alto contenido en arsénico : 0,65 mg/l, o sea 13 veces más que la concentración máxima autorizada.

Balance hídrico

Podemos intentar establecer, a nivel de orden de magnitud, el balance hídrico del sistema lagunar de Ascotán. Hemos visto que las salmueras provienen bien de la evaporación de las vertientes que las alimentan superficialmente. No se ha detectado ningún indicio de otra alimentación. Consideramos separadamente los dos conjuntos lagunares, oriental y occidental. El volumen de aporte que se puede estimar corresponde entonces al total del flujo superficial entrante por cada orilla, oriental y occidental. Los cálculos corresponden a promedios, no a los valores individuales de cada laguna, lo que además no tiene mucha importancia para la estimación de los flujos entrantes, pero sí para las infiltraciones. Se utiliza el cloruro como elemento conservativo. Los parámetros considerados son :

- $H_e = 1,63$ m/año
- $H_p = 0,12$ m/año

+ sistema lagunar oriental :

- $S = 14$ km²
- $C_{ap} = 1,94$ g/l (promedio ASC-5, 6, 8, 11, 19, 26, 30)
- $C_L = 23,3$ g/l (laguna más concentrada ASC-32)

Volumen de aporte : $V_{ap} = S(H_e - H_p)/(1 - C_{ap}/C_L) = 23 \times 10^6$ m³/año = 731 l/s

Volumen de infiltraciones : $V_i = S(H_e - H_p)/(1 - C_L/C_{ap}) = 1,9 \times 10^6$ m³/año = 61 l/s

+ sistema lagunar occidental :

- $S = 4$ km²
- $C_{ap} = 1$ g/l (promedio ASC-36, 37, 38, 42, 44)
- $C_L = 17$ g/l (promedio ASC-39, 43, 46)

Volumen de aporte : $V_{ap} = S(H_e - H_p)/(1 - C_{ap}/C_L) = 6,5 \times 10^6$ m³/año = 203 l/s

Volumen de infiltraciones : $V_i = S(H_e - H_p)/(1 - C_L/C_{ap}) = 0,4 \times 10^6$ m³/año = 11 l/s

El flujo obtenido de 731 l/s para la sola orilla oriental es importante. En comparación, el flujo superficial por la ladera oeste del salar es bajo. V_i representa infiltraciones de las lagunas en los sedimentos hacia la napa subterránea del salar y no afuera de la cuenca de Ascotán. El coeficiente de escurrimiento (razón entre el volumen caído y el volumen entrante) en la ladera occidental es de 0,11 mientras que el de la ladera oriental es de 0,32, un valor muy elevado. Esto también

confirma que las aguas cálcicas de napas y vertientes de la ladera oriental no provienen de las únicas precipitaciones sobre la cuenca de drenaje.

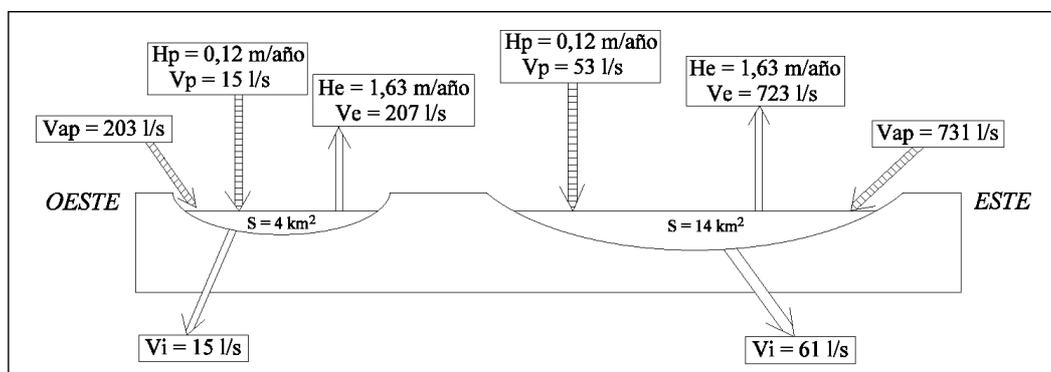


Fig.7 : Balance hídrico de los sistemas lagunares del salar de Ascotán.

Conclusiones

El salar de Ascotán se divide en dos partes. El sector oriental se caracteriza por aguas de aporte salobres de tipo Na-(Ca) / Cl y de vía evolutiva neutra cálcica en completa discrepancia con la litología de la cuenca de drenaje constituida de rocas volcánicas con azufre. El origen de estas aguas es desconocido. No provienen de las napas superficiales de las cuencas bolivianas colindantes. Las numerosas vertientes del sector oriental tienen un caudal total muy elevado de 730 l/s y alimentan un complejo sistema lagunar produciendo salmueras de tipo Na-(Ca) / Cl. Ninguna de las aguas de aporte de este sector tiene una calidad aceptable para el uso doméstico o agrícola.

El sector occidental se caracteriza por aguas de aporte con salinidad y composición variada, y de contenido porcentual en SO_4 más elevado que el de las aguas del sector oriental. Todas siguen las vías evolutivas sulfatadas, en buen acuerdo con la litología de la cuenca. El caudal entrante por este sector, 200 l/s, es muy inferior al del sector oriental. Alimentan solamente pequeñas lagunas adyacentes a la orilla y también la napa subterránea del oeste del salar produciendo salmueras de tipo : Na / Cl-(SO_4). Es en este sector que se encuentran las únicas aguas aprovechables para el uso humano y agrícola.

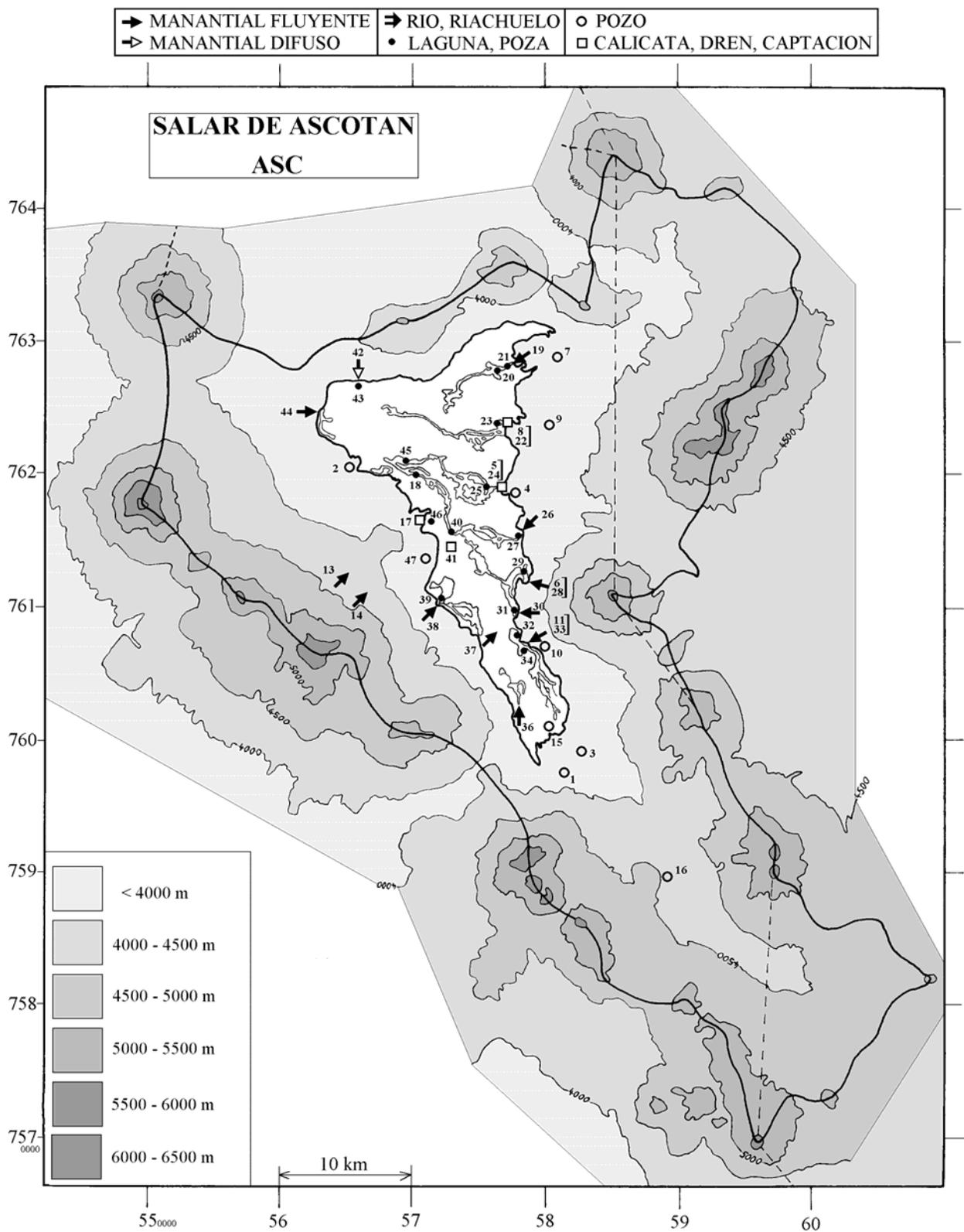
Referencias y estudios anteriores

CODELCO 1994. Salar de Ascotán. Antecedentes técnicos. División Chuquicamata. Recopilación de informes, Enero de 1994.

CODELCO 1996. Caracterización hidrogeológica, cuenca salar de Ascotán. Pozos Naciones Unidas. Expediente DGA ND-II-542, 44p.

Mardones, L. 1977. Geología e hidrogeología de los salares de Ascotán y Carcote, II Región, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad del Norte, Departamento de Geología, Antofagasta, 178p.

Mardones, L. 1997. Características isotópicas de las aguas subterráneas entre los paralelos 21° y 24° latitud sur, con énfasis en el salar de Ascotán. Coloquio Internacional: El Recurso Agua en los Andes, Orstom - Universidad Católica del Norte, 10-13 de junio de 1997, Antofagasta.



SALAR DE ASCOTAN

ASC

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
ASC-1	01/07/94	09 ^H 40	582547	7598026	3760	Napa (pozo CHU-46 = ASB-1)
ASC-2	01/07/94	10 ^H 50	565136	7620662	3720	Napa (pozo ASB-40)
ASC-3	01/07/94	15 ^H 45	583153	7599119	3750	Napa (pozo CHU-62 = ASB-2)
ASC-4	01/07/94	12 ^H 50	576722	7618906	3728	Napa (pozo SA7-1)
ASC-5	01/07/94	13 ^H 05	576600	7618950	3716	Napa (dren)
ASC-6	01/07/94	13 ^H 50	578890	7611790	3718	Manantial corriente
ASC-7	01/07/94	11 ^H 40	580657	7628209	3727	Napa (pozo SA1-2)
ASC-8	01/07/94	12 ^H 00	577223	7624023	3718	Napa (dren)
ASC-9	01/07/94	12 ^H 30	580317	7623234	3767	Napa (pozo ASE-15)
ASC-10	01/07/94	14 ^H 50	579070	7606929	3720	Napa (pozo CHU-28)
ASC-11	01/07/94	15 ^H 00	579200	7606800	3718	Manantial corriente
ASC-13	05/10/94	11 ^H 15	564625	7612425	4250	Manantial corriente (Cebollar)
ASC-14	05/10/94	15 ^H 15	565750	7610975	4250	Manantial corriente
ASC-15	05/10/94	15 ^H 40	580775	7601325	3716	Napa (pozo)
ASC-16	05/10/94	16 ^H 10	589905	7589406	4280	Napa (pozo Perdiz)
ASC-17	06/10/94	18 ^H 00	570725	7616600	3716	Napa (cateo)
ASC-18	08/10/94	09 ^H 25	569975	7619900	3716	Laguna
ASC-19	08/10/94	10 ^H 40	577550	7628250	3718	Manantial corriente
ASC-20	08/10/94	11 ^H 15	577000	7628000	3716	Laguna
ASC-21	08/10/94	11 ^H 25	577125	7628225	3716	Laguna
ASC-22	08/10/94	11 ^H 50	577223	7624023	3718	Napa (dren = ASC-8)
ASC-23	08/10/94	12 ^H 30	576375	7624125	3716	Laguna

**SALAR DE ASCOTAN
ASC**

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
ASC-24	08/10/94	14 ^H 20	576600	7618950	3716	Napa (dren = ASC-5)
ASC-25	08/10/94	15 ^H 00	575750	7619125	3716	Laguna
ASC-26	08/10/94	15 ^H 25	578100	7616300	3718	Manantial corriente
ASC-27	08/10/94	16 ^H 00	577650	7616000	3716	Laguna
ASC-28	08/10/94	16 ^H 25	578890	7611790	3718	Manantial corriente = ASC-6
ASC-29	08/10/94	17 ^H 00	578375	7611875	3716	Laguna
ASC-30	08/10/94	17 ^H 20	578000	7610125	3718	Manantial corriente
ASC-31	09/10/94	10 ^H 45	577575	7610075	3716	Laguna
ASC-32	09/10/94	11 ^H 30	578300	7607750	3716	Laguna
ASC-33	09/10/94	12 ^H 10	579200	7606800	3718	Manantial corriente = ASC-11
ASC-34	09/10/94	12 ^H 50	579425	7606375	3716	Laguna
ASC-36	09/10/94	14 ^H 35	578000	7603300	3718	Manantial corriente
ASC-37	09/10/94	15 ^H 30	575625	7608425	3716	Manantial corriente
ASC-38	09/10/94	16 ^H 25	571800	7610575	3718	Manantial corriente
ASC-39	10/10/94	10 ^H 00	572000	7610925	3716	Laguna
ASC-40	10/10/94	10 ^H 30	573150	7615825	3716	Laguna
ASC-41	10/10/94	11 ^H 15	572650	7614825	3716	Napa (cateo)
ASC-42	10/10/94	12 ^H 20	565000	7627000	3716	Manantial difuso
ASC-43	10/10/94	12 ^H 40	564950	7626700	3716	Laguna
ASC-44	10/10/94	14 ^H 15	562650	7623950	3717	Manantial corriente
ASC-45	10/10/94	14 ^H 40	568450	7621125	3716	Laguna
ASC-46	10/10/94	15 ^H 40	571075	7616700	3716	Laguna
ASC-47	10/10/94	16 ^H 30	570750	7613750	3730	Napa (pozo 6)

SALAR DE ASCOTAN

ASC

NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
ASC-1	4380	42	na	1,002	6,72	3,72	1160	1,48	0,359	179	0,533	39,6	54,3	1,3	679	99,7	7,50	111	21,7
ASC-2	1560	14	na	1,001	7,74	3,51	315	0,123	0,039	105	0,849	3,22	21,1	0,005	192	25,7	0,673	58,1	29,4
ASC-3	3460	34	na	1,002	6,75	3,37	898	1,16	0,261	120	0,651	30,3	47,3	0,97	524	76,2	5,79	85,0	21,1
ASC-4	3900	18	na	1,002	7,85	1,16	1080	0,749	0,084	191	0,310	7,19	10,9	0,020	570	64,5	4,69	131	31,1
ASC-5	3960	16	na	1,002	7,57	2,04	1100	0,729	0,053	178	1,41	7,59	30,8	0,71	587	65,3	4,87	141	36,2
ASC-6	6630	24	na	1,003	7,12	2,34	1980	0,723	0,100	283	1,17	17,4	41,7	0,97	989	100	5,24	249	79,5
ASC-7	11790	21	na	1,006	7,34	1,04	3870	0,685	0,083	311	1,20	13,5	39,5	0,68	1840	138	5,04	577	39,6
ASC-8	4070	19	na	1,002	8,22	1,46	1110	0,605	0,042	266	1,74	6,73	31,1	1,4	570	59,0	3,83	161	34,5
ASC-9	5420	25	na	1,002	7,88	1,75	1260	0,718	0,079	365	0,353	7,45	9,38	0,045	649	68,0	4,74	193	38,9
ASC-10	6700	21	na	1,003	8,46	0,626	2130	0,807	0,184	116	0,057	15,7	2,28	0,034	1060	108	5,03	190	59,0
ASC-11	6680	17	na	1,003	7,09	2,72	2020	0,781	0,101	255	0,837	17,5	45,4	1,2	1010	98,5	4,64	281	82,1
ASC-13	75,0	12,5	11,4	1,000	7,94	0,478	3,09	0,002	0,001	7,39	0,020	0,227	16,4	0,005	5,84	1,37	0,005	4,25	2,77
ASC-14	174,0	19,5	9,5	1,000	7,66	0,438	2,88	0,004	0,003	48,5	0,021	0,411	20,3	0,044	10,5	2,35	0,030	12,6	5,22
ASC-15	3310	31,9	10,2	1,001	6,76	3,30	888	1,10	0,194	124	0,040	30,3	59,6	3,2	536	76,6	5,84	87,0	21,5
ASC-16	642,0	28	na	1,000	7,70	1,51	107	0,152	0,035	63,4	0,316	4,27	40,0	0,65	96,1	15,0	0,951	18,8	3,52
ASC-17	6900	10	na	1,004	7,42	11,9	1680	1,08	0,078	672	0,057	57,5	38,4	3,8	1110	113	5,01	205	143
ASC-18	22300	2	11,5	1,013	8,13	3,23	7490	3,44	0,283	2180	0,068	79,3	46,2	5,8	3890	422	22,2	1250	270
ASC-19	12500	10	9,9	1,006	7,61	0,928	4330	0,633	0,071	216	1,59	15,4	36,7	0,97	2040	153	6,20	606	43,0
ASC-20	12700	17	13,5	1,006	7,92	0,995	4400	0,719	0,088	310	0,949	16,0	37,0	1,0	2120	160	6,02	654	46,2
ASC-21	27600	21	7,6	1,014	8,19	1,84	10200	1,67	0,122	754	2,44	38,1	48,7	2,2	4950	378	15,4	1550	111
ASC-22	3960	19,5	7,2	1,002	7,81	1,48	1120	0,615	0,042	206	1,36	7,46	32,2	0,71	584	63,3	3,84	157	33,8
ASC-23	10570	26	19,7	1,005	9,14	2,25	3240	1,55	0,227	662	0,035	20,2	40,6	1,9	1640	161	10,2	473	97,7

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 ASCOTAN

ASC

NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
ASC-24	3910	16,5	8,7	1,002	7,72	2,07	1110	0,694	0,051	178	0,508	7,25	31,1	0,53	575	64,5	4,71	144	36,5
ASC-25	7780	23,3	8,5	1,003	7,74	2,50	2400	1,66	0,402	320	5,21	16,6	28,3	1,4	1240	148	10,4	237	80,9
ASC-26	3930	24	6,8	1,002	7,81	1,89	1100	0,483	0,032	173	0,068	7,12	33,3	0,56	589	63,0	3,51	141	38,6
ASC-27	8240	15,6	na	1,005	9,21	1,24	2300	1,22	0,087	941	0,033	16,1	36,1	1,8	1220	137	7,98	493	73,1
ASC-28	6460	23,6	6,3	1,003	7,37	2,30	2000	0,696	0,097	218	0,502	17,0	43,1	1,0	950	102	5,38	253	79,0
ASC-29	15680	10,3	8,9	1,008	9,37	2,63	5360	1,87	0,326	739	0,136	51,1	45,9	3,1	2510	274	13,9	618	228
ASC-30	6270	22,8	5,1	1,003	7,42	2,53	1930	0,797	0,106	244	0,254	17,5	45,4	1,2	915	95,4	4,66	263	80,4
ASC-31	14650	7,9	3,5	1,008	8,16	4,77	4830	1,65	0,425	749	0,020	47,2	47,9	4,2	2260	247	12,2	650	213
ASC-32	57200	11	9,5	1,033	8,22	9,05	23300	11,7	0,595	3010	0,341	373	28,3	29	12200	1410	81,9	2050	790
ASC-33	6590	18,5	4,7	1,003	7,22	2,69	1980	0,779	0,097	267	0,428	18,7	43,7	1,0	948	95,8	4,59	275	79,9
ASC-34	19620	21	7,3	1,011	8,27	4,37	7060	3,28	0,190	1110	0,409	108	44,5	9,7	3570	446	23,8	654	242
ASC-36	6180	14,5	4,0	1,003	7,10	5,23	1740	1,46	0,284	259	0,459	42,8	43,4	4,1	1020	127	8,81	149	55,6
ASC-37	4770	25	7,6	1,002	7,34	5,49	1200	1,38	0,277	316	0,047	32,5	54,3	3,0	713	99,7	5,94	153	58,6
ASC-38	4020	20	9,5	1,002	7,18	6,20	987	1,01	0,199	238	0,026	23,1	40,9	1,8	587	79,0	4,38	120	57,1
ASC-39	28600	4,7	6,5	1,016	8,15	8,72	9440	9,51	0,973	2940	0,046	248	63,8	17	5660	817	42,1	513	445
ASC-40	12000	7	7,0	1,006	8,42	1,83	3800	1,89	0,169	816	0,167	28,6	27,1	2,3	1880	196	11,8	465	135
ASC-41	122900	5,5	6,2	1,085	7,77	26,4	58600	43,6	1,690	12200	3,35	1030	55,2	82	35400	4890	245	1170	2410
ASC-42	4010	19,6	6,2	1,002	8,17	8,30	1010	0,135	0,003	151	0,081	6,78	34,7	0,11	580	69,6	2,45	93,0	104
ASC-43	83000	24,5	6,4	1,058	8,20	13,2	32500	13,3	0,753	15200	0,074	198	43,1	17	21200	2540	79,1	357	3010
ASC-44	1160	20,4	9,5	1,000	8,74	7,96	131	0,060	0,005	54,2	0,015	3,12	32,2	0,046	141	29,0	0,333	26,1	55,6
ASC-45	52500	21,3	5,9	1,031	8,03	7,05	20700	9,19	0,319	3850	0,341	244	54,9	23	10700	1190	70,1	2270	753
ASC-46	25800	20,3	5,3	1,015	8,42	16,2	8700	5,41	0,900	2470	0,161	175	53,5	9,0	5430	590	22,5	67,4	695
ASC-47	4440	20,1	na	1,002	9,32	10,1	1080	0,831	0,178	194	0,620	20,8	34,4	0,90	860	95,8	4,14	12,8	57,3

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.

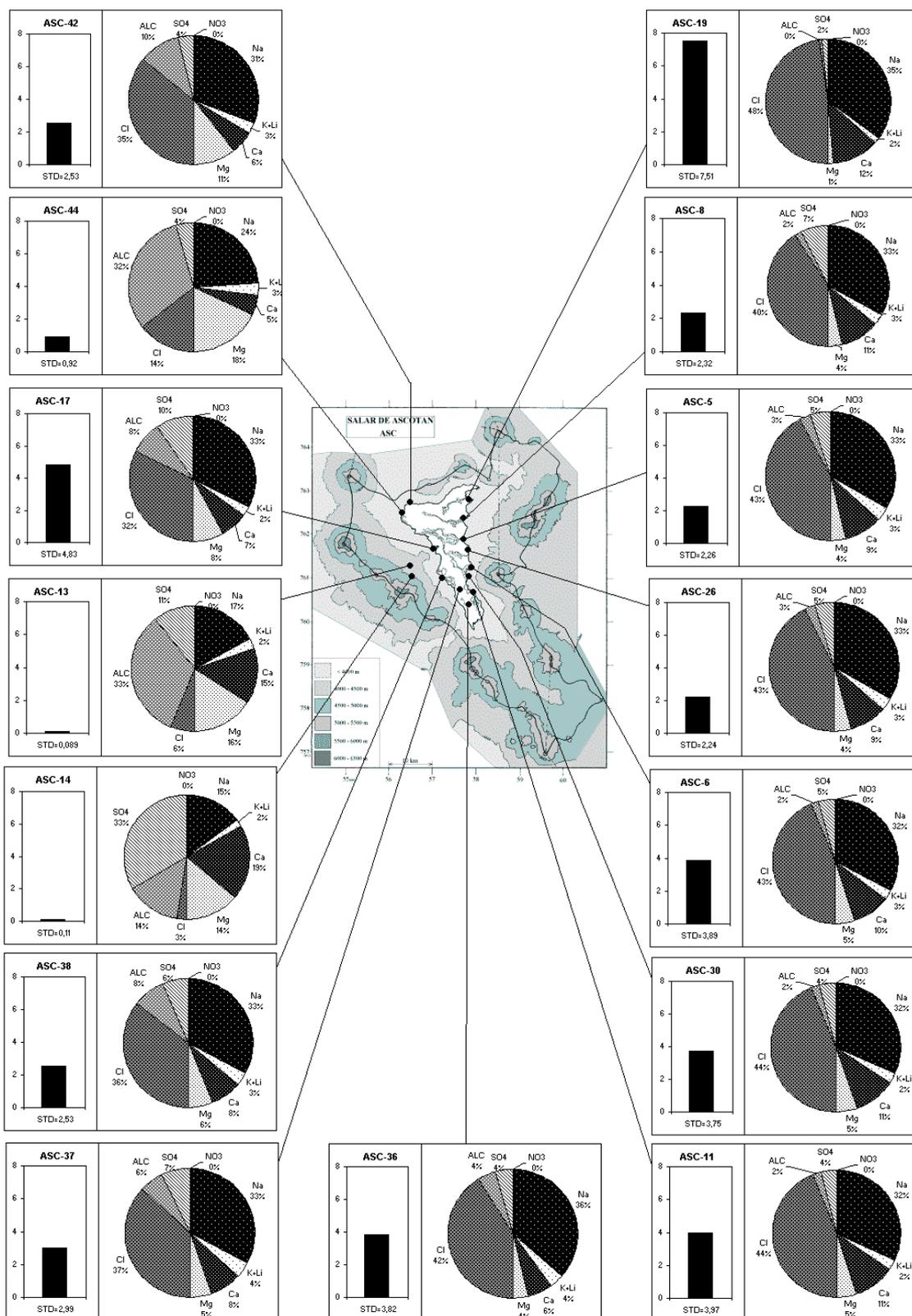
SALAR DE ASCOTAN

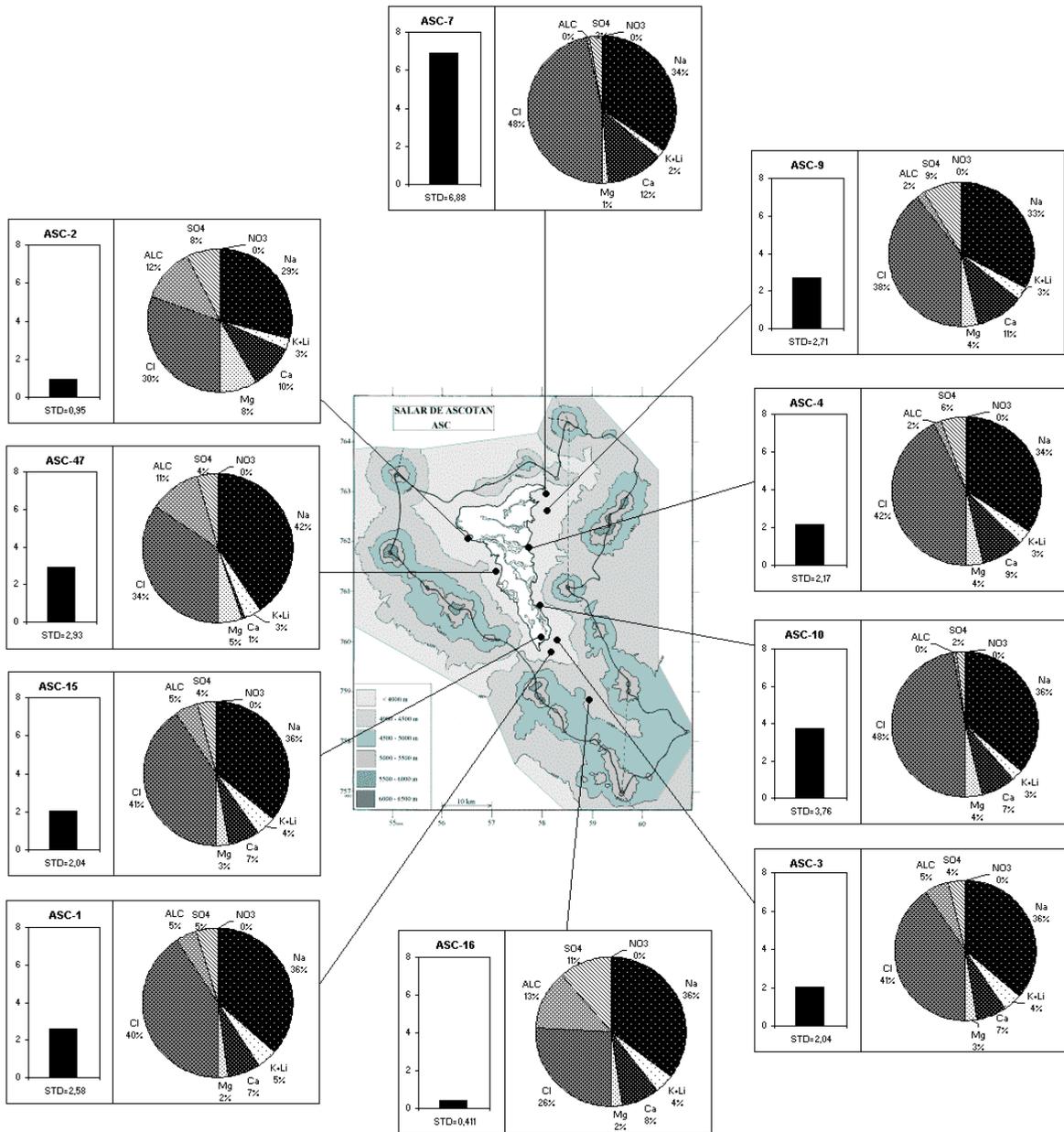
ASC

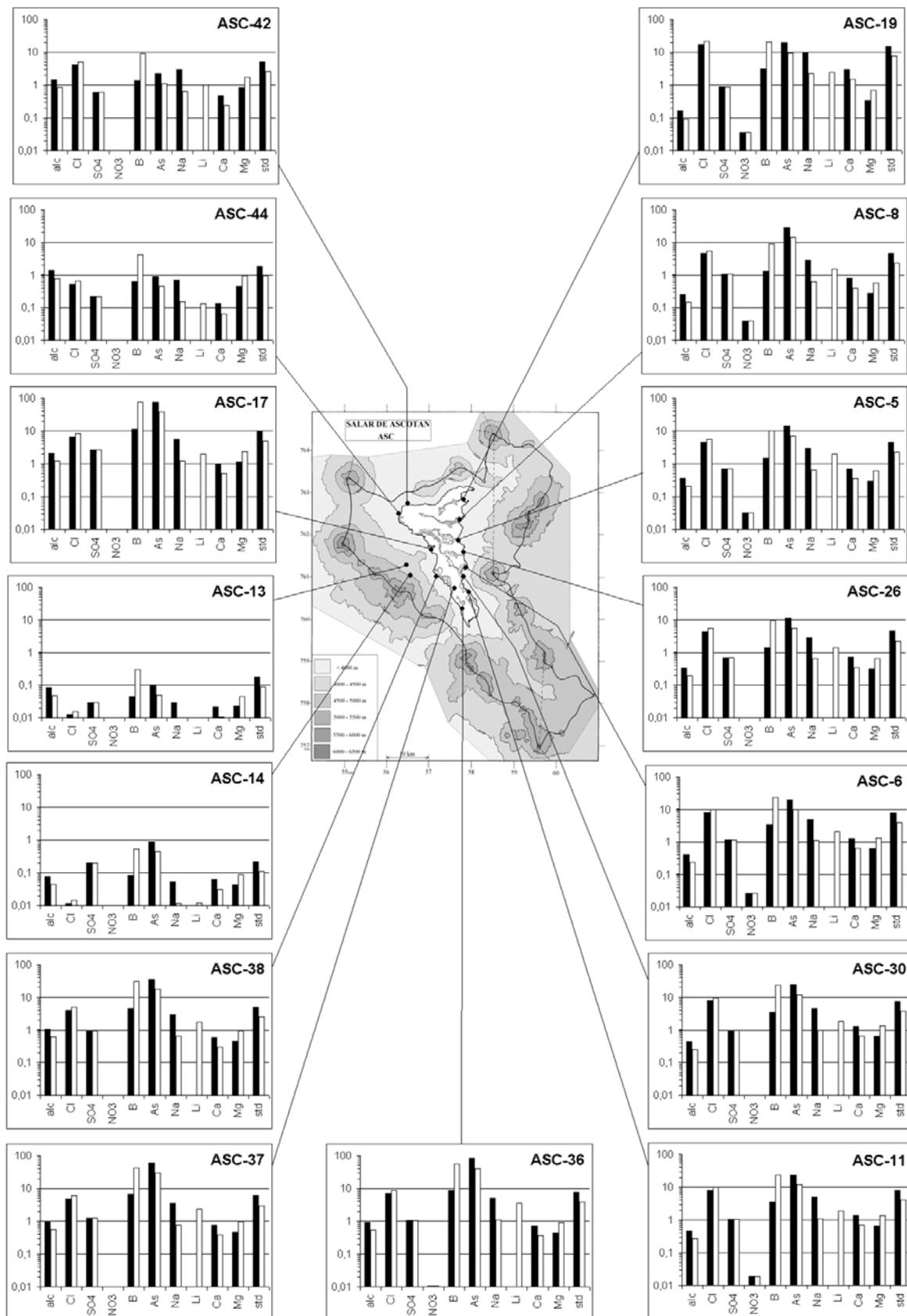
NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF. %	NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF. %
ASC-1	2581	225	0,30	48	40,48	40,15	0,8	ASC-24	2267	123	0,96	3,5	37,49	37,18	0,8
ASC-2	949,6	211	1,14	6,2	14,41	14,58	1,2	ASC-25	4644	144	1,86	3,3	77,64	76,75	1,2
ASC-3	2036	204	0,24	44	31,56	31,18	1,2	ASC-26	2243	110	1,32	2,2	37,92	36,39	4,1
ASC-4	2169	67,1	0,72	1,4	36,23	35,65	1,6	ASC-27	5295	5,31	2,16	0,005	88,48	85,54	3,4
ASC-5	2259	122	0,66	4,8	37,89	36,66	3,3	ASC-28	3802	137	0,84	7,5	63,80	63,15	1,0
ASC-6	3891	140	0,48	14	65,26	64,16	1,7	ASC-29	10055	-	-	-	167,6	169,0	0,8
ASC-7	6883	60,7	0,42	3,6	116,1	116,5	0,4	ASC-30	3746	149	1,02	7,5	62,63	62,01	1,0
ASC-8	2322	79,3	2,16	0,66	37,72	38,43	1,9	ASC-31	9407	245	9,06	2,7	156,4	156,4	0,01
ASC-9	2709	101	1,62	1,7	43,46	44,86	3,2	ASC-32	44631	134	12,8	1,1	744,8	728,9	2,2
ASC-10	3763	19,5	1,14	0,09	64,03	63,15	1,4	ASC-33	3876	161	0,60	13	64,59	64,06	0,8
ASC-11	3973	164	0,42	19	67,75	64,95	4,2	ASC-34	13731	143	9,90	0,92	222,3	226,6	1,9
ASC-13	89,10	28,6	0,12	0,62	0,7297	0,7193	1,4	ASC-36	3820	316	0,60	37	60,71	59,74	1,6
ASC-14	110,0	26,2	0,06	0,92	1,580	1,529	3,3	ASC-37	2992	328	1,44	19	46,87	45,97	1,9
ASC-15	2040	200	0,18	44	32,21	30,88	4,2	ASC-38	2526	375	0,90	34	38,85	38,96	0,3
ASC-16	411,3	89,7	0,42	2,5	5,929	5,845	1,4	ASC-39	21194	372	11,8	4,0	335,2	335,9	0,2
ASC-17	4834	714	3,12	43	73,72	73,10	0,9	ASC-40	7509	78,1	4,02	0,48	122,9	125,8	2,4
ASC-18	15968	143	5,46	1,9	267,4	259,6	2,9	ASC-41	117682	958	40,4	21	1957	1930	1,4
ASC-19	7506	52,8	0,48	2,0	127,5	127,5	0,01	ASC-42	2532	476	12,1	4,4	40,49	39,84	1,6
ASC-20	7808	50,9	1,32	0,84	133,5	131,5	1,5	ASC-43	75901	398	57,7	2,2	1262	1245	1,4
ASC-21	18180	61,6	5,52	0,48	313,4	304,6	2,9	ASC-44	920,4	421	26,8	1,1	12,78	12,78	0,01
ASC-22	2286	86,0	0,90	1,8	38,17	37,40	2,0	ASC-45	40802	178	15,6	1,8	682,7	670,3	1,8
ASC-23	6479	24,3	11,8	0,02	108,4	107,4	1,0	ASC-46	19517	659	54,5	2,8	314,9	312,6	0,7
								ASC-47	2933	365	80,4	0,24	45,81	44,45	3,0

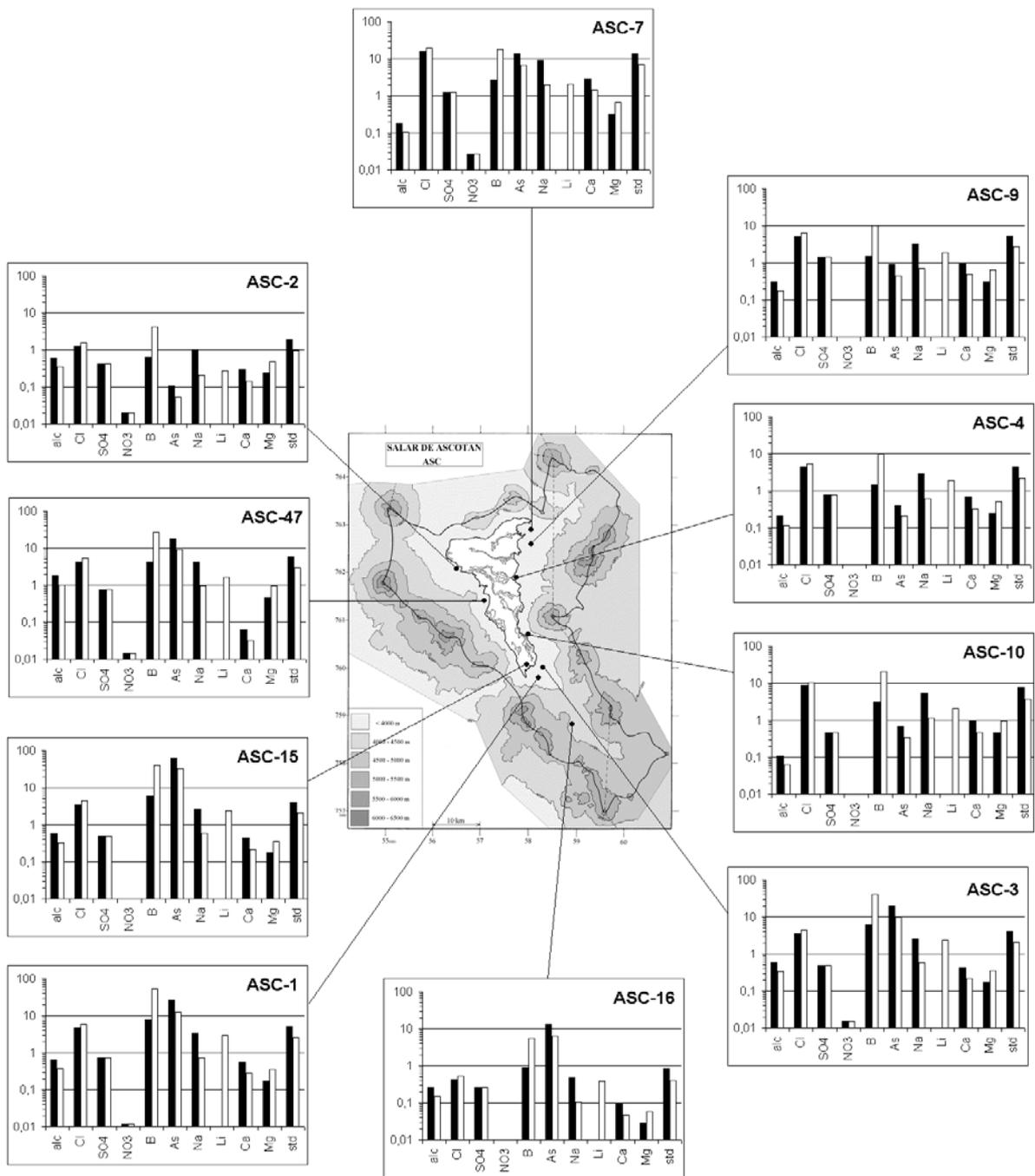
Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.

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









MAPA GEOLOGICO Y VIAS EVOLUTIVAS

ASC

Qd : *Cuaternario*. Depósitos no consolidados.

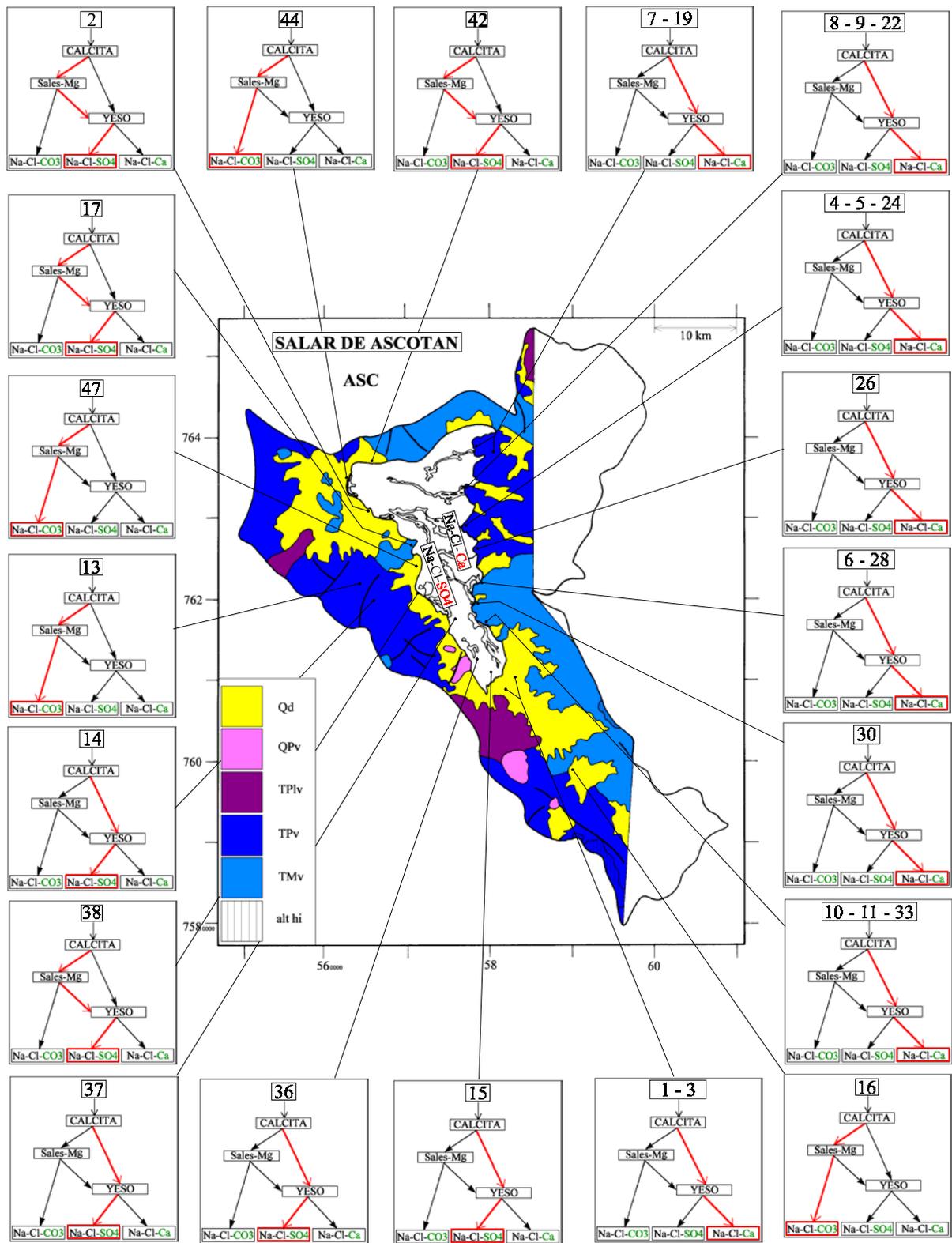
QPv : *Cuaternario*. Domos dacíticos porfíricos.

TPlv : *Plioceno sup.* - Pleistoceno. Estrato-volcanes andesíticos y dacíticos.

TPv : *Plioceno*. Estrato-volcanes andesíticos moderadamente erosionados.

TMv : *Mioceno sup.* - Plioceno. Estrato-volcanes andesíticos intensamente erosionados.

alt hi : alteración hidrotermal.



SALAR DE ATACAMA

Introducción

El salar de Atacama, con una superficie de 3000 km², es el más grande de Chile. Está ubicado en una cuenca cerrada entre la Cordillera de los Andes al este y la Cordillera de Domeyko al oeste. Sus principales características morfológicas y climatológicas son:

- altura: 2300 m
- superficie de la cuenca: 18 100 km²
- superficie del salar: 3000 km²
- superficie de las lagunas: 12,6 km²
- precipitaciones: 25 mm/año (salar) - 300 mm/año (Cordillera)
- evaporación potencial: 2000 mm/año (salar) - 1600 mm/año (Cordillera)
- temperatura media: 14°C (salar)

El salar de Atacama no fue incluido en el proyecto objeto del presente estudio como los demás salares y lagunas. La extensión y la complejidad de su cuenca y del salar mismo hacia muy difícil su estudio completo en los plazos y con el presupuesto del proyecto. Además, debido a su gran interés económico, numerosos estudios hidrogeológicos e hidroquímicos han sido realizados desde hace 30 años, con mejores medios que los nuestros, por el Instituto de Investigaciones Geológicas, Corfo, PNUD (Naciones Unidas), Universidades y empresas mineras como Minsal, Cia. Minera del Litio, Zaldivar y Escondida entre otras. A raíz de esos trabajos existe una gran cantidad de pozos de todo tipo en la cuenca. Como se dijo anteriormente, nuestras posibilidades de entregar nuevos antecedentes a los muchos disponibles, eran bajas. Preferimos interpretar la información ya existente y que ha sido publicada.

El primer estudio extensivo sobre el salar de Atacama, incluyendo la caracterización hidroquímica de las aguas, fue realizado por Moraga et al. (1974). Las altas concentraciones de litio y potasio en las salmueras incentivaron nuevos estudios del salar y de la hidrogeología de su cuenca de drenaje. En su evaluación económica, cabe resaltar la cubicación de la costra de sal realizada por Ide (1978). La hidrogeología fue estudiada por Dingman (1967), Díaz del Río et al. (1972), Dalannais (1979) y Mardones (1986). La climatología y la hidrología de la cuenca fueron descritas por Grilli et al. (1986). Los conocimientos geológicos y estratigráficos del salar de Atacama, incluyendo perfiles de pozos hasta 500 m de profundidad, han sido sintetizados por Bevacqua (1992). Finalmente, los balances hídricos y salinos fueron estimados por Alonso y Risacher (1996) y la geoquímica tocada por Risacher y Alonso (1996).

Todos estos estudios son relativamente fáciles de conseguir o consultar. Pero existen mucho más información inédita o de acceso restringido producida especialmente por diversas empresas mineras. Es muy difícil hacer una síntesis de todo este abundante material. De hecho, la simple recopilación y tratamiento informático de todo lo que existe sobre la cuenca del salar de Atacama, demoraría mucho más tiempo del que disponíamos y ello suponiendo que todas las empresas facilitaran su información reservada.

Hemos hecho una campaña de muestreo de los aportes superficiales al salar, todos en la parte oriental de la cuenca. Se muestrearon 22 aguas a las cuales se agregó otras tres facilitadas por colegas. (En el sólo estudio inicial de Moraga et al. (1974), hay más de 200 análisis químicos completos de aguas y salmueras del salar). Presentamos en este informe los análisis de esas 25 muestras sin discusión detallada, la que puede encontrarse en artículos recientes de la Revista Geológica de Chile, de fácil acceso. (Alonso y Risacher, 1996 y Risacher y Alonso, 1996). Reproducimos en anexo los resúmenes de estos artículos.

Composición de aguas y salmueras

Las composiciones de las principales aguas de aporte del salar de Atacama están presentadas en la figura 1 y en la tabla 1.

APORTES	SALINIDAD mg/l	TIPO QUÍMICO		VÍA EVOLUTIVA
		Cationes	Aniones	
ATA-24	213	Mg-Ca-Na	/ HCO ₃ -SO ₄	SO ₄ (A)
ATA-6	274	Na-Ca- (Mg)	/ Cl-HCO ₃ - (SO ₄)	SO ₄ (D)
ATA-2	308	Na-Ca	/ Cl- (HCO ₃) - (SO ₄)	SO ₄ (N)
ATA-18	383	Mg-Na-Ca	/ SO ₄ -HCO ₃ - (Cl)	SO ₄ (A)
ATA-9	467	Na-Ca-Mg	/ HCO ₃ - (SO ₄) - (Cl)	SO ₄ (A)
ATA-17	765	Na-Mg- (Ca)	/ SO ₄ -Cl- (HCO ₃)	SO ₄ (N)
ATA-11	825	Na-Mg-Ca	/ SO ₄ -HCO ₃ - (Cl)	SO ₄ (A)
ATA-8	846	Ca-Na-Mg	/ HCO ₃ -SO ₄ - (Cl)	SO ₄ (A)
ATA-3	940	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl-SO ₄ - (HCO ₃)	SO ₄ (A)
ATA-1	1115	Na-Ca	/ Cl- (SO ₄) - (HCO ₃)	SO ₄ (N)
ATA-23	1120	Na- (Mg) - (Ca)	/ Cl-SO ₄ - (HCO ₃)	SO ₄ (N)
ATA-7	1388	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl-HCO ₃ - (SO ₄)	SO ₄ (D)
ATA-15	1497	Na- (Mg) - (Ca)	/ Cl- (HCO ₃) - (SO ₄)	SO ₄ (A)
ATA-25	1604	Ca-Na- (Mg)	/ SO ₄ - (Cl) - (HCO ₃)	SO ₄ (N)
ATA-4	1655	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl- (SO ₄) - (HCO ₃)	SO ₄ (N)
ATA-16	1695	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl-SO ₄ - (HCO ₃)	SO ₄ (N)
ATA-14	1806	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl-SO ₄ - (HCO ₃)	SO ₄ (N)
ATA-10	2092	Na-Mg- (Ca)	/ SO ₄ -HCO ₃ - (Cl)	SO ₄ (N)
ATA-19	2138	Ca-Na- (Mg)	/ SO ₄ -Cl- (HCO ₃)	SO ₄ (N)
ATA-5	2326	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl- (SO ₄) - (HCO ₃)	SO ₄ (N)
ATA-21	2624	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl- (SO ₄) - (HCO ₃)	SO ₄ (N)
ATA-12	2742	Na-Ca- (Mg)	/ Cl-SO ₄ - (HCO ₃)	SO ₄ (N)
ATA-13	3630	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl- (SO ₄) - (HCO ₃)	SO ₄ (N)
ATA-22	4413	Na- (Mg) - (Ca)	/ Cl- (SO ₄) - (HCO ₃)	SO ₄ (N)
ATA-20	19509	Na- (Mg) - (Ca)	/ Cl- (SO ₄)	Ca

Tabla 1 : Salinidades, tipos químicos y vías evolutivas de aguas del salar de Atacama.

SO₄ (A) = vía alcalina sulfatada; SO₄ (N) = vía neutra sulfatada

SO₄ (D) = vía sulfatada directa (sin pasar por el yeso); Ca = vía cálcica.

Casi todos los aportes encontrados provienen de la Cordillera de los Andes al este y al norte del salar. Hay tres muestras de aguas difusas al sur. No tenemos ningún aporte de la Cordillera de Domeyko, al oeste. De la figura 1 se deduce que las composiciones de los aportes son muy variadas, lo que refleja la gran complejidad de la cuenca de drenaje. Las salinidades varían desde

213 mg/l hasta 19 500 mg/l. El aporte más concentrado esta probablemente contaminado por la cuña salina del salar.

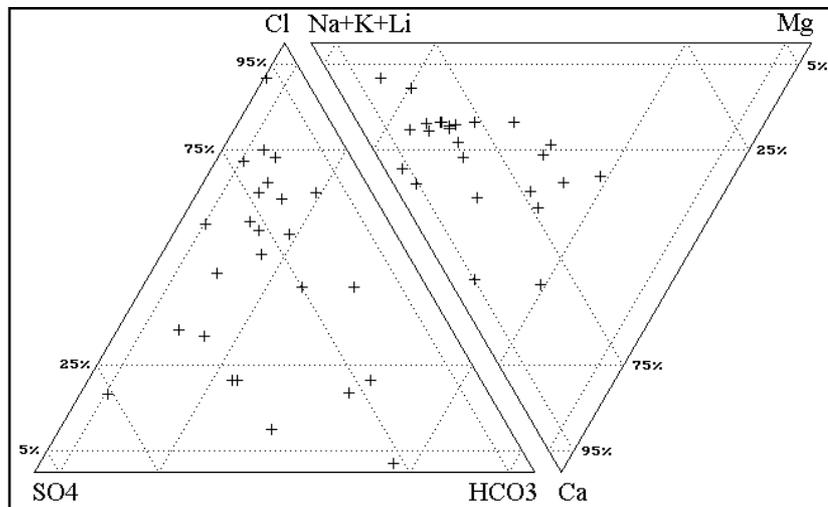


Fig.1: Composición de aguas y salmueras del salar de Atacama.

No hemos muestreado ninguna salmuera. Ide (1978) presenta unos 400 análisis de salmueras en su estudio sobre la cubicación del núcleo del salar. Sólo con esta base de datos, se ha podido detectar la existencia de dos tipos de salmueras en el núcleo:

- al este, las salmueras son del mega-grupo sulfatado: Na / Cl-SO₄.
- al oeste, las salmueras son del mega-grupo cálcico: Na-Ca / Cl.

Origen de los componentes disueltos

Se puede observar dos tendencias equimolares en las aguas de aporte: Na ~ Cl y Ca ~ SO₄. La relación entre Na y Cl tiene un aspecto clásico: las concentraciones de Na y Cl tienden a igualarse cuando aumenta la salinidad, Na siendo superior a Cl en las aguas más diluidas.

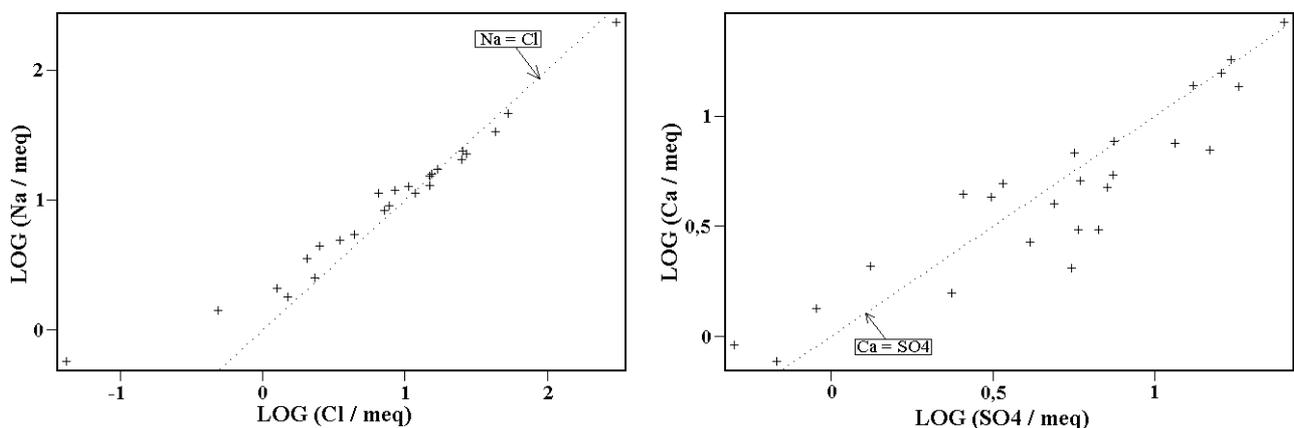


Fig.2 : Relaciones Na versus Cl y Ca versus SO₄ en aguas de aporte al salar de Atacama.

Esto sugiere que Na, Ca, Cl y SO₄ provienen en gran parte (pero no exclusivamente) de la redisolución de halita (NaCl) y yeso (CaSO₄·2H₂O) en antiguas evaporitas recubiertas por formaciones volcánicas más recientes. Tal formación geológica existe en la cuenca del salar de Atacama: es la Cordillera de la Sal que aflora al oeste del salar y que se prolonga al norte por debajo de las formaciones volcánicas (ver mapa geológico). Los demás componentes (K, Mg, Li, B) provienen de la alteración de rocas volcánicas.

Vías evolutivas y relación con la geología

Todas las aguas de aporte siguen las vías sulfatadas. El aporte más concentrado sigue la vía cálcica; pero hemos visto que podría estar contaminado por la cuña salina. Las vías sulfatadas son coherentes con la geología volcánica de la parte oriental de la cuenca y también con la composición sulfatada de las salmueras de la mitad oriental del núcleo. Al contrario, discrepan con la composición cálcica de las salmueras del sector occidental del núcleo. Ahora bien, esta composición cálcica refleja la litología, en gran parte sedimentaria, de la Cordillera de Domeyko. Lamentablemente, nos faltan muestras de aportes desde esta Cordillera. Existen en el sector oriental algunos afloramientos sedimentarios de litología parecida a la de Domeyko. Hemos encontrado en Moraga et al. (1974) algunos análisis de aguas de aporte que drenan tales afloramientos. Se puede razonablemente suponer que son aguas parecidas a las que lixiviaron la Cordillera de Domeyko. Estas aguas pertenecen todas a la vía cálcica. Presentamos en la figura 3 la relación entre Ca y SO₄ de todas las aguas de Moraga et al. (1974) y de Risacher y Alonso (1996)

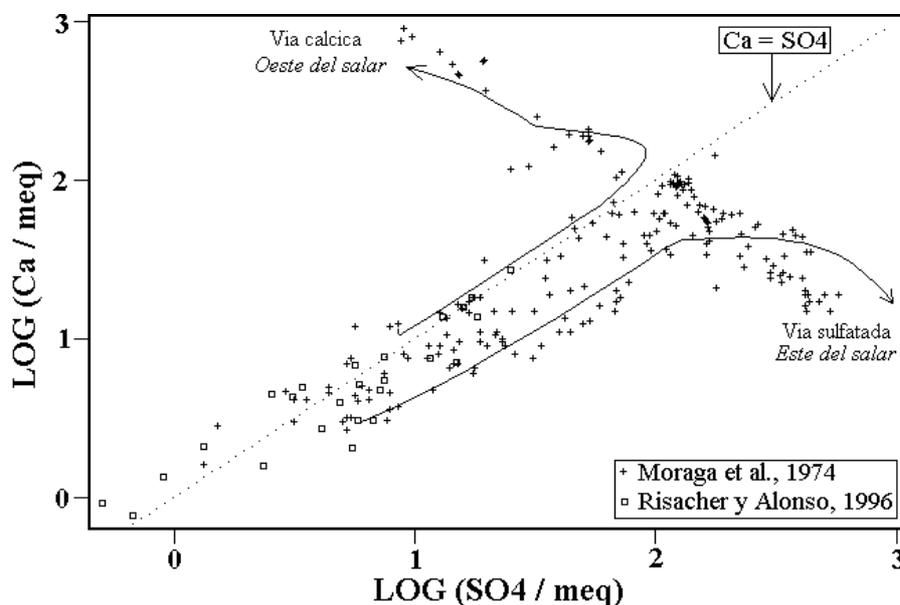


Fig.3 : Relación entre Ca y SO₄ en aguas y salmueras de Atacama.

Se observa que los puntos se reparten a lo largo de una T inclinada. El pie de la T corresponde a soluciones no saturadas en yeso en las cuales el calcio y el sulfato se concentran conjuntamente. Las aguas saturadas en yeso tienen su punto representativo en la barra transversal de la T. Se observa dos grupos de salmueras:

- unas que se concentran en Ca y se empobrecen en SO_4 ; siguen la vía cálcica y se encuentran en el sector occidental del núcleo.

- otras que se concentran en SO_4 y se empobrecen en Ca ; siguen la vía sulfatada y se encuentran en el sector oriental del núcleo.

Las aguas del salar de Atacama ilustran perfectamente las dos vías evolutivas producidas por la precipitación del yeso. Hemos representado en la figura 3 dos trayectos de evaporación típicos de las aguas de aporte del salar de Atacama. Uno corresponde al agua del río San Pedro, principal aporte superficial al salar, cuya evaporación produce una salmuera sulfatada similar a las que hay al este del núcleo. Casi todas las demás aguas diluidas del borde oriental siguen un trayecto similar. Se observa pues una buena concordancia entre la evolución teórica de las aguas de aporte y la composición de las salmueras sulfatadas de la parte oriental del núcleo. El otro trayecto de evaporación conduce a una salmuera cálcica y corresponde a una agua que drena terrenos sedimentarios al sur-este de la cuenca (muestra a-79 de Moraga et al., 1974).

Calidad de las aguas superficiales

Hay aguas de muy buena calidad en el norte de la cuenca y en el sector oriental alto. Globalmente, todas las aguas cuya salinidad es inferior a 1 g/l son aprovechables para cualquier uso. Los principales contaminantes son el arsénico y el boro. Las aguas del río Vilama al norte y de las quebradas al sur del salar, tienden a ser más salinas, lo que plantea problemas para su uso, particularmente potable, siendo la situación de San Pedro de Atacama muy delicada por el alto contenido en arsénico. En el pueblo de Peine, se utiliza principalmente para consumo doméstico agua de la cuenca colindante de Miscanti, traída por una cañería de unos 40 km de largo. Presentamos solamente datos sobre aportes superficiales, pero hay grandes reservas subterráneas explotadas en parte por empresas mineras. No tenemos todos los datos para estudiarlas detalladamente.

Balance hídrico.

Repetimos que sólo contamos con valores publicados, los que pueden discrepar de los obtenidos por las empresas mineras en sus estudios más acabados. Los aportes superficiales al salar de Atacama son parcialmente consumidos en riego. Los caudales iniciales, antes de llegar a las zonas de cultivos, han sido estimados por Grilli et al. (1986). Para determinar las cantidades usadas en riego se considera una tasa de riego comprendida entre 0,5 y 1 l/s/ha (INGE, 1991). El total de los caudales superficiales (V_{rios}) llega a 52×10^6 m³/año de los cuales 27×10^6 m³/año son utilizados para el riego (V_{riego}). El volumen de agua evaporada a través de la superficie del salar (V_e) ha sido estimado por Grilli et al. (1986) en 145×10^6 m³/año. El volumen de las precipitaciones (V_p) que caen directamente sobre la superficie del salar se obtiene multiplicando la altura promedia de precipitación (10 mm/año) por la superficie del salar (3000 km²), lo que da 30×10^6 m³/año. Igualando los aportes y las pérdidas:

$$V_{\text{rios}} + V_{\text{sub}} + V_p = V_e + V_{\text{riego}}$$

se obtiene así un volumen de aportes subterráneos (V_{sub}) de 90×10^6 m³/año. Se observa que los aportes subterráneos son casi el doble de los aportes superficiales. En otra estimación del balance hídrico del salar de Atacama, Mardones (1986) da los siguientes parámetros: $V_{\text{rios}} = 48 \times 10^6$ m³/año, $V_{\text{riego}} = 19 \times 10^6$ m³/año, $V_p = 30 \times 10^6$ m³/año, $V_e = 170 \times 10^6$ m³/año, $V_{\text{sub}} = 148 \times 10^6$

m³/año. Con excepción del volumen de aguas subterráneas, hay una buena concordancia con los valores derivados de Grilli et al. (1986). Mardones (1986) estimó V_{sub} a partir de estudios hidrogeológicos, los que son cuantitativamente imprecisos por estar basados en un número reducido de pozos ubicados en formaciones geológicas muy variadas. Sin embargo, el error del balance así obtenido es solamente de 20%.

		CAUDALES (en l/s)		
		<i>Antes riego</i>	<i>Uso riego</i>	<i>Al salar</i>
ATA-4	Río San Pedro	27,2	13,2	14
ATA-14	Río Vilama	7,7	3,7	4
ATA-6	Río Honar	1,9	1,3	0,6
ATA-7	Río Aguas Blancas	4,4	---	4,4
ATA-8	Río Talabre	0,6	0,6	---
ATA-10	Río Camar	0,06	0,06	---
ATA-11	Río Socaire	6,8	6,8	---
ATA-12	Río Peine	0,5	0,5	---
ATA-13	Río Tilomonte	2,4	---	2,4
TOTAL		51,5	26	25,5

Tabla 2 : Caudales de los principales aportes al salar de Atacama

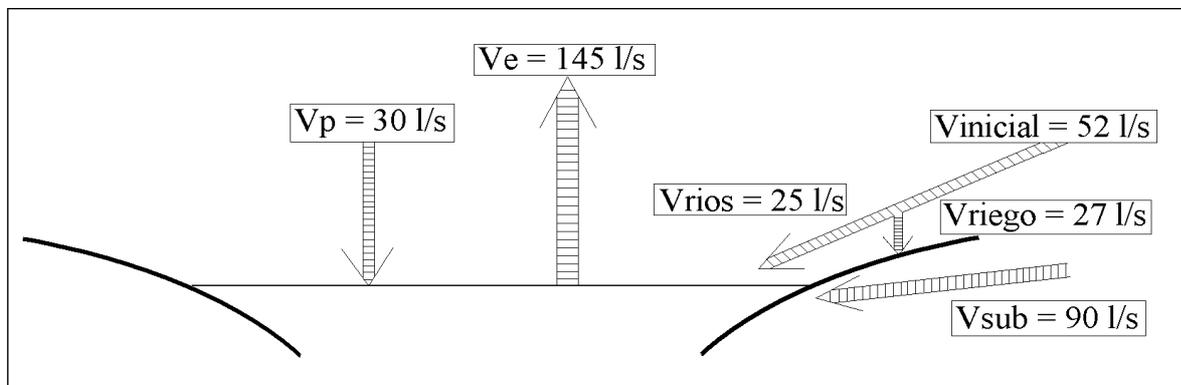


Fig. 4 : Balance hídrico del salar de Atacama. En gran parte según Grilli et al. (1986).

Este balance hídrico es muy impreciso, especialmente en lo referente a los aportes subterráneos. Por ejemplo, no se ha tomado en cuenta los aportes desde la sub-cuenca de Negrillar, al sur del salar, que entran por el sector de Tilopozo. Sin embargo, estos ordenes de magnitud muestran que el caudal entrante de 145 l/s en el salar de Atacama es muy bajo en relación a la superficie de la cuenca. En la vecina laguna Miscanti, entra un caudal de 600 l/s a partir de una cuenca de drenaje de 300 km². Las precipitaciones sobre los sectores norte y este de la cuenca, de donde provienen los aportes, llegan a unos 15 000 l/s (0,1 m/año sobre una superficie de 5000 km²). El coeficiente de escurrimiento (definido como la razón entre lo que cae sobre la cuenca y lo que entra en el

salar) es de 1%. Significa que el 99% de lo que cae sobre la cuenca no llega al salar ya que se evapora y se infiltra. Es probable que existan grandes volúmenes de agua en napas profundas y confinadas que fluyen hacia la cuenca de Atacama.

Conclusiones

Los aportes al salar de Atacama drenan esencialmente terrenos volcánicos. Sin embargo, una gran parte de Na, Ca, Cl y SO₄, sobre todo en aguas salobres, provienen de la redisolución de antiguas evaporitas por debajo de la formaciones volcánicas, sobre todo en aguas salobres. Las rocas volcánicas proveen K, Mg, Li, B y también algo de Ca, Na y SO₄. Casi todos los aportes siguen las vías sulfatadas, reflejando terrenos volcánicos con algo de azufre. Las salmueras del sector oriental del núcleo son todas sulfatadas (Na / Cl-SO₄) y corresponden bien a la vía evolutiva de los aportes. Al contrario, las salmueras del sector occidental son cálcicas (Na-Ca / Cl) y no provienen de la evaporación de los aportes muestreados. La composición cálcica refleja la litología en gran parte sedimentaria de la Cordillera de Domeyko. El balance hídrico del salar, aunque muy impreciso, muestra que entra en el salar solamente 1 % de lo que cae sobre la cuenca. Eso sugiere que puede existir grandes reservas de agua en napas más o menos profundas en la cuenca de drenaje.

Referencias

Alonso, H. y Risacher, F. 1996. Geoquímica del Salar de Atacama, parte 1: origen de los componentes y balance salino. Revista Geologica de Chile, 23, 2, p. 113-122.

Bevacqua, P. 1992. Geomorfología del salar de Atacama y estratigrafía de su núcleo y delta, Segunda Región de Antofagasta, Chile. Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad Católica del Norte, Facultad de Ingeniería y Ciencias Geológicas, Antofagasta, 284p.

Dalannais, L. 1979. Hidrogeología del borde oriental del salar de Atacama. Tesis de Grado, Universidad del Norte, Departamento de Geología, Antofagasta, 157p.

Díaz del Río, G.; Bonilla, R.; Peralta, F. 1972. Geología de superficie, sub-superficie y geoquímica del salar de Atacama. Informe CORFO, Departamento de Recursos Hidráulicos, Santiago, 162p.

Dingman, R.J. 1967. Geology and ground-water resources of the northern part of the salar de Atacama, Antofagasta Province, Chile. U.S. Geol. Surv. Bulletin 1219, 49p.

Grilli, A.; Vidal, F.; Garín, C. 1986. Balance hidrológico nacional, II Región. Dirección General de Aguas, Departamento de Hidrología, Publicación interna S.D.E.H. 86/1, Santiago, 167p.

Ide, F. 1978. Cubicación del yacimiento salar de Atacama. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Minas. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Minas, Santiago, 144p.

INGE (Ingeniero y Geotecnia Ltda) 1991. Informe final del estudio, análisis y planificación de los recursos de agua en la Segunda Región de Antofagasta. Informe técnico inédito, Intendencia II Región, 185p.

Mardones, L. 1986. Características geológicas e hidrogeológicas del salar de Atacama. *In: El litio, un nuevo recurso para Chile*, (G. Lagos, editor), Universidad de Chile, Dpto Ingeniería en Minas, Editorial Universitaria, Santiago, p. 181-216.

Moraga, A.; Chong, G.; Fortt, M.A.; Henriquez, H. 1974. Estudio geológico del salar de Atacama, Provincia de Antofagasta. Boletín del Instituto de Investigaciones Geológicas, Santiago, Chile, 29, 56p.

Risacher, F. y Alonso H. 1996. Geoquímica del Salar de Atacama, parte 2: evolución de aguas. *Revista Geologica de Chile*, 23, 2, p. 123-134.

Anexo 1 : Resumen de la publicación:

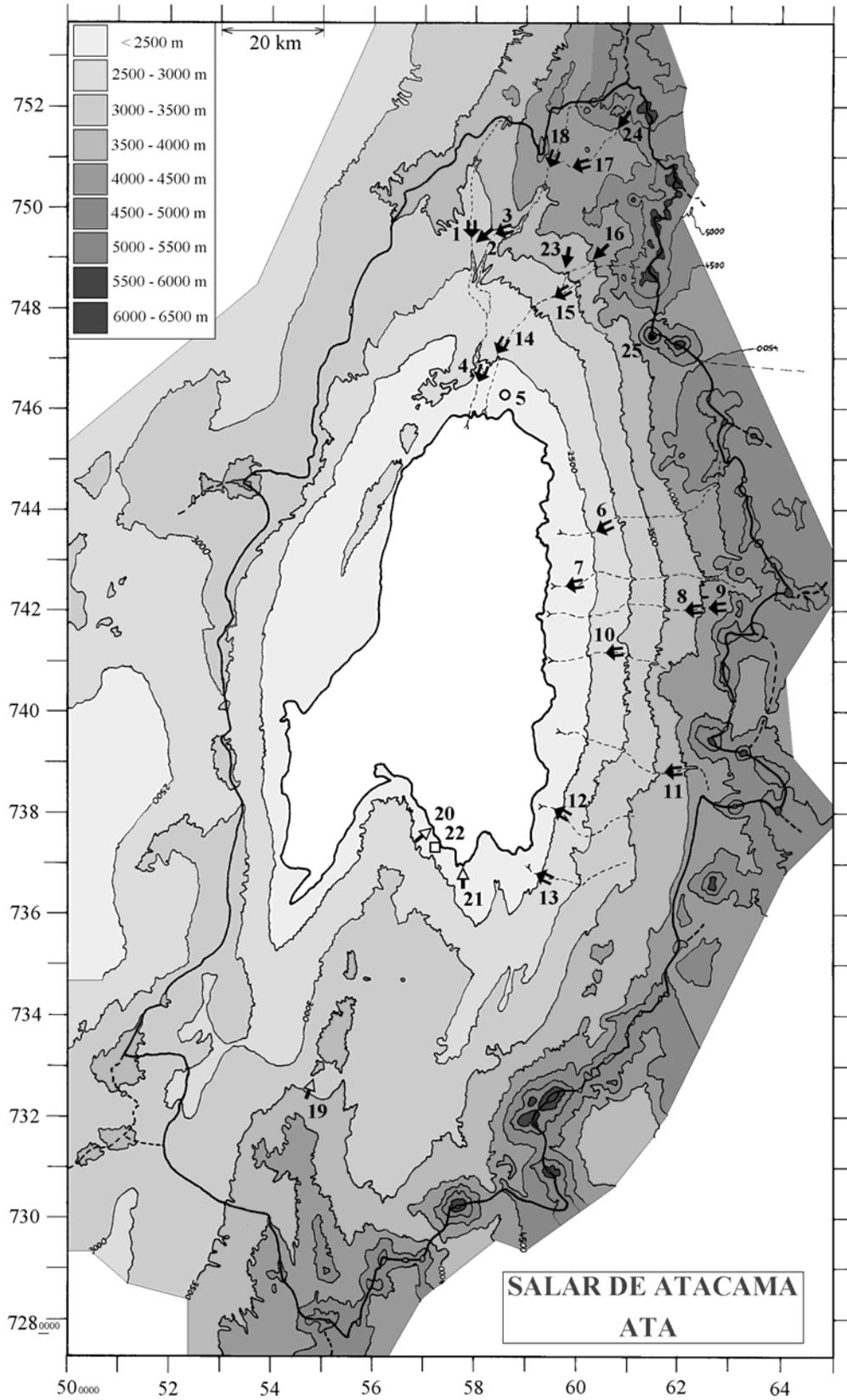
Alonso, H. y Risacher, F. 1996. Geoquímica del Salar de Atacama, parte 1: origen de los componentes y balance salino. *Revista Geologica de Chile*, 23, 2, p. 113-122.

El salar de Atacama en el norte de Chile es una costra de halita, o núcleo, de 1100 km² de superficie y de 900 m de profundidad rodeada por una zona marginal de limos salinos de unos 2000 km² de superficie. La costra de sal contiene una salmuera intersticial de cloruro de sodio rica en magnesio, potasio, litio y boro. El salar recibe la mayor parte de sus aportes desde las formaciones volcánicas de la Cordillera de los Andes, al este. Los componentes disueltos en las aguas de aporte tienen un doble origen. Na, Ca, Cl y SO₄ provienen de la redisolución de antiguas evaporitas que se encuentran por debajo de las formaciones volcánicas. Mg, K, Li y B proceden de la alteración de rocas volcánicas. El balance salino de la parte superior del núcleo del salar presenta un fuerte exceso de NaCl en relación a Mg, K, Li y B, lo que indica que el núcleo no puede provenir de aguas de composición semejante a la de los aportes actuales. El exceso de NaCl se debe muy probablemente a un contenido mucho más elevado en cloruro de sodio de los antiguos aportes proveniente de lixiviación de la Cordillera de la Sal, un cordón evaporítico terciario que bordea el salar por el oeste. La velocidad de sedimentación de la halita, estimada a partir de una datación en una muestra de ignimbrita interestratificada en el núcleo, corresponde exactamente a la velocidad de sedimentación actual de la halita (0,1 mm/año). Esto sugiere que la halita del núcleo se habría depositado a partir de aportes de sales similares a los actuales, discrepando con el balance salino que indica que los aportes antiguos eran mucho más concentrados en NaCl. Para resolver esta anomalía, se supone un funcionamiento intermitente del salar donde largos periodos secos han alternado con cortos periodos húmedos durante los cuales se depositaban grandes cantidades de sales. La ausencia de niveles lacustres y la gran pureza de la sal sugieren que el núcleo no proviene de la sequía de un antiguo lago salado, sino de aportes salinos subterráneos.

Anexo 2 : Resumen de la publicación:

Risacher, F. y Alonso H. 1996. Geoquímica del Salar de Atacama, parte 2: evolución de aguas. Revista Geologica de Chile, 23, 2, p. 123-134.

Las aguas de aporte que alimentan a un salar se evaporan y depositan sus sales disueltas según el orden de sus solubilidades crecientes. El primer mineral que precipita es la calcita, lo que determina dos vías evolutivas: si hay más carbonato que calcio en el agua inicial, la solución sigue la vía alcalina donde aumenta la concentración del carbonato y disminuye la del calcio. En cambio, si hay más calcio que carbonato, la solución sigue la vía salina neutra, enriqueciéndose en calcio y empobreciéndose en carbonato. En el salar de Atacama, las aguas de aporte más diluidas, que drenan terrenos volcánicos, siguen al comienzo la vía alcalina hasta que la precipitación de silicatos de magnesio, al liberar iones H^+ que neutralizan parte del carbonato, cambia la vía alcalina por la vía neutra, donde aumenta el calcio y disminuye el carbonato. Las aguas de aporte más concentradas, que deben su elevada salinidad a la redisolución de antiguas evaporitas, evolucionan desde el principio hacia la vía salina neutra. La total ausencia de salmueras básicas se debe a dos factores: redisolución del yeso de antiguas formaciones evaporíticas, lo que aporta un exceso de calcio en las aguas, y oxidación del azufre de las rocas volcánicas, lo que acidifica las aguas más diluidas. La precipitación del yeso determina a su vez dos vías evolutivas: una donde el calcio aumenta y el sulfato disminuye, lo cual conduce a salmueras cálcicas y la otra que sigue la evolución opuesta y que lleva a salmueras sulfatadas. Ambos tipos de salmuera se encuentran en el núcleo del salar. Las salmueras cálcicas se encuentran al oeste del núcleo y están relacionadas con las rocas sedimentarias de la Cordillera de Domeyko del oeste de la cuenca. Las salmueras sulfatadas, al este del núcleo, están relacionadas con las rocas volcánicas de la Cordillera de los Andes, al oriente de la cuenca. La buena correspondencia entre el quimismo de las salmueras intersticiales y la litología de la cuenca de drenaje sugiere que estas salmueras no son soluciones residuales producto del desecamiento de un antiguo lago salado, sino que se formaron por evaporación a través de la costra de sal.



SALAR DE ATACAMA (APORTES)**ATA**

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
ATA-1	31/05/93	15 ^H 30	579250	7493750	3100	Río Salado
ATA-2	31/05/93	15 ^H 45	579350	7493700	3105	Manantial corriente
ATA-3	31/05/93	17 ^H 00	587250	7495550	3300	Río Grande
ATA-4	01/06/93	09 ^H 40	581250	7468300	2480	Río San Pedro
ATA-5	01/06/93	11 ^H 00	585700	7464575	2430	Napa (pozo#3)
ATA-6	01/06/93	12 ^H 00	604250	7436500	2600	Río Honar
ATA-7	01/06/93	14 ^H 30	597375	7424950	2350	Río Aguas Blancas
ATA-8	01/06/93	15 ^H 45	624000	7420450	3900	Río Talabre (abajo)
ATA-9	01/06/93	16 ^H 00	624425	7420475	3950	Río Talabre (arriba)
ATA-10	02/06/93	10 ^H 45	606700	7411625	2720	Río Camar
ATA-11	02/06/93	12 ^H 30	617250	7387850	3600	Río Socaire
ATA-12	02/06/93	16 ^H 40	595625	7381250	2380	Río Peine
ATA-13	02/06/93	17 ^H 30	592125	7368025	2420	Río Tilomonte
ATA-14	03/06/93	09 ^H 45	584100	7471000	2580	Río Vilama
ATA-15	03/06/93	10 ^H 35	596000	7482125	3200	Río Puripica
ATA-16	03/06/93	12 ^H 30	603625	7490500	4100	Manantial termal corriente Puritama
ATA-17	03/06/93	13 ^H 00	598500	7508125	4280	Río Putana
ATA-18	03/06/93	13 ^H 15	595875	7511000	4200	Río Jauna
ATA-19	28/05/94	18 ^H 10	548045	7327315	3250	Manantial difuso
ATA-20	29/05/94	12 ^H 20	570875	7378825	2290	Manantial difuso
ATA-21	29/05/94	13 ^H 30	577675	7370125	2310	Vegas de Tilopozo
ATA-22	29/05/94	15 ^H 20	573250	7374250	2300	Napa (dren)
ATA-23	13/07/94	12 ^H 30	597284	7487932	3550	Manantial corriente
ATA-24	13/07/94	15 ^H 30	607580	7515849	4560	Manantial corriente
ATA-25	26/02/96	15 ^H 30	614988	7474584	5845	Laguna Licancabur (= LIC-1)

SALAR DE ATACAMA (APORTES)
ATA

NUMERO	CEL	T	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
ATA-1	na	11	1,001	8,29	2,28	419	0,038	0,0047	163	0,008	0,530	27,0	0,0120	258	3,79	0,038	99,0	7,14
ATA-2	na	18	1,000	8,18	0,98	82,4	0,023	0,0046	43,2	1,50	0,454	32,8	0,0090	57,5	1,60	0,031	26,9	2,21
ATA-3	1452	4	1,001	8,76	2,82	252	0,132	0,0168	197	0,038	1,55	33,0	0,120	191	13,4	0,160	53,7	30,4
ATA-4	2680	2	1,001	8,00	3,18	604	0,107	0,0181	282	0,055	1,65	32,5	0,120	396	14,7	0,347	102	29,4
ATA-5	3760	25	1,001	7,39	4,24	959	1,43	0,303	271	1,30	19,5	46,8	0,622	520	50,0	4,44	136	60,0
ATA-6	375	18	1,000	7,77	1,48	53,3	0,081	0,0114	24,0	0,053	1,10	34,2	0,0210	40,9	4,89	0,118	18,2	7,05
ATA-7	1921	12	1,001	8,54	6,28	302	0,431	0,0374	234	0,014	20,1	38,4	3,00	271	30,0	1,49	79,8	31,3
ATA-8	1040	10	1,000	8,40	6,04	72,1	0,399	0,449	150	2,50	2,78	37,2	0,0419	81,0	14,8	0,222	85,8	35,2
ATA-9	595	13	1,000	6,80	3,36	44,4	0,081	0,0242	63,4	1,32	1,50	34,4	0,0240	48,3	7,59	0,153	41,7	19,4
ATA-10	2570	21	1,001	7,08	9,06	231	0,302	0,0467	710	0,670	5,50	40,0	0,322	260	21,0	0,666	140	130
ATA-11	1130	10,5	1,000	8,72	3,40	88,8	0,127	0,0306	279	0,942	2,12	29,7	0,202	101	11,8	0,250	61,0	47,4
ATA-12	4160	24	1,002	7,54	2,40	888	0,879	0,0978	768	4,66	10,0	31,9	0,0742	469	29,0	0,541	315	80,2
ATA-13	5890	11	1,002	8,42	3,32	1530	0,911	0,0319	629	0,074	10,1	30,0	0,0824	764	64,9	1,09	275	130
ATA-14	2850	15	1,001	7,85	4,58	547	0,799	0,0994	356	0,038	11,7	44,5	0,562	361	37,5	2,52	108	58,3
ATA-15	2340	0	1,001	8,74	5,44	533	0,815	0,0740	123	0,059	12,0	22,0	0,300	299	38,0	2,48	89,0	55,2
ATA-16	2630	35	1,001	7,13	3,60	533	0,815	0,141	343	0,800	11,6	47,6	0,622	352	37,0	2,58	94,6	53,5
ATA-17	1096	0,5	1,000	8,40	1,98	124	0,170	0,0283	265	0,149	2,15	31,6	0,157	112	26,2	0,423	40,9	42,5
ATA-18	498	13	1,000	6,54	2,10	17,0	0,033	0,0093	113	0,806	0,432	32,5	0,0562	32,4	7,00	0,125	31,5	20,0
ATA-19	na	7	1,002	7,43	3,89	373	0,593	0,132	826	0,124	3,74	16,2	0,0064	292	8,72	0,153	361	21,0
ATA-20	na	14	1,015	7,28	2,05	10800	3,17	0,983	1200	2,04	33,9	25,4	0,449	5410	919	71,5	537	396
ATA-21	na	25	1,002	6,97	7,07	898	0,863	0,166	360	4,35	9,57	48,2	0,382	545	86,0	4,96	153	82,9
ATA-22	na	15	1,003	7,61	5,96	1880	1,10	0,270	552	1,82	13,4	44,2	0,472	1070	196	13,3	151	128
ATA-23	1790	21,4	1,000	7,48	2,25	275	0,333	0,0629	323	0,248	5,34	40,6	0,392	207	21,4	1,09	61,4	47,6
ATA-24	259	12,7	1,000	7,85	1,76	1,46	0,007	nd	32,5	0,744	0,097	26,8	0,0260	13,3	2,58	0,090	15,5	12,8
ATA-25	1965	6,4	1,002	7,81	1,35	155	0,332	0,0345	871	0,205	6,09	4,14	0,0286	124	35,7	0,023	274	52,5

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.

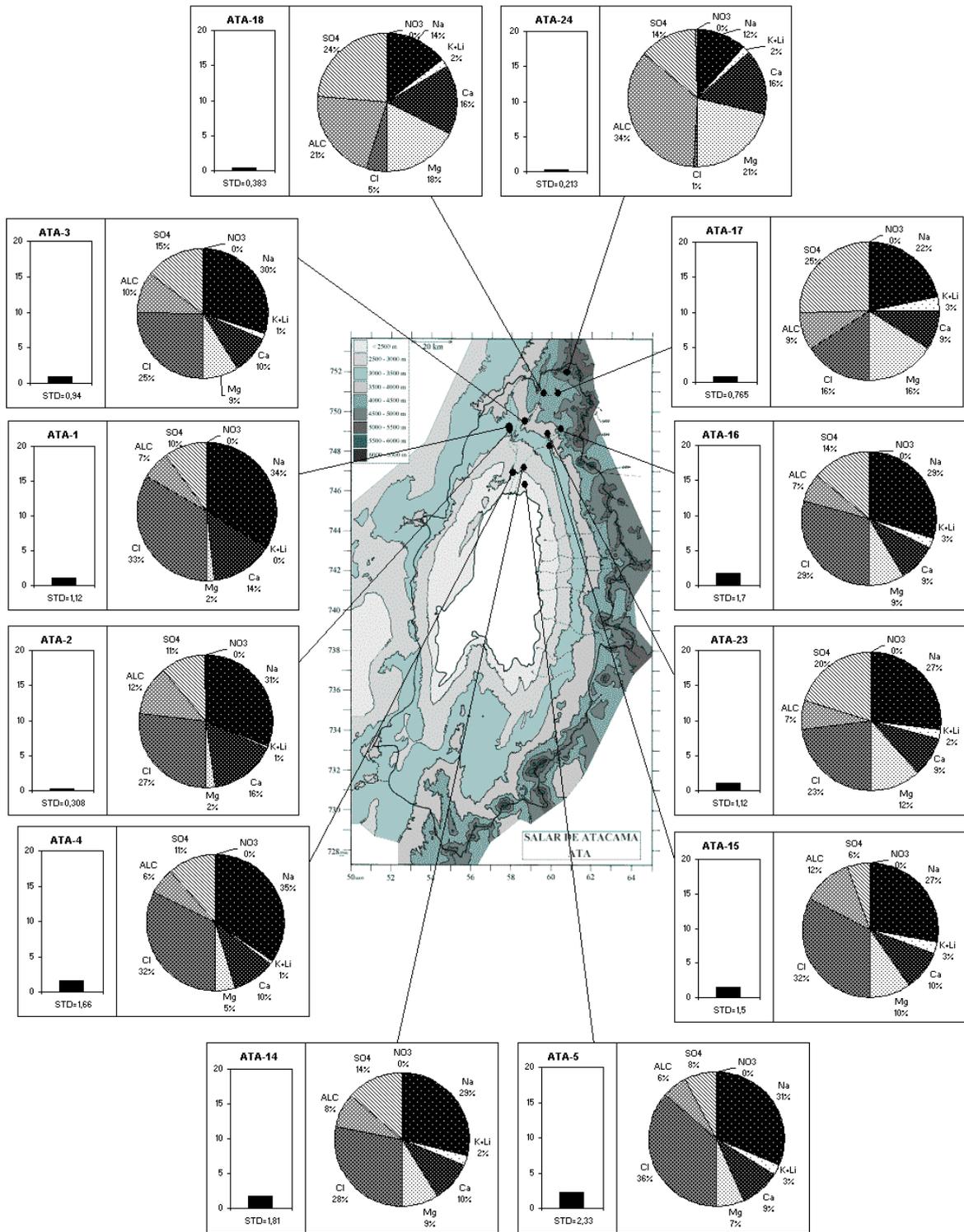
SALAR DE ATACAMA (APORTES)
ATA

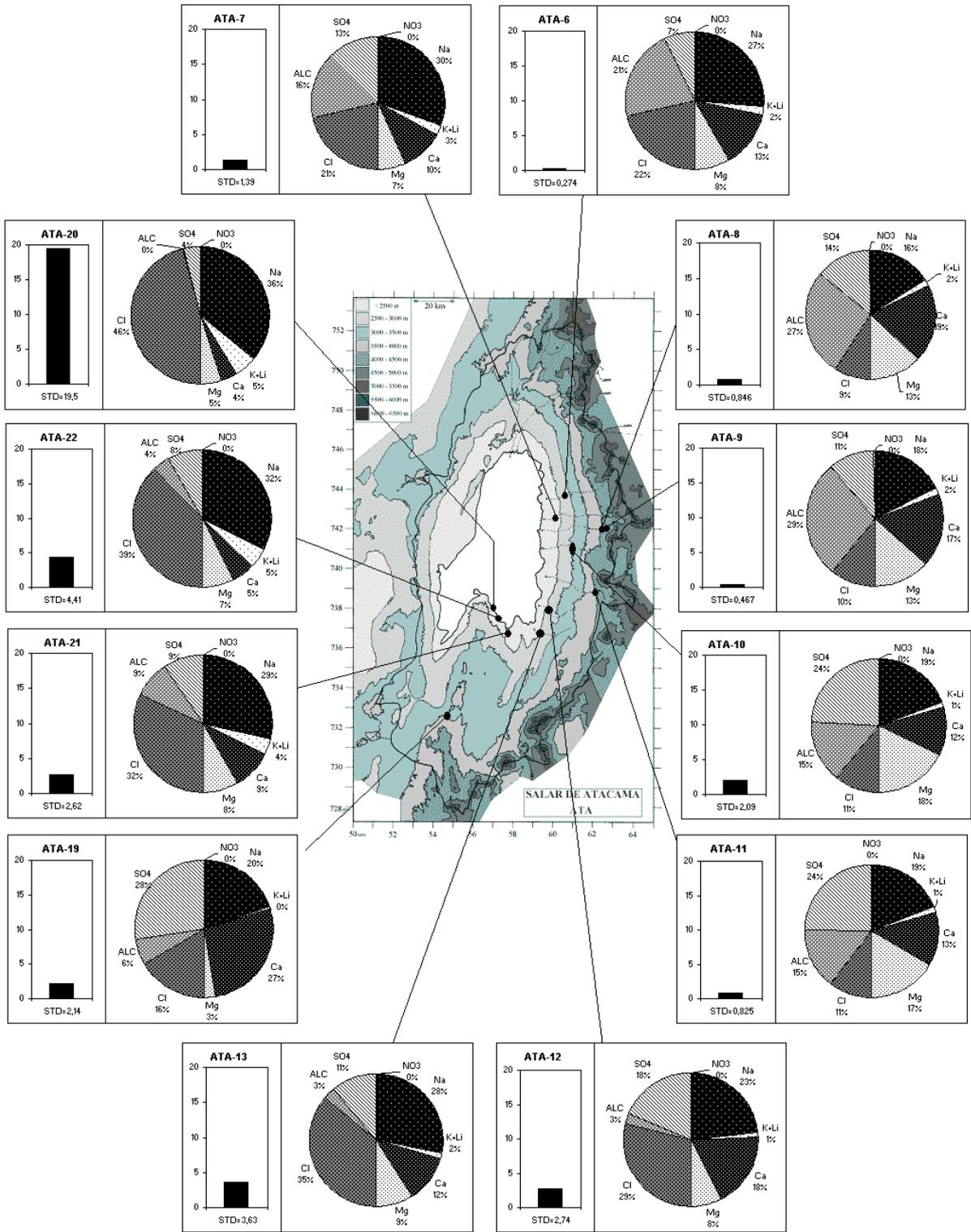
NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF. %	NUMERO	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
ATA-1	1115	132	2,52	1,2	16,83	17,48	3,8	ATA-23	-7.99	-64.0
ATA-2	307,9	57,0	0,60	0,62	4,067	4,224	3,8	ATA-24	-9.06	-65.7
ATA-3	940,2	155	6,36	0,57	13,87	14,02	1,1	ATA-25	9.45	25.2
ATA-4	1655	190	1,50	4,0	25,15	26,06	3,6			
ATA-5	2326	254	1,26	14	36,24	36,90	1,8			
ATA-6	273,9	89,1	0,36	2,5	3,412	3,481	2,0			
ATA-7	1388	338	11,9	1,6	19,34	19,66	1,6			
ATA-8	846,0	346	9,12	2,5	11,11	11,23	1,1			
ATA-9	467,1	205	0,12	57	5,996	5,951	0,8			
ATA-10	2092	550	1,38	62	29,63	30,37	2,5			
ATA-11	825,4	183	9,36	0,62	11,69	11,74	0,4			
ATA-12	2742	142	1,38	5,3	43,52	43,48	0,1			
ATA-13	3630	175	8,64	1,1	59,42	59,42	0,01			
ATA-14	1806	270	2,58	5,7	27,22	27,40	0,7			
ATA-15	1497	292	13,1	1,2	23,31	23,00	1,3			
ATA-16	1695	217	0,66	20	25,74	25,75	0,06			
ATA-17	764,6	115	1,86	1,1	11,13	11,00	1,2			
ATA-18	383,3	128	0,06	66	4,827	4,953	2,6			
ATA-19	2138	235	0,96	16	32,68	31,59	3,4			
ATA-20	19509	120	0,72	7,9	328,2	331,1	0,9			
ATA-21	2624	429	0,90	57	41,08	39,94	2,8			
ATA-22	4413	356	2,46	13	71,57	70,39	1,7			
ATA-23	1120	135	0,54	6,6	16,67	16,73	0,4			
ATA-24	212,9	106	0,48	2,7	2,480	2,491	0,4			
ATA-25	1604	79,9	0,72	2,3	24,28	23,86	1,7			

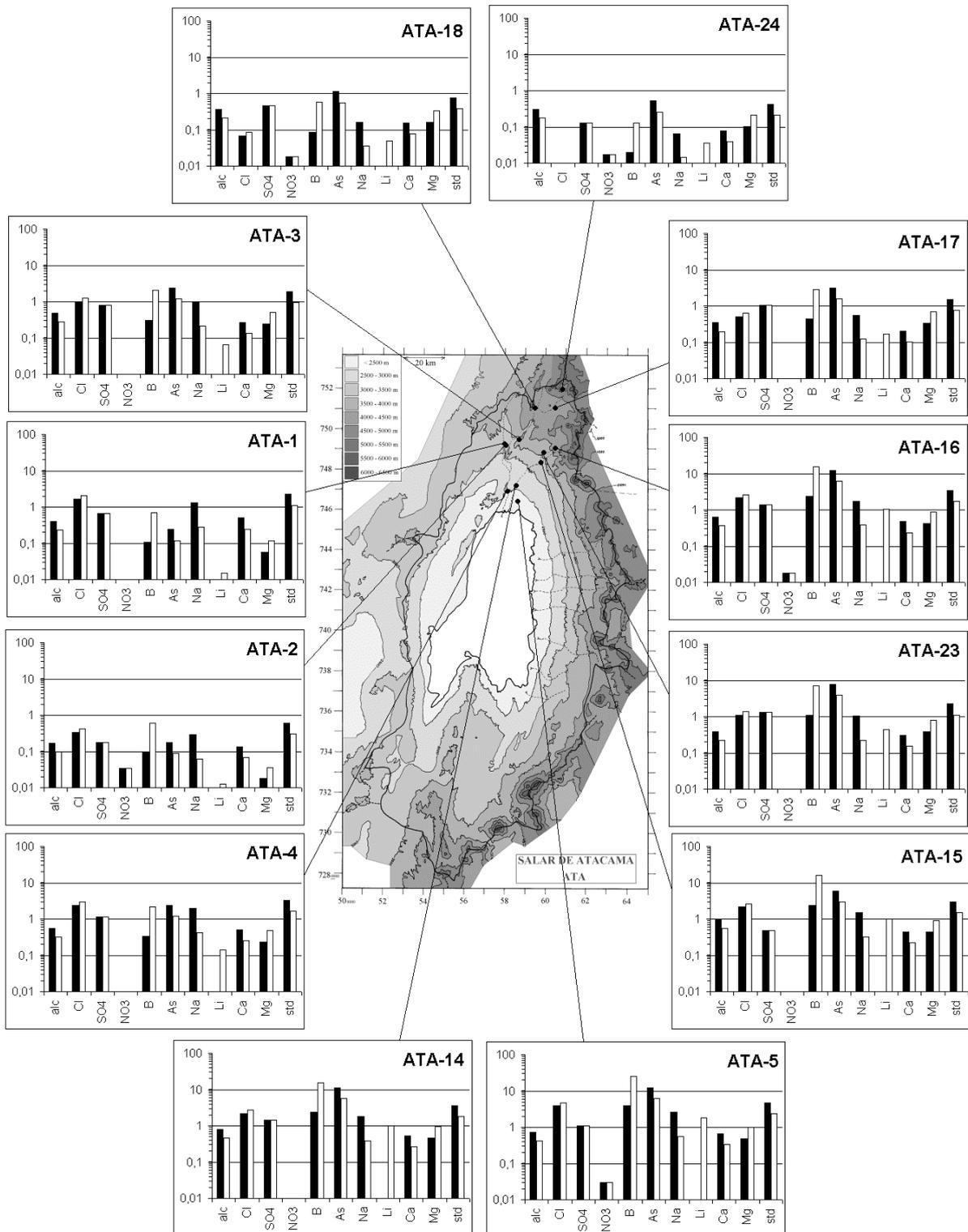
Análisis de oxígeno-18
y deuterio

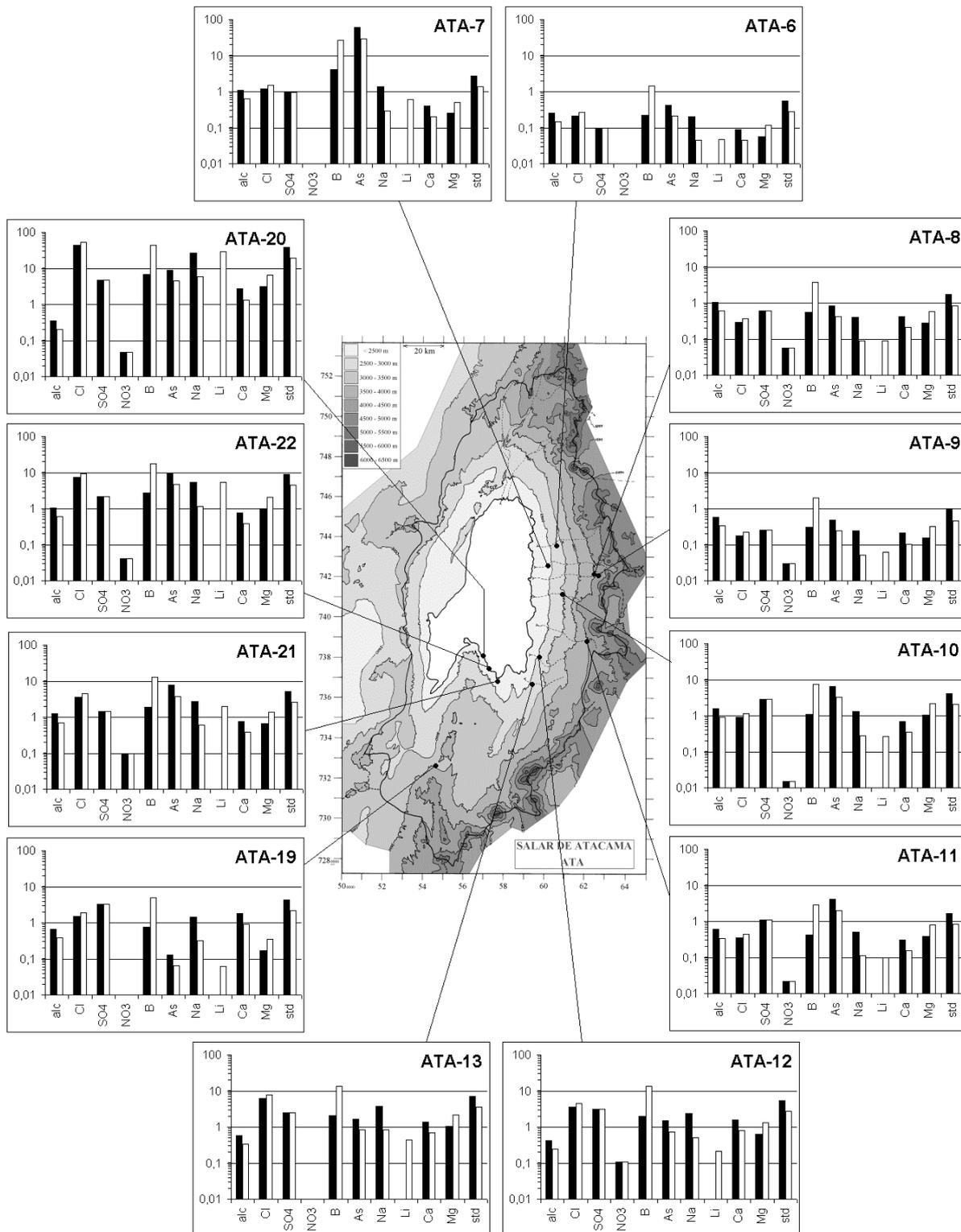
Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.

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





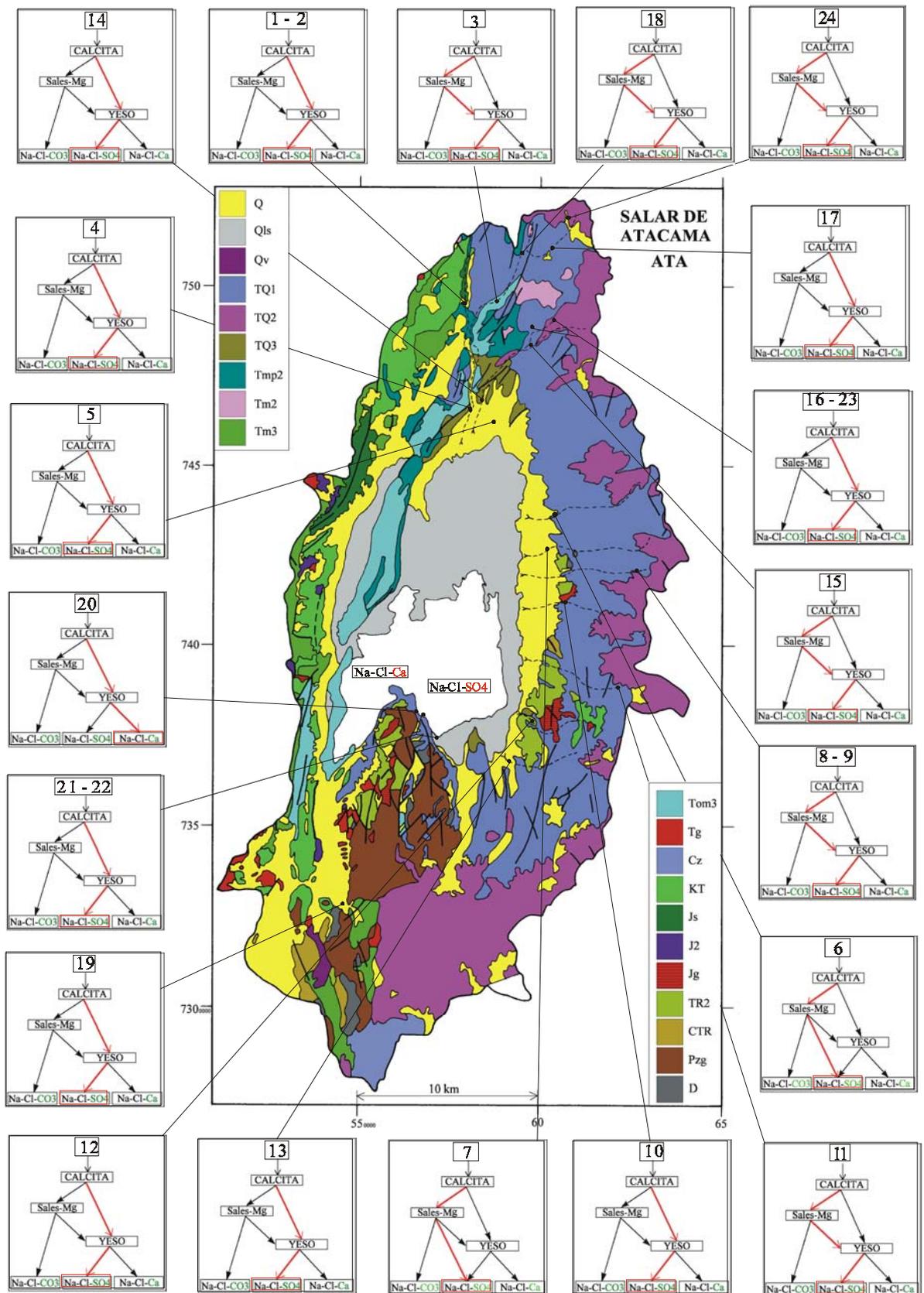




MAPA GEOLOGICO Y VIAS EVOLUTIVAS

ATA

- Q** : *Cuaternario*. Sedimentos fluviales, lacustres, glaciales, eólicos aluviales, coluviales y laháricos.
- Qls** : *Cuaternario*. Zona marginal del salar de Atacama. Limos salinos de carbonato y sulfato de calcio.
- Qv** : *Cuaternario*. Coladas y depósitos piroclásticos riolíticos, dacíticos, andesíticos y basálticos y flujos laháricos asociados a volcanes bien conservados.
- 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.
- TQ3** : *Plioceno - Pleistoceno*. Calizas, areniscas y lutitas calcáreas, cherts y limos con fauna de agua dulce y salobre.
- Tmp2** : *Mioceno - Plioceno*. Ignimbritas riolíticas y riodacíticas con intercalaciones sedimentarias.
- Tm2** : *Mioceno*. Tobas riolíticas y dacíticas, coladas andesíticas y dacíticas.
- Tm3** : *Mioceno*. Gravas de Atacama. Gravas, arenas y limos subordinados, localmente con litificación incipiente e intercalaciones de ignimbritas.
- Tom3** : *Oligoceno - Mioceno*. Fm. San Pedro. Conglomerados, brechas, areniscas, lutitas y limolitas de facies continentales con yeso y capas de sal, al oeste del Salar de Atacama.
- Tg** : *Terciario*. Rocas plutónicas e hipabisales.
- Cz** : *Cenozoico*. Rocas volcánicas: dacitas - andesitas.
- 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.
- Js** : *Jurásico sup.* Conglomerados, areniscas, lutitas, calizas, coladas y brechas andesíticas, continentales.
- 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.
- Jg** : *Jurásico*. Rocas plutónicas e hipabisales.
- TR2** : *Triásico medio - Triásico sup.* Rocas sedimentarias y/o volcánicas. Areniscas, conglomerados y lutitas, localmente con flora fósil. Coladas y brechas riolíticas y andesíticas.
- CTR** : *Carbonífero - Triásico (?)*. Tobas, brechas, coladas e ignimbritas principalmente riolíticas y dacíticas, con intercalaciones de sedimentitas clásticas. Cuerpos hipabisales dacíticos y riolíticos asociados.
- Pzg** : *Paleozoico*. Rocas plutónicas e hipabisales.
- D** : *Devónico*. Cuarzitas, filitas, pizarras, esquistos, lutitas y conglomerados. Facies marinos y transicionales.



SALAR DE TARA

Introducción

El salar de Tara se encuentra en el Altiplano de la II Región cerca del punto fronterizo tripartito entre Chile, Bolivia y Argentina (Cerro Zapaleri). Es un salar de tipo playa con un sistema lagunar de extensión muy variable. Su cuenca se extiende por esos tres países, a igual que el río Zapaleri, su principal alimentación superficial. Este río nace en Bolivia, pasa luego a Argentina y posteriormente a Chile, donde después de escurrir unos 20 km desemboca al lado este de la laguna de Tara. Su caudal en la parte chilena es de 400 l/s y se proyecta su captación para uso potable, siendo la última reserva aprovechable para ese uso en la Segunda Región. Aunque el río ha sido analizado y hay varios informes inéditos, la hidroquímica del salar ha sido poco estudiada. Las características morfométricas y climatológicas del salar son:

- altura: 4400 m
- superficie de la cuenca: 2035 km²
- superficie del salar: 48 km²
- superficie de la laguna 3 -25 km²
- precipitaciones: 150 mm/año
- evaporación potencial: 1500 mm/año
- temperatura media: 0°C

Aportes de agua

Se considera generalmente que el río Zapaleri es el único aporte relevante al salar de Tara y su caudal es excepcional en el ámbito árido de los Andes del norte chileno. Sin embargo, existen otros aportes que no son despreciables, en particular a lo largo de la orilla noroeste del salar.

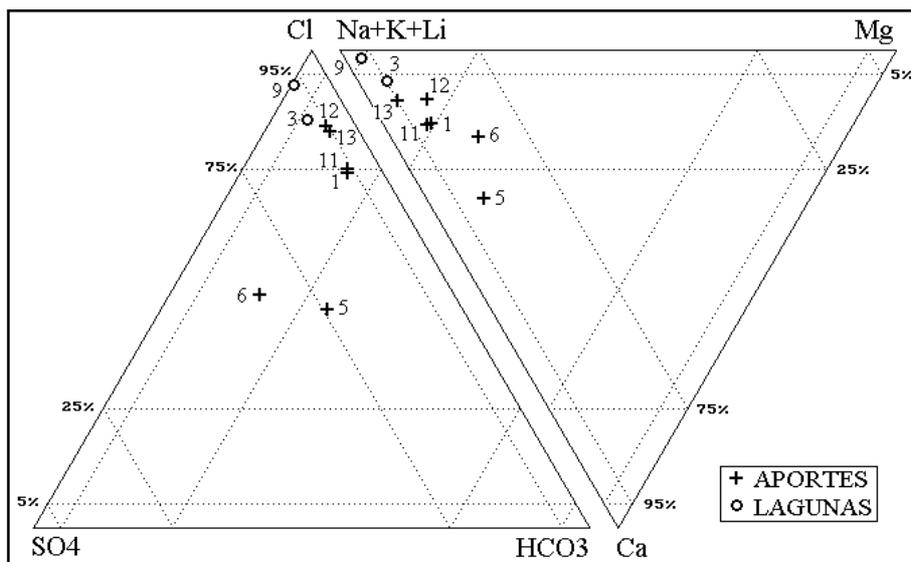


Fig.1 : Composición de las aguas de aporte y lagunas del salar de Tara.

Se distingue en los diagramas triangulares de la figura 1 dos grupos de aguas de aporte :

- las aguas 5 (río Zapaleri) y 6 (vertiente difusa), al oeste de la cuenca, son de tipo Na-(Ca) / Cl-SO₄-(HCO₃).

- las aguas de aporte de la orilla nor-oeste (1, 11, 12, 13) son todas de tipo Na / Cl. Cabe observar que, en los dos grupos de aguas, las salinidades varían bastante pero que las concentraciones porcentuales son casi constantes.

En la figura 2 se puede observar que todas las aguas de Tara se alinean muy cerca de la recta de equimolaridad Na = Cl, lo que indica una contribución de cloruro de sodio en las aguas de aporte, especialmente en las aguas de la orilla noroeste (1, 11, 12, 13).

El agua del río Zapaleri, con una salinidad de 287 mg/l STD, es demasiado diluida para provenir de redisolución de antiguas evaporitas. Su salinidad y su composición química la designan más bien como un agua de alteración de rocas volcánicas. El agua de la vertiente difusa 6, al sureste del salar, es 3,5 veces más salada que el agua del río Zapaleri, pero su composición es muy parecida. La única diferencia, que se puede observar claramente en los diagramas circulares, es una reducción de la concentración porcentual en HCO₃ (alc) y Ca de exactamente 7% entre el agua del río Zapaleri y el agua de la vertiente difusa. Eso sugiere fuertemente que el agua de la vertiente difusa es la misma que la del río Zapaleri, concentrada por evaporación con precipitación de carbonato de calcio (calcita). La vertiente difusa 6 proviene de la descarga de una napa 10 km más al sur del río Zapaleri. Eso invita a pensar en la existencia de napas de composición similar a la del río en gran parte del sector oriental de la cuenca.

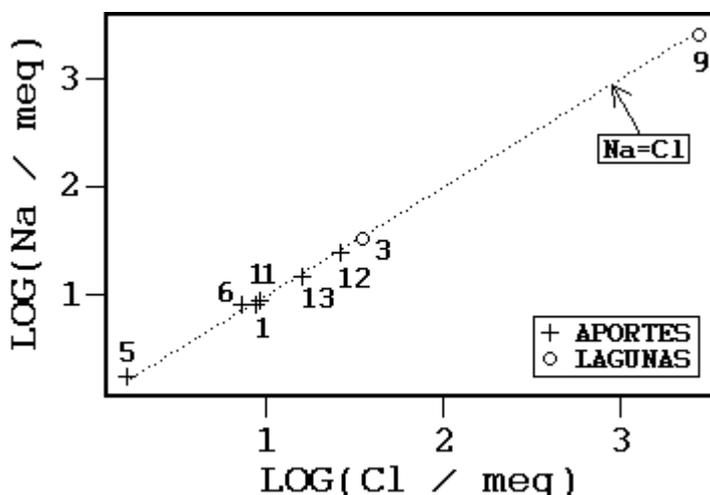


Fig. 2 : Relación entre Na y Cl en las aguas del salar de Tara

Por otra parte, no se observa correlación clara entre Ca y SO₄, lo que excluye una contribución de yeso antiguo en la composición de las aguas de aporte.

Química de las lagunas

Se ha extraído dos muestras de agua de laguna a cada extremo del salar: al norte (3) y al sur (9). La laguna norte es salobre (2,5 g/l STD) y la laguna sur es una salmuera (176 g/l STD). Las dos son de tipo Na / Cl con concentraciones menores en todos los demás componentes. Dentro de ellos, SO_4 es superior a Ca.

Vías evolutivas y relación con la geología de la cuenca

Todas las aguas de aporte evolucionan por evaporación hacia vías sulfatadas. Pero se puede distinguir las aguas de la parte oriental de la cuenca (río Zapaleri) que evolucionan hacia la vía *neutra* sulfatada y las aguas del sector noroeste que evolucionan hacia la vía *alcalina* sulfatada. La relación con la geología de la cuenca es algo ambigua. El agua del río Zapaleri no discrepa con la litología compleja de la parte oriental de la cuenca donde predominan rocas volcánicas con algunos niveles sedimentarios (Tom3, Fm. San Pedro y SO, sedimentos del Silúrico - Ordovícico). No hay que olvidar, sin embargo, que nos faltan informaciones sobre los sectores bolivianos y argentinos. Las vías evolutivas alcalinas sulfatadas reflejan una litología volcánica sin mayor influencia sedimentaria. Observamos que TAR-13 sigue una vía intermedia entre la alcalina sulfatada y la carbonatada, lo que corresponde más a aguas de alteración de terrenos exclusivamente volcánicos con muy poco azufre. Pero hemos visto que estas aguas han rediseñado cloruro de sodio de antiguas evaporitas. La Formación San Pedro, que aflora del otro lado de la cuenca, contiene niveles de halita en el sector del salar de Atacama. No aparece indicio de cloruro de sodio en el agua del río Zapaleri que drena esta formación, posiblemente porque ha sido ya lixiviado en superficie. Esta misma formación debe existir al oeste de la cuenca, recubierta por lavas e ignimbritas. Su lixiviación actual provee NaCl en las aguas de alteración de rocas volcánicas, lo que no modifica sus vías evolutivas, pero si aumenta considerablemente su salinidad.

Evolución cuantitativa de aguas

La tabla 1 presenta la composición calculada de todas las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta la salinidad de las dos lagunas TAR-3 y 9. Hemos recalculado la composición de TAR-3 al equilibrio después de precipitar la calcita. 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 (TAR-xxE) y las soluciones reales. Las aguas de aporte evaporadas que más se asemejan a las dos lagunas son las de la orilla noroeste (1, 11, 12, 13). El exceso de NaCl en estas aguas de aporte se refleja perfectamente en las elevadas concentraciones en Na y Cl de las lagunas. El agua del río Zapaleri no parece tener mucha influencia en la composición de las dos lagunas estudiadas a pesar de constituir el principal aporte al salar. Hay dos explicaciones posibles :

- las aguas de aportes cargadas en NaCl pueden dominar en una mezcla con aguas mucho más diluidas aunque estas sean más abundantes. El río Zapaleri es 4 veces más diluido que los aportes del noroeste. En la mezcla, el agua H_2O proviene sobre todo del río Zapaleri mientras que los componentes disueltos provienen en su mayoría de las vertientes salobres del noroeste. Sin embargo, no se ha podido mejorar la similitud entre las aguas de lagunas y varias mezclas evaporadas de los dos tipos de aporte.

- las dos lagunas muestreadas no son alimentadas por el río Zapaleri. El sistema lagunar es más complejo que parece. Aquí sería preciso un estudio adicional sobre las lagunas.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
TAR-3.EQ	8,52	1,72	1210	154	9,95	24,1	774	35,8	5,26	30,3	25,5	
TAR-11E	8,64	2,62	1190	132	21,6	33,7	748	27,2	6,69	21,1	44,0	0,122
TAR-1E	8,69	2,86	1180	135	20,5	33,8	749	26,7	6,22	17,4	47,1	0,137
TAR-13E	8,55	2,23	1190	98,9	34,3	33,5	742	33,8	6,97	31,9	24,5	0,160
TAR-5E	8,50	1,78	831	597	13,1	33,5	607	107	5,79	47,5	64,7	0,373
TAR-12E	8,53	1,88	1290	108	13,9	3,83	763	23,7	2,01	36,0	55,9	0,389
TAR-6E	8,49	1,78	729	706	17,3	17,1	543	139	4,00	51,6	81,4	0,526
TAR-9	7,99	16,6	98000	9790	373	30,0	60700	3110	404	1020	1050	
TAR-1E	7,44	4,90	94700	10800	996	16,1	59700	2150	501	380	2000	0,261
TAR-11E	7,38	4,70	94900	10600	1060	16,0	59300	2170	535	392	2140	0,276
TAR-12E	7,51	5,82	98500	8260	835	14,0	58200	1810	154	742	3860	0,364
TAR-13E	6,99	3,23	95800	7990	1490	14,3	58700	2730	563	287	1870	0,369
TAR-5E	7,65	8,42	73800	34700	969	17,9	45800	9510	514	671	5700	0,561
TAR-6E	7,43	7,53	66800	41400	1250	17,1	39900	12700	367	566	7430	0,738

Tabla 1 : Comparación de las aguas de aporte evaporadas con las soluciones de las lagunas del salar de Tara.

Calidad de agua

El agua del río Zapaleri es la de mejor calidad, pero tiene un leve exceso en arsénico. En el sector nor-occidental, las aguas (1) y (11) están al límite de potabilidad para los componentes mayores, pero tienen 10 veces más arsénico que el límite permisible. El contenido de boro no las hace recomendable para un uso agrícola.

Balance hídrico

La incógnita sobre el origen de las lagunas estudiadas impide estimar sus infiltraciones. Solamente se puede obtener una idea del volumen de los aportes despreciando el término C_{ap}/C_L casi siempre muy pequeño :

$$V_{ap} = S(H_c - H_p) / (1 - C_{ap}/C_L) \sim S(H_c - H_p) \sim 600 \text{ l/s}$$

con : $S = 14 \text{ km}^2$; $H_c = 1,5 \text{ m/año}$; $H_p = 0,15 \text{ m/año}$.

Tomando un caudal promedio del río Zapaleri de 400 l/s, quedaría un caudal residual del orden de 200 l/s para los aportes desde el noroeste de la cuenca.

Conclusiones

El salar de Tara recibe dos tipos de aportes :

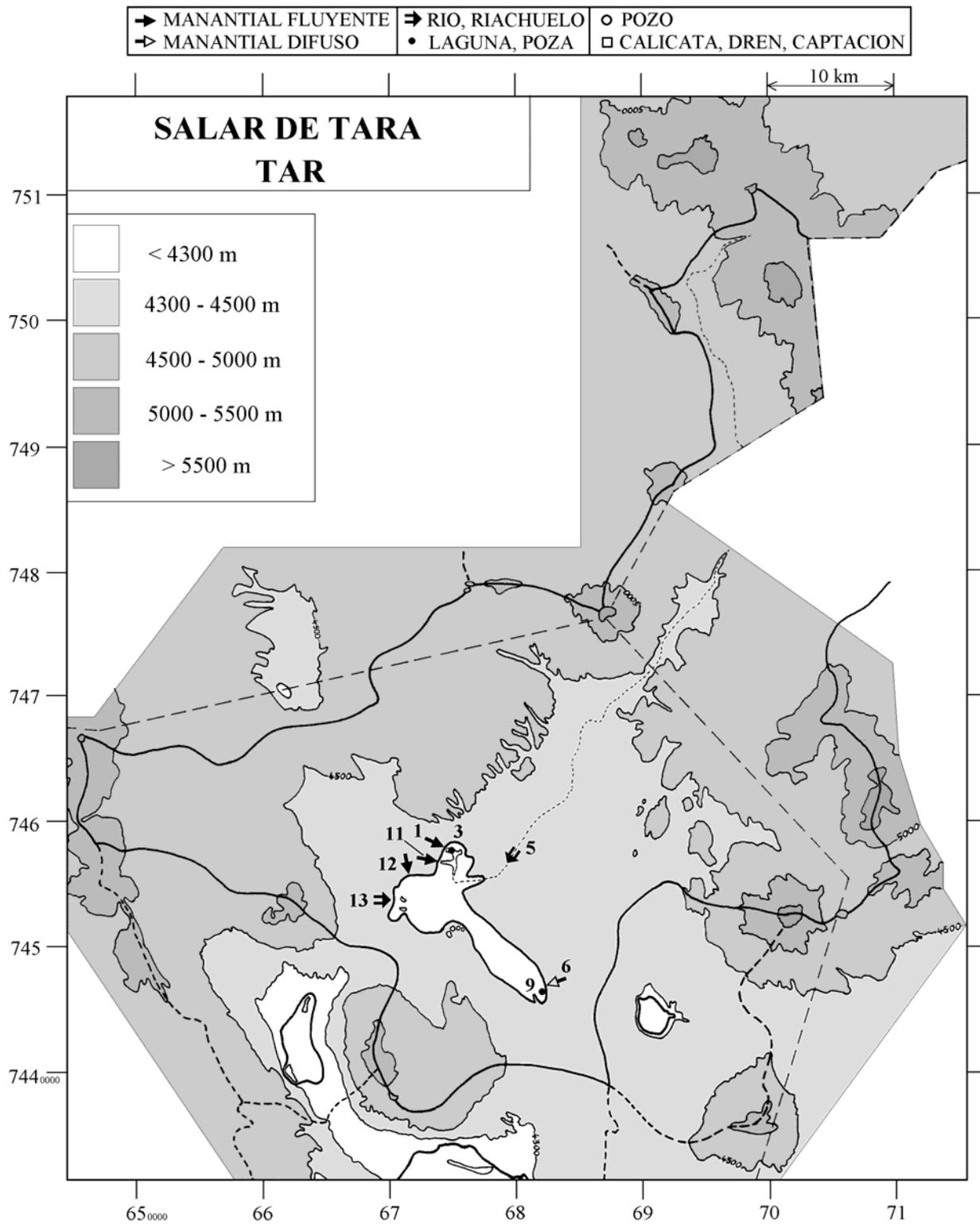
- el río Zapaleri de buen caudal (400 l/s) y de agua muy diluida (287 mg /l STD) de tipo Na-(Ca) / Cl-SO₄-(HCO₃). Los componentes disueltos provienen de la alteración de rocas, en su mayor parte volcánicas, de la cuenca de drenaje.

- vertientes más concentradas (promedio de 1200 mg/l STD) de tipo Na / Cl. El alto contenido en cloruro de sodio provienen de la redisolución de antiguas evaporitas por debajo de las formaciones volcánicas, probablemente la Formación San Pedro.

En lo que se refiere a los caudales entrantes, el río Zapaleri, al este de la cuenca, es el aporte de agua (H₂O) mas importante. Pero, en lo que concierne los componentes disueltos, son los aportes del sector noroeste de la cuenca, cargados en NaCl, que parecen ser los principales proveedores. Es probable que existen napas de composición parecidas a la del río Zapaleri al este del salar.

Referencias y estudios anteriores

Alonso, H. y Vargas, L. 1988. Hidroquímica de lagunas del Altiplano, Segunda Región. V Congreso Geológico Chileno, Santiago, 8-12 Agosto de 1988, Actas, tomo II, D35-D43.



**SALAR DE TARA
TAR**

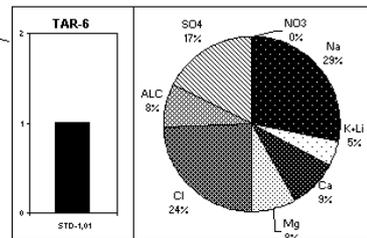
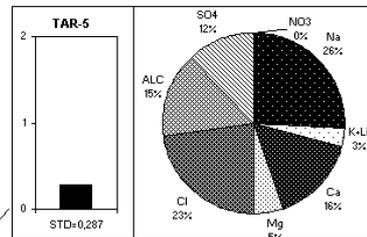
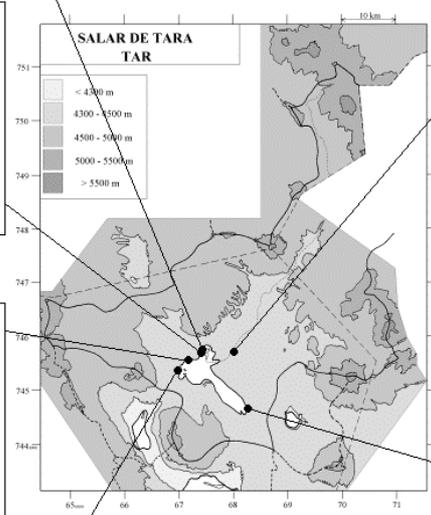
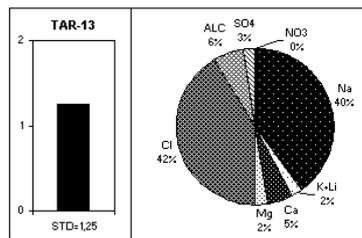
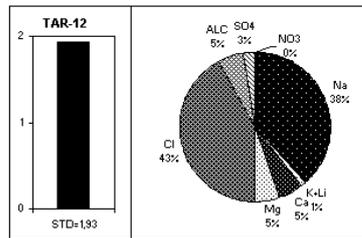
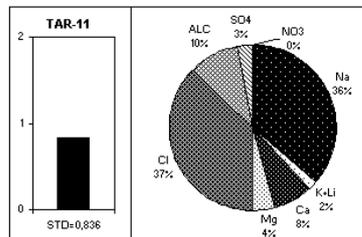
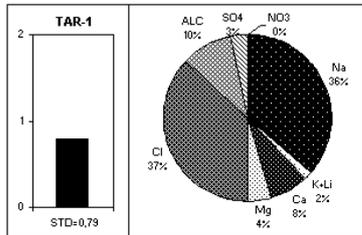
NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
TAR-1	09/10/93	10 ^H 00	674325	7452500	4390	Manantial corriente
TAR-3	09/10/93	10 ^H 30	674725	7451900	4390	Laguna
TAR-5	09/10/93	11 ^H 15	679375	7451450	4395	Río Zapalери
TAR-6	09/10/93	12 ^H 15	682175	7447825	4390	Manantial difuso
TAR-9	09/10/93	12 ^H 40	681825	7447450	4390	Laguna
TAR-11	08/12/94	10 ^H 30	673750	7457000	4390	Manantial corriente
TAR-12	08/12/94	11 ^H 15	671500	7455675	4390	Manantial corriente
TAR-13	08/12/94		670125	7453825	4395	Río Chico

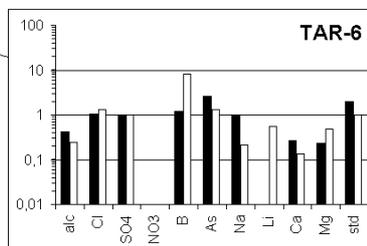
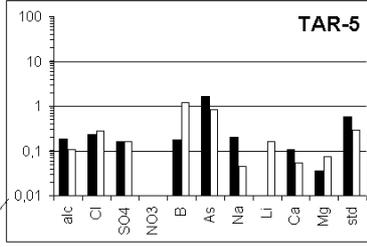
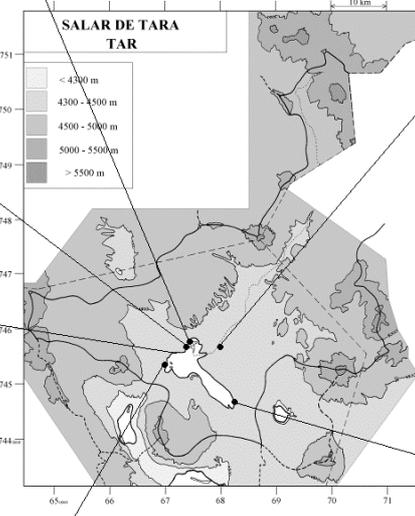
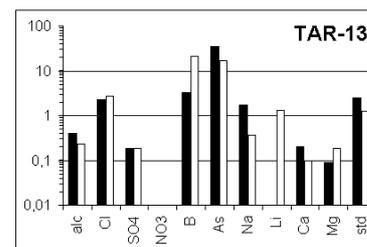
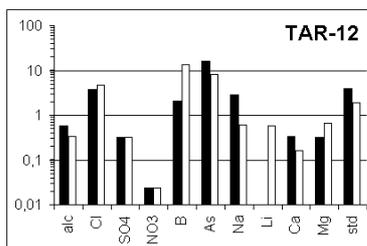
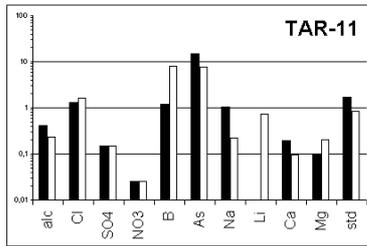
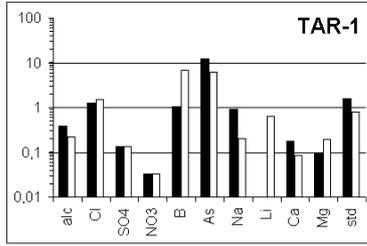
NUMERO	CEL	T	DS	PH	ALC	F	CL	Br	I	SO4	NO3	PO4	B	SI	AS	NH4	NA	K	LI	CA	MG
TAR-1	1240	19	1,000	6,67	2,24	0,30	305	0,324	0,0171	34,1	1,43	nd	5,20	25,2	0,619	0,13	185	6,76	1,58	34,8	11,9
TAR-3	4170	13	1,002	8,15	2,69	0,36	1240	1,17	0,0260	154	nd	nd	9,95	24,1	0,981	0,27	757	35,8	5,26	49,7	25,5
TAR-5	367,0	6	1,000	8,72	1,05	0,27	56,8	0,089	0,0089	40,8	0,062	nd	0,897	22,3	0,0824	0,02	41,4	7,31	0,396	21,9	4,42
TAR-6	1529	16	1,001	8,14	2,44	1,6	257	0,280	0,0463	249	0,124	nd	6,08	6,02	0,132	0,13	191	48,9	1,41	54,5	28,7
TAR-9	169600	22	1,115	7,99	16,6	1,3	98000	87,9	1,17	9790	0,372	1,3	373	30,0	39,8	na	60700	3110	404	1020	1050
TAR-11	1460	22	1,000	6,14	2,35	na	326	0,399	0,0192	36,4	1,13	na	5,95	27,0	0,756	na	206	7,47	1,84	38,5	12,1
TAR-12	3560	22,7	1,001	6,00	3,36	na	937	0,999	0,0268	79,0	1,06	na	10,1	27,9	0,801	na	561	17,3	1,47	66,2	40,8
TAR-13	2160	na	1,001	7,88	2,29	na	557	0,542	0,0305	46,1	nd	na	16,0	35,6	1,72	na	343	15,8	3,25	39,9	11,4

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. %
TAR-1	789,8	137	0,06	44	11,18	11,59	3,7
TAR-3	2512	155	2,04	1,7	39,17	40,73	3,9
TAR-5	286,6	58,5	1,50	0,23	3,499	3,516	0,5
TAR-6	1013	142	1,98	1,6	14,84	14,96	0,8
TAR-9	176486	-	-	-	2915	2982	2,3
TAR-11	836,1	143	0	150	12,32	12,31	0,1
TAR-12	1932	205	0	280	31,72	31,42	0,9
TAR-13	1250	136	0,54	4,2	18,70	18,95	1,3

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

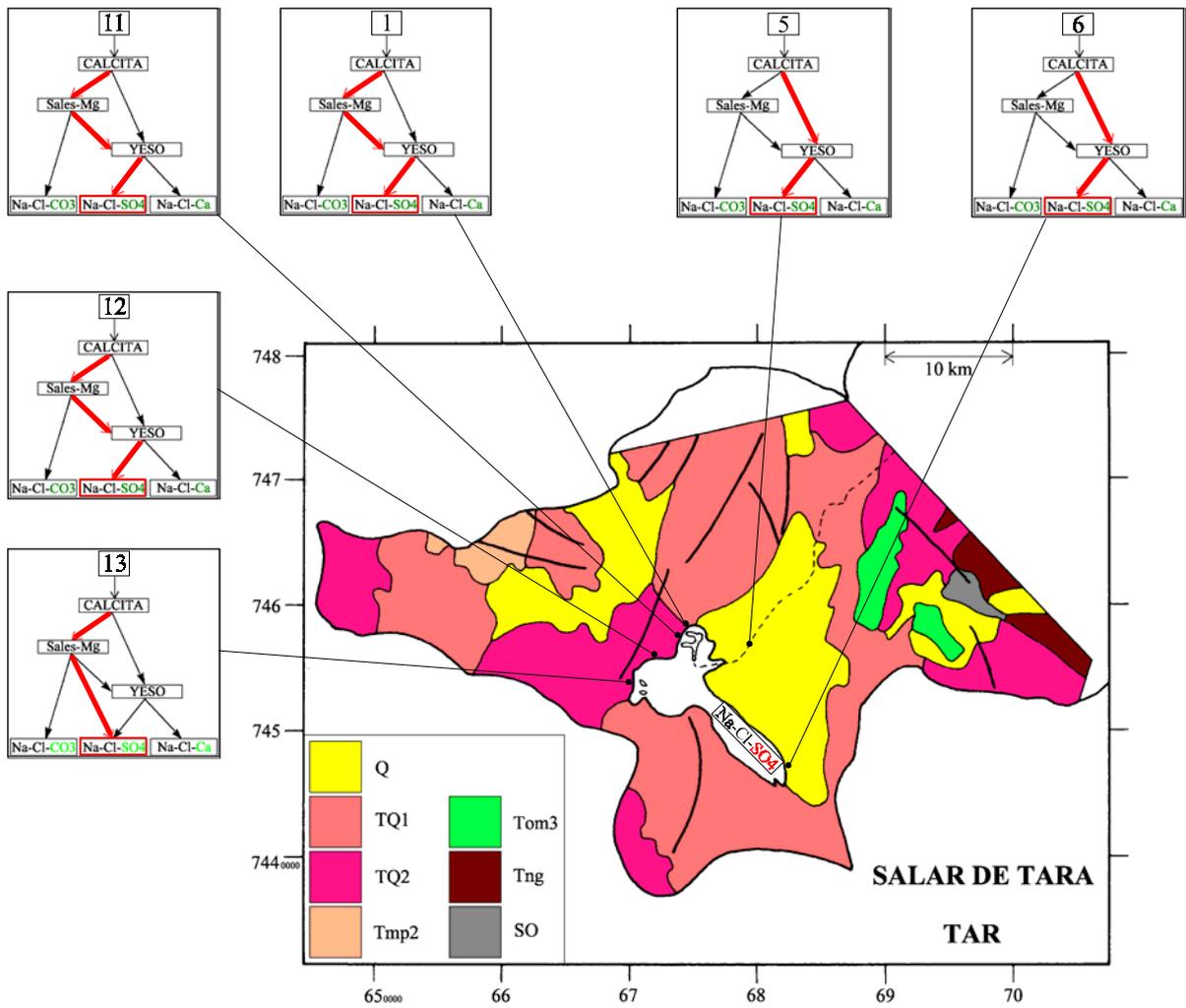




MAPA GEOLOGICO Y VIAS EVOLUTIVAS

TAR

- 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 riocácicas con intercalaciones sedimentarias.
- Tom3** : *Oligoceno - Mioceno*. Fm. San Pedro. Conglomerados, brechas, areniscas, lutitas y limolitas de facies continentales con yeso y capas de sal, al oeste del Salar de Atacama.
- Tng** : *Neogeno*. Rocas plutónicas e hipabisales.
- SO** : *Silúrico - Ordovícico*. Areniscas cuarcíferas y feldespáticas, lutitas, conglomerados, cherts y calizas.



LAGUNA HELADA

Introducción

La cuenca de laguna Helada se encuentra en el Altiplano de la II Región, a unos 8 km al este del salar de Tara, muy cerca de la frontera con Argentina. Es la cuenca mas oriental en todo el norte el Chile. La superficie de la laguna no parece variar notablemente en el curso del año. Sus principales características morfométricas y climatológicas son:

- altura: 4300 m
- superficie de la cuenca: 221 km²
- superficie del salar: 5,8 km²
- superficie de la laguna 5,8 km²
- precipitaciones: 180 mm/año
- evaporación potencial: 1500 mm/año
- temperatura media: 0°C

Hemos encontrado solamente una vertiente en las orillas de la laguna; las demás vertientes surgen cuenca arriba. Existen pequeñas pozas en la cuenca de drenaje que parecen ser afloramiento de napa más que colectores de aguas de lluvia. Existen numerosas pozas y lagunitas de este tipo en otras cuencas del Altiplano chileno a todo lo largo de la frontera con Argentina.

Aportes de agua

La figura 1 presenta la composición de todas las aguas de la cuenca. Se observa una gran variedad de composición para un número reducido de aguas.

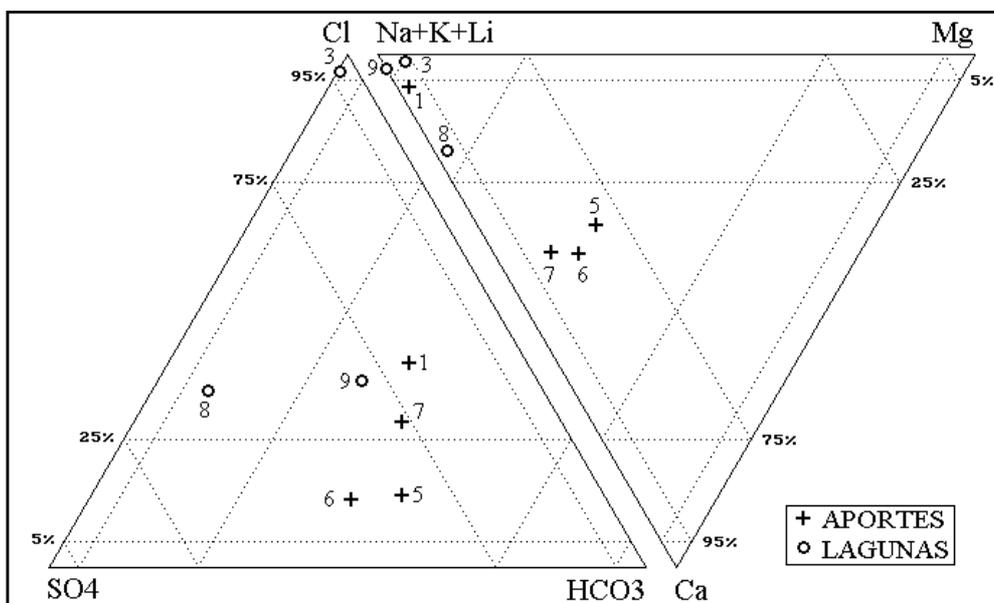


Fig.1. Composición de las aguas de aporte y de las salmueras de laguna Helada.

Aparecen dos tipos de aguas de aportes :

- la vertiente de la orilla (1) es de tipo : Na / Cl-HCO₃-(SO₄)
- las vertientes cuenca arriba (5, 6, 7) son de tipo : Na-Ca / HCO₃-SO₄

No se observa en las aguas de aporte ninguna equimolaridad entre Na y Cl, de una parte, y Ca y SO₄, de otra parte. No aparece entonces contribución alguna de antiguas evaporitas en la composición de los aportes. Sus bajas salinidades (118-346 mg/l STD) sugieren más bien que la composición de las aguas de aporte proviene de la alteración de las rocas volcánicas de la cuenca de drenaje.

Composición de las lagunas

Cada una de las tres lagunas tiene una composición particular :

- laguna principal (3) : Na /Cl-((SO₄)) (308 g/l STD)
- poza (8) : Na-(Ca) / SO₄-Cl (4,9 g/l STD)
- poza (9) : Na / CO₃-SO₄-Cl (2,9 g/l STD)

La salmuera de la laguna principal contiene mas SO₄ que Ca, y está casi a saturación con la mirabilita (Na₂SO₄.10H₂O). El sulfato, a pesar de su contenido bajo en comparación al de Na y Cl, no puede ser despreciado pues juega un papel importante en la química de la laguna. El agua de la poza 9 tiene un pH superior a 10, lo que indica que las especies carbonatadas se encuentran en gran parte como CO₃. Es una lagunita carbonatada y su evolución ulterior por evaporación la lleva hacia una salmuera de carbonato de sodio. Es la única lagunita carbonatada que hemos encontrado en todas las cuencas del norte de Chile.

Vías evolutivas y relación con la geología

La vertiente 1, que entra en la gran laguna, sigue la vía carbonatada, en buen acuerdo con la litología volcánica de la cuenca, pero en desacuerdo con la composición neutra de la laguna. Ya se puede decir que la laguna no proviene de la evaporación de la única vertiente en su orilla. Las tres vertientes cuenca arriba siguen la vía alcalina sulfatada. Dos de ellas (5 y 7) siguen la variante directa, es decir sin pasar por la precipitación del yeso. Están al límite de seguir la vía carbonatada. Estas evoluciones son perfectamente coherentes con la litología exclusivamente volcánica de la cuenca con poco, o sin, azufre. La composición de la laguna principal corresponde, en sus rasgos mayores, a la evolución de las vertientes cuenca arriba.

Evolución cuantitativa de aguas

La tabla 1 presenta la composición calculada de todas las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta la salinidad de las tres lagunas. Las soluciones reales 8 y 9 son muy sobresaturadas en calcita y en sales de magnesio. Por eso hemos recalculado la composición de estas soluciones una vez llevadas al equilibrio después de precipitar esos minerales. 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 (HEL-xE) y la soluciones reales equilibradas (HEL-x.EQ).

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
HEL-3	7,46	26,1	179000	7080	819	22,7	106000	7270	708	1520	2450	
HEL-7E	6,64	4,28	124000	44000	2800	12,7	68000	40300	626	239	5790	0,866
HEL-1E	10,1	1200	121000	23900	861	35,6	107000	11800	1220	0,24	0,968	1,010
HEL-5E	6,73	4,58	109000	61600	3090	15,4	55300	60400	426	67,1	4170	1,100
HEL-6E	6,96	8,90	54900	120000	3320	18,6	39500	54800	197	60,1	12500	1,550
HEL-8.EQ	8,86	1,79	842	1860	46,3	42,4	1000	418	1,76	170	14,6	
HEL-5E	8,83	5,04	594	1950	50,6	34,4	907	667	2,32	15,9	58,9	0,467
HEL-6E	8,65	3,30	468	2230	41,8	33,9	851	544	1,68	36,7	134	0,477
HEL-7E	8,74	4,02	1080	1480	44,6	34,0	1120	367	9,81	21,5	82,5	0,649
HEL-1E	9,47	23,3	1040	703	50,3	39,4	1450	102	10,6	0,86	3,38	1,000
HEL-9.EQ	10,4	12,9	541	582	40,0	80,9	719	348	1,34	0,66	0,05	
HEL-1E	9,34	14,8	649	438	31,3	37,6	901	63,3	6,58	1,20	4,81	0,863
HEL-5E	8,83	4,34	365	1200	31,1	34,4	557	410	1,43	13,0	49,3	0,873
HEL-6E	8,69	3,12	289	1380	25,8	34,0	525	336	1,04	25,3	94,3	0,967
HEL-7E	8,76	3,66	664	910	27,5	34,1	688	226	6,04	16,3	63,4	1,030

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

Lo que se nota inmediatamente es la mala correlación entre todas las aguas de aportes y las lagunas. El mejor ajuste es entre la poza (8) y la vertiente (5) (desviación = 0,467). Sin embargo, el escrutinio de las concentraciones muestra altas divergencias para Ca, Mg y alc (HCO_3). Si nos fijamos solamente en los rasgos mayores, se puede observar, sin embargo, algunas tendencias coherentes. En primer lugar, la poza carbonatada (9) tiene su mejor relación con la única agua de vía evolutiva carbonatada (1). Si obviamente HEL-1 no puede alimentar la poza (9), eso indica que esta última recibe aguas similares a HEL-1. La poza (8) tiene su mejor correlación con la vertiente más cercana (5). La laguna principal tiene muy mala correlación con cualquier de los aportes. Basta observar las concentraciones en SO_4 , K y Ca para darse cuenta que los aportes estudiados tienen poca relación con la laguna. Ninguna mezcla evaporada de las cuatro aguas de aporte llega a una salmuera similar a la de la gran laguna. No se ha encontrado entonces el aporte principal de ninguna laguna. Se trata probablemente de napas subterráneas en la cuenca de drenaje.

Calidad de agua

A pesar de ser muy diluidos los aportes, dos solamente respetan las normas de potabilidad : (HEL-5 y 6). Por su parte, HEL-1 contiene 1,7 mg/ de arsénico, o sea 34 veces el máximo permisible para uso potable, y HEL-7 casi 3 veces más, presentando en los demás componentes concentraciones aceptables para el consumo humano. Hay demasiado boro en HEL-1 para un uso agrícola.

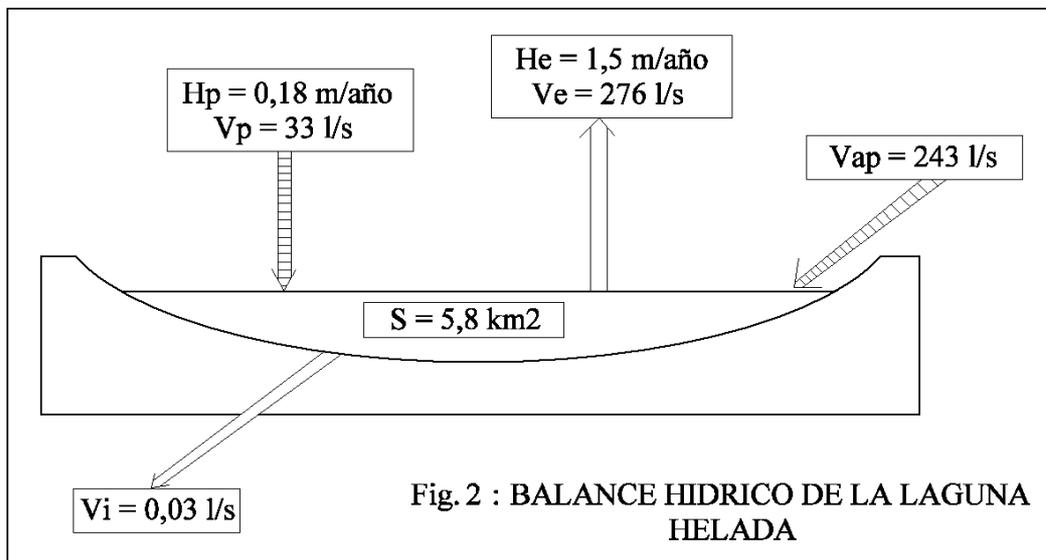
Balance hídrico de la laguna principal

Se utiliza el cloruro como elemento conservativo. No conocemos la composición del mayor aporte a la laguna; pero todos los que hemos encontrado son diluidos. Es probable que el aporte principal tenga concentraciones del mismo orden de magnitud. Para estimar las infiltraciones hemos tomado el promedio de las concentraciones en Cl de las cuatro vertientes. Los parámetros considerados son :

- $H_e = 1,5$ m/año
- $H_p = 0,18$ m/año
- $S = 5,8$ km²
- $C_{ap} = 22,7$ mg/l
- $C_L = 179\ 000$ mg/l

Volumen de aporte : $V_{ap} = S(H_e - H_p)/(1 - C_{ap}/C_L) = 7\ 657\ 000$ m³/año = 243 l/s

Volumen de infiltraciones : $V_i = S(H_e - H_p)/(1 - C_L/C_{ap}) = 971$ m³/año = 0,03 l/s

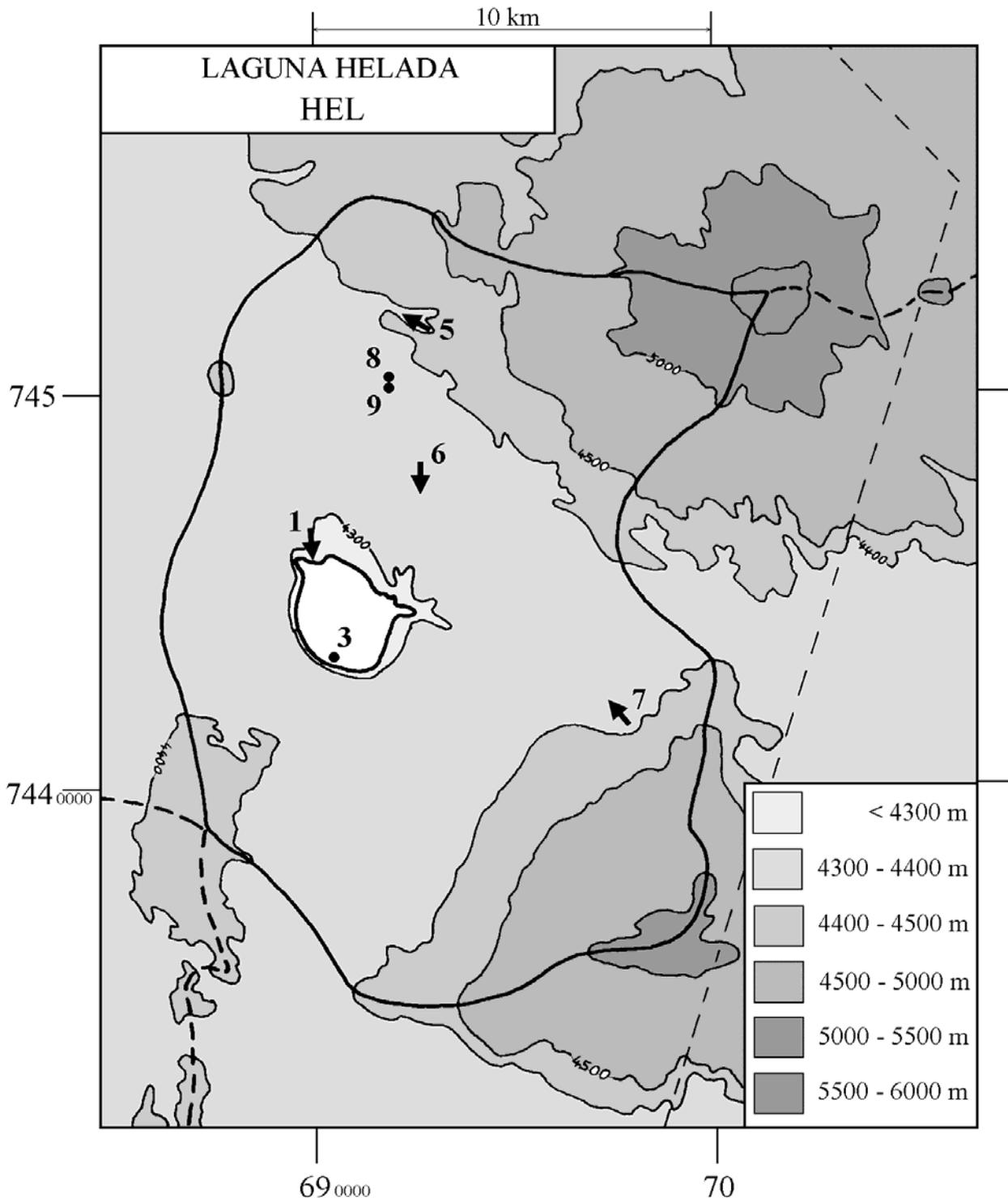


El caudal entrante es bastante elevado : 243 l/s, más o menos la mitad del caudal del río Zapaleri en la vecina cuenca de Tara. Una gruesa estimación visual del caudal de la vertiente (1), a la orilla de la laguna, dio 1 a 2 l/s. Es obvio que hay aportes adicionales, considerando que la contribución de la única vertiente cercana a la laguna es despreciable. En cuanto a las infiltraciones, estas son casi nulas. El coeficiente de escurrimiento (razón entre volumen caído y volumen entrante) es de 0,2.

Conclusiones

La cuenca de laguna Helada presenta un evidente interés en cuanto a recursos de agua. El factor limitante es el alto contenido en arsénico de las aguas. No se ha encontrado el principal aporte a la laguna. Se trata probablemente de varias napas de distintas composiciones, pero siempre de vía evolutiva carbonatada o alcalina sulfatada.

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



**LAGUNA HELADA
HEL**

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE	METROS	
HEL-1	09/10/93	14 ^H 45	689925	7446125	4300	Manantial corriente
HEL-3	09/10/93	15 ^H 30	690450	7443050	4380	Laguna
HEL-5	12/07/94	14 ^H 00	692852	7451702	4390	Manantial corriente
HEL-6	12/07/94	15 ^H 10	692173	7447619	4395	Manantial corriente
HEL-7	12/07/94	15 ^H 57	697657	7442501	4375	Manantial corriente
HEL-8	12/02/96	18 ^H 30	691781	7450362	4380	Lagunita
HEL-9	23/02/96	11 ^H 25	691753	7450393	4380	Lagunita

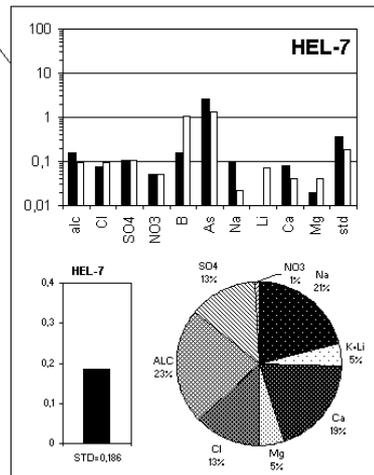
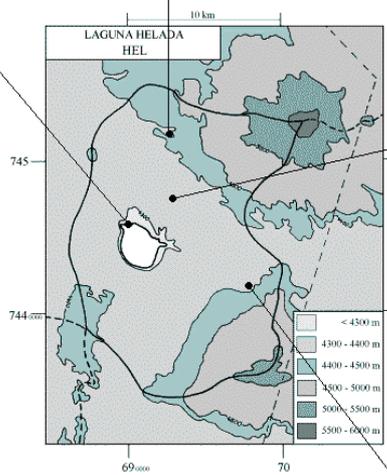
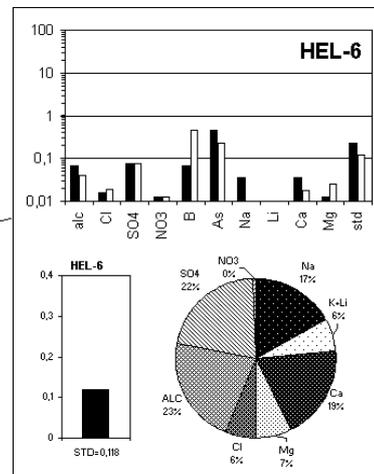
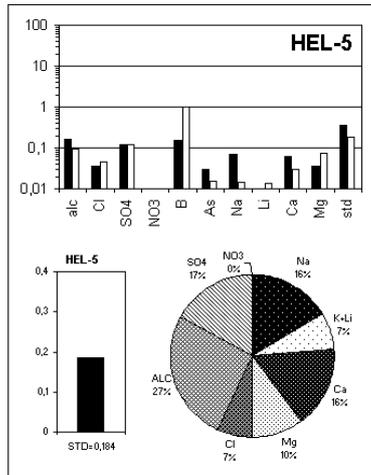
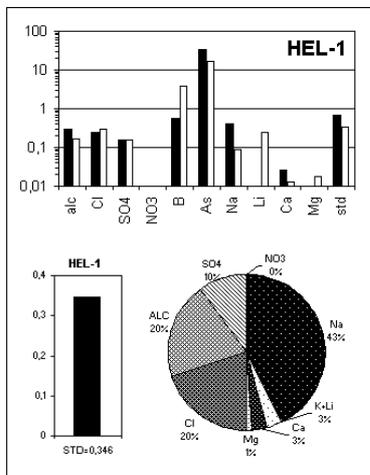
NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	F	CL	Br	I	SO4	NO3	PO4	B	SI	AS	NH4	NA	K	LI	CA	MG
HEL-1	440	9	na	1,000	9,17	1,69	0,7	58,9	0,019	0,0105	39,7	nd	nd	2,84	21,0	1,72	0,6	81,0	5,75	0,597	5,33	1,07
HEL-3	200000	24	na	1,196	7,46	26,1	1,6	179000	74,9	0,985	7080	0,620	2,3	819	22,7	73,6	na	106000	7270	708	1520	2450
HEL-5	212	0,4	na	1,000	7,10	0,937	na	8,88	0,025	0,0024	29,2	nd	na	0,757	22,3	0,002	na	13,5	9,97	0,035	12,2	4,42
HEL-6	107	7,8	na	1,000	7,42	0,399	na	3,87	0,015	0,0019	18,4	0,558	na	0,346	23,3	0,023	na	7,04	4,50	0,014	7,02	1,56
HEL-7	232	5,6	na	1,000	7,60	0,920	na	19,1	0,028	0,0042	26,1	2,23	na	0,789	17,4	0,130	na	19,9	6,49	0,174	15,9	2,45
HEL-8	6110	17,8	na	1,004	9,65	6,62	na	841	0,446	0,0423	1860	2,43	na	46,3	50,7	0,279	na	1010	418	1,76	259	19,4
HEL-9	3980	11,3	na	1,003	10,47	14,1	na	529	1,73	0,244	582	6,70	na	40,0	81,5	0,543	na	727	348	1,34	23,6	0,413

T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l. NUMERO $\delta^{18}O$ δ^2H
 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
HEL-1	346,2	81,7	4,98	0,11	4,138	4,212	1,8	HEL-1	na	na
HEL-3	308546	-	-	-	5166	5225	1,1	HEL-3	na	na
HEL-5	183,8	57,1	0,0	11	1,821	1,795	1,4	HEL-5	-10.6	-91.3
HEL-6	117,5	24,2	0,0	1,9	0,901	0,901	0,07	HEL-6	-11.6	-94.4
HEL-7	186,4	55,8	0,12	3,0	2,049	2,037	0,6	HEL-7	-11.26	-93.0
HEL-8	4851	65,9	45,2	0,02	69,19	69,16	0,04	HEL-8	10.3	15.6
HEL-9	2879	106	198	0,0	41,91	41,23	1,6	HEL-9	7.26	0.4

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

Análisis de oxígeno-18 y deuterio



MAPA GEOLOGICO Y VIAS EVOLUTIVAS

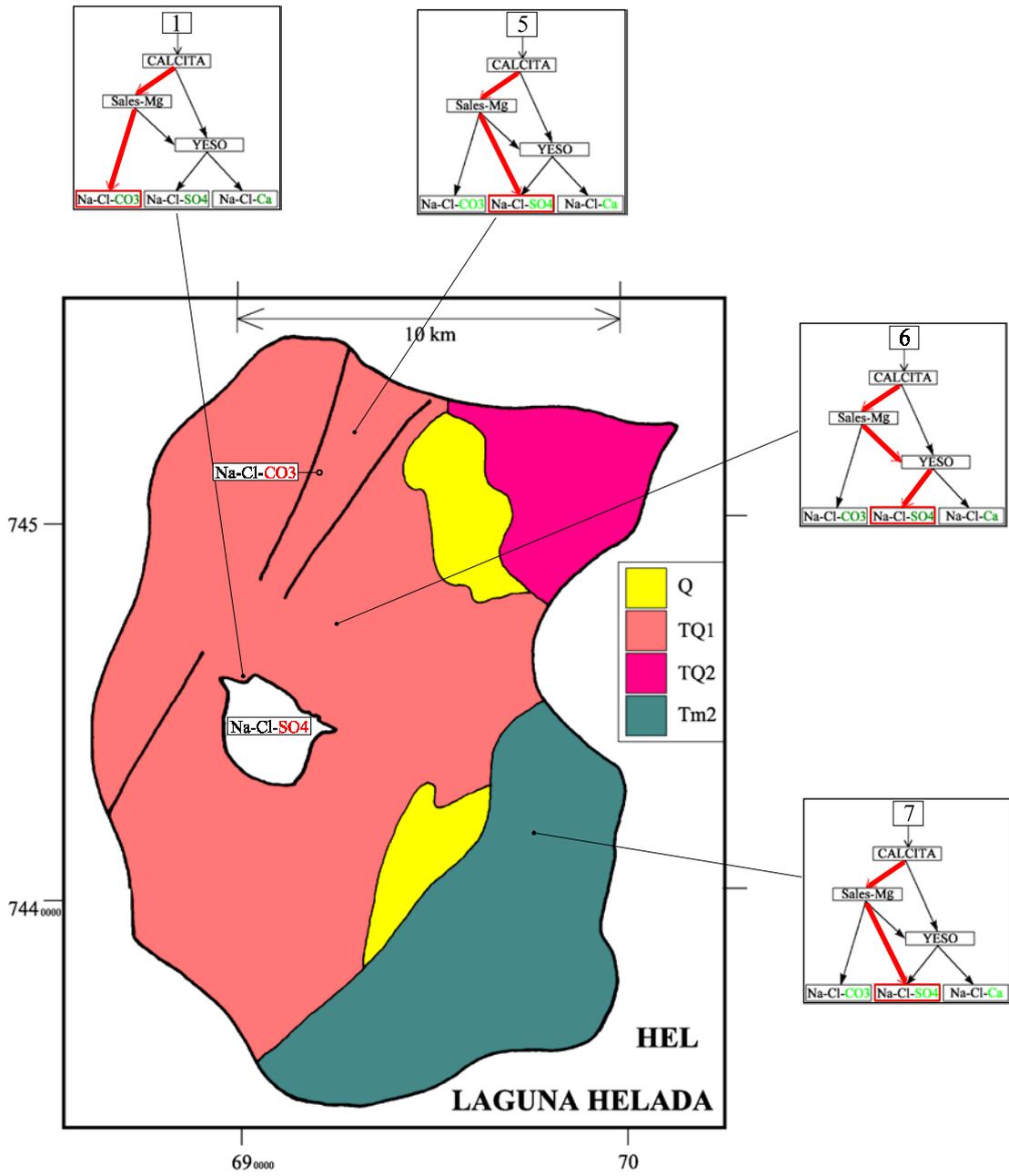
HEL

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.

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



SALAR DE AGUAS CALIENTES 1

Introducción

El salar de Aguas Calientes 1 se encuentra en el norte del Altiplano de la II Región en la pampa del mismo nombre entre el cordón Quilapana al este y los cerros de la Pacana al oeste, flanqueado por otros dos salares: el salar de Tara y el salar de Pujsa. Es un salar de tipo playa con lagunas superficiales de extensión variable y una napa de salmuera a unos decímetros de profundidad. Sus principales características morfométricas y climatológicas son:

- altura: 4280 m
- superficie de la cuenca: 281 km²
- superficie del salar: 15 km²
- superficie de las lagunas: 2-3 km²
- precipitaciones: 150 mm/año
- evaporación potencial: 1500 mm/año
- temperatura media: 1°C

Se sacó tres muestras de vertientes, una de la laguna principal y otra de la napa subterránea del salar.

Composición de las aguas y salmueras

Las composiciones de aguas del salar de Aguas Calientes 1 están presentadas en la figura 1 y en la tabla 1. Las tres vertientes son todas fluyentes. Una es de agua salobre (11) y las dos otras de agua salada (1, 4). Hay que recalcar la salinidad particularmente elevada de la vertiente fluyente AC1-1 (24 g/l), así como su alta temperatura (52°C).

<u>APORTES</u>	<u>SALINIDAD</u> mg/l	<u>TIPO QUÍMICO</u>		<u>VÍA EVOLUTIVA</u>
		Cationes	Aniones	
AC1-11	1359	Na-(Ca) - (Mg)	/ Cl- (HCO3) - (SO4)	SO4 (N)
AC1-4	6233	Na-(Ca)	/ Cl	Ca
AC1-1	24245	Na-(Ca)	/ Cl	Ca
<u>SALMUERAS</u>				
AC1-6	108356	Na-(Ca)	/ Cl	Ca
AC1-8	122890	Na-(Ca)	/ Cl	Ca

Tabla 1 : Salinidades, tipos químicos y vías evolutivas de aguas del salar de Aguas Calientes 1. SO₄ (N) = vía neutra sulfatada; Ca = vía calcica.

Se nota en seguida que Aguas Calientes 1 es un salar de tipo cálcico, es decir que sus salmueras contienen más calcio que sulfato. La vertiente salobre (11) contiene algo de Mg y HCO₃ además de sus componentes Na, Ca y Cl.

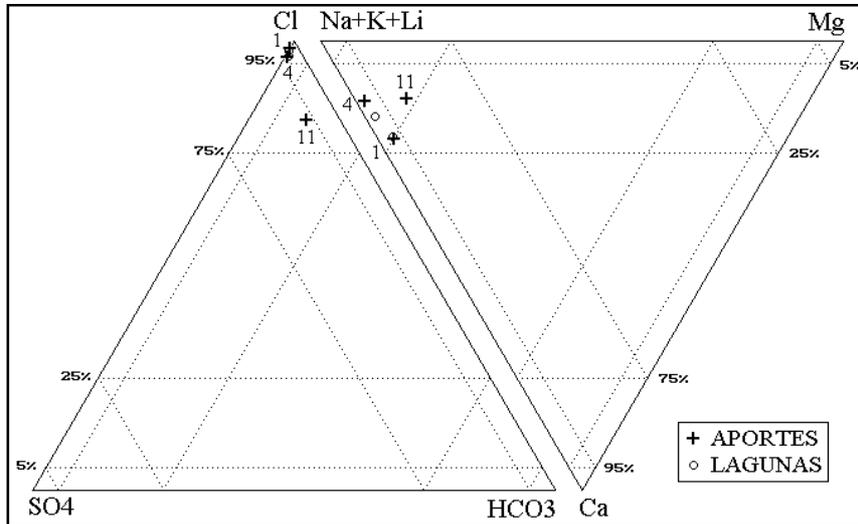


Fig.1 : Composición de las aguas de aporte y salmueras del salar de Aguas Calientes 1.

La salinidad elevada de los aportes no se debe a la redisolución de sales evaporíticas muy comunes como la halita (NaCl) y el yeso (CaSO₄.2H₂O), puesto que no se observa relaciones equimolares entre Na y Cl, ni tampoco entre Ca y SO₄. Al contrario, se puede observar en la figura 2 una excelente correlación equimolar entre Na+Ca y Cl para todas las aguas del salar.

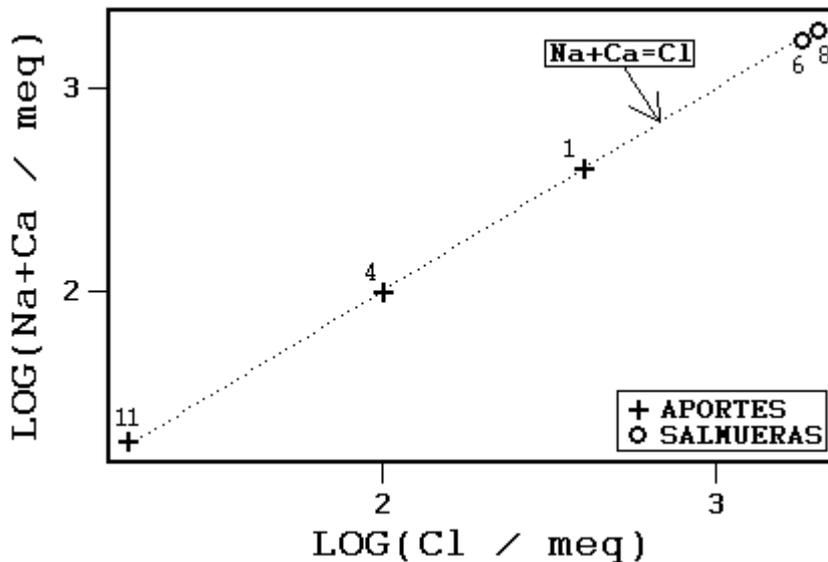


Fig.2 : Relación entre Na+Ca y Cl en las aguas y salmueras de Aguas Calientes 1

Eso sugiere una salinización de las napas diluidas de la cuenca de drenaje por aguas salinas de tipo Na-Ca / Cl que podrían provenir del exterior de la cuenca. No consideramos la posibilidad de redisolución de antiguas evaporitas de este tipo químico puesto que el cloruro de calcio es una sal

extremadamente soluble que solamente cristaliza a temperaturas muy bajas ($< - 40^{\circ} \text{C}$) que no se encuentran en la zona.

Vías evolutivas y relación con la geología

Las dos vertientes saladas (1 y 4) siguen al evaporarse la vía evolutiva cálcica en buena concordancia con la composición de las salmueras del salar, pero en total desacuerdo con la litología volcánica de la cuenca de drenaje y con la alta salinidad de los aportes. La vertiente salobre (11) sigue la vía neutra sulfatada. Si no fuera por su salinidad relativamente elevada, podría corresponder a un agua de alteración de rocas volcánicas ricas en azufre. El hecho de que esta agua tiene concentraciones iguales de $\text{Na}+\text{Ca}$ y Cl sugiere que también se trata de una salinización de agua diluida producto de alteración de rocas de la cuenca con salmueras de tipo $\text{Na}-\text{Ca} / \text{Cl}$, pero en menor grado que para las vertientes saladas (1) y (4).

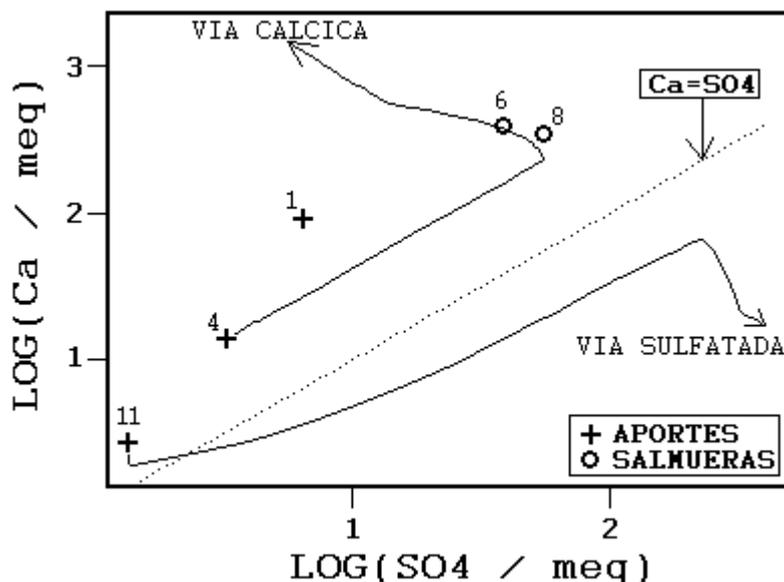


Fig.3 : Relación entre Ca y SO_4 en las aguas y salmueras de Aguas Calientes 1

La figura 3 muestra los trayectos evaportorios de AC1-4 y AC1-11 en un diagrama Ca versus SO_4 . El agua salobre (11) se encuentra en el sector $\text{Ca} > \text{SO}_4$ exactamente como AC1-1 y AC1-4, pero su evolución por evaporación lleva a salmueras muy distintas. El trayecto evaportorio de AC1-11 cruza la línea de equimolaridad $\text{Ca} = \text{SO}_4$ a causa de la precipitación importante de la calcita (CaCO_3) que consume Ca, pero no SO_4 . Lamentablemente no disponemos de muestra de laguna o napa del norte del salar en el sector de (11). Por eso no podemos saber si esta vertiente salobre tiene o no influencia en el salar y, por ende, su importancia en relación a los aportes salados del sur del salar.

Evolución cuantitativa de las aguas

Veamos ahora la evolución cuantitativa de las aguas de aporte cuando se evaporan. La tabla 1 presenta la composición calculada de todas las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta la salinidad de la laguna (6) y de la napa (8) del salar.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
AC1-6	7,25	3,80	64600	1830	286	44,0	31100	805	145	7900	705	
AC1-1E	7,53	2,18	64600	1390	273	20,6	31000	827	147	8080	710	0,060
AC1-4E	7,64	2,50	62800	2650	310	20,5	34800	950	154	4690	406	0,126
AC1-11E	7,86	6,77	59100	6180	642	20,2	34300	1260	271	821	2420	0,674
AC1-8	7,63	13,5	71700	2640	531	36,4	37000	1180	169	6980	501	
AC1-4E	7,61	2,83	71600	2570	354	19,1	39700	1080	176	5160	463	0,066
AC1-1E	7,49	2,48	73300	1550	310	19,3	35100	938	167	9160	805	0,127
AC1-11E	7,74	6,19	67200	7030	703	18,8	39000	1430	308	913	2750	0,597

Tabla 1 : Comparación de las aguas de aporte evaporadas con la laguna (6) y la napa (8) del salar de Aguas Calientes 1. ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

Tanto la laguna como la napa provienen de la evaporación del agua de la vertiente salada AC1-4. Los coeficientes de desviación son bajos. La vertiente evaporada 1 también tiene alguna relación con las salmueras. Notamos que la muestra de napa ha sido extraída a unos tres kilómetros de la vertiente (4). Este aporte parece ser muy importante. La vertiente salobre (11) produce una salmuera sulfatada bien distinta de las salmueras reales estudiadas.

Calidad de agua

Ningún agua de aporte puede ser aprovechada para un uso potable o agrícola. El agua menos concentrada (11) tiene exceso de Na, Cl, salinidad y sobre todo de arsénico (10 veces por encima de la norma de potabilidad). Puesto que la alta salinidad de los aportes se debe a una salinización de las napas diluidas de la cuenca de drenaje por salmueras de origen desconocido, la posibilidad de encontrar aguas diluidas de buena calidad en la cuenca de Aguas Calientes 1 no es muy alentadora.

Balance hídrico

Se puede establecer el balance hídrico de la laguna al suroeste del salar. Su alimentación proviene de la vertiente salada AC1-4. La altura de evaporación de la laguna es la evaporación potencial (1,5 m/año) reducida en 10% para tomar en cuenta la salinidad del agua (108 g/l). Se utiliza el cloruro como elemento conservativo. Los parámetros del balance son:

- $H_c = 1,35$ m/año (1,5 - 0,15)
- $H_p = 0,15$ m/año
- $S = 3$ km²
- $C_{ap} = 3620$ mg/l (AC1-4)
- $C_L = 64600$ mg/l (AC1-6)

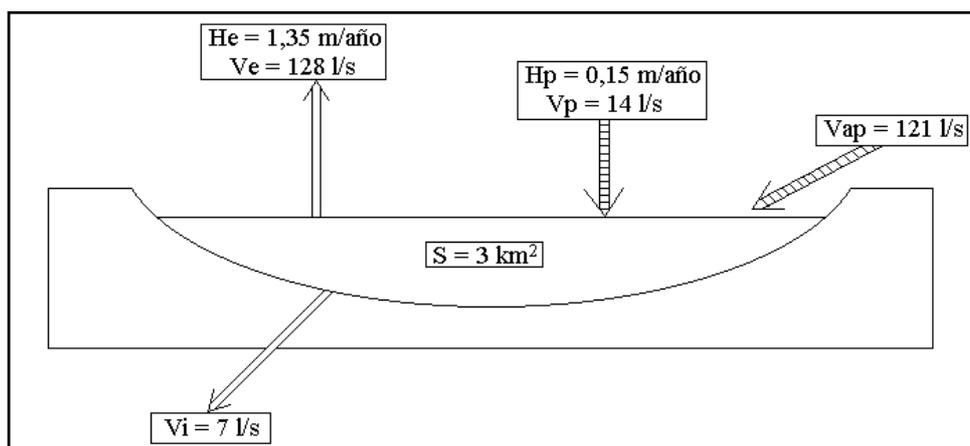


Fig.4 : Balance hídrico de la laguna suroeste del salar de Aguas Calientes 1.

Se obtiene:

Volumen de aportes: $V_{ap} = S(H_c - H_p) / (1 - C_{ap}/C_L) = 3,8 \times 10^6 \text{ m/año} = 121 \text{ l/s}$

Volumen de infiltraciones: $V_i = S(H_c - H_p) / (C_L/C_{ap} - 1) = 214\,000 \text{ m/año} = 7 \text{ l/s}$

El caudal entrante de 121 l/s es elevado. Corresponde no solamente a la vertiente (4), sino también a varios pequeños aportes similares a (4) a todo lo largo de la orilla suroeste del salar. El sector de la cuenca de drenaje que corresponde a AC1-4 tiene una superficie del orden de 50 km². La tasa de precipitaciones sobre esta superficie es de 238 l/s, lo que lleva a un coeficiente de escurrimiento muy elevado de 0,5 (121/238). Generalmente este coeficiente no sobrepasa 0,1 a 0,2 cuando las aguas de aporte provienen de precipitaciones sobre la cuenca de drenaje. Parece, entonces, que las aguas de aporte saladas de tipo Na-(Ca) / Cl provienen del exterior de la cuenca.

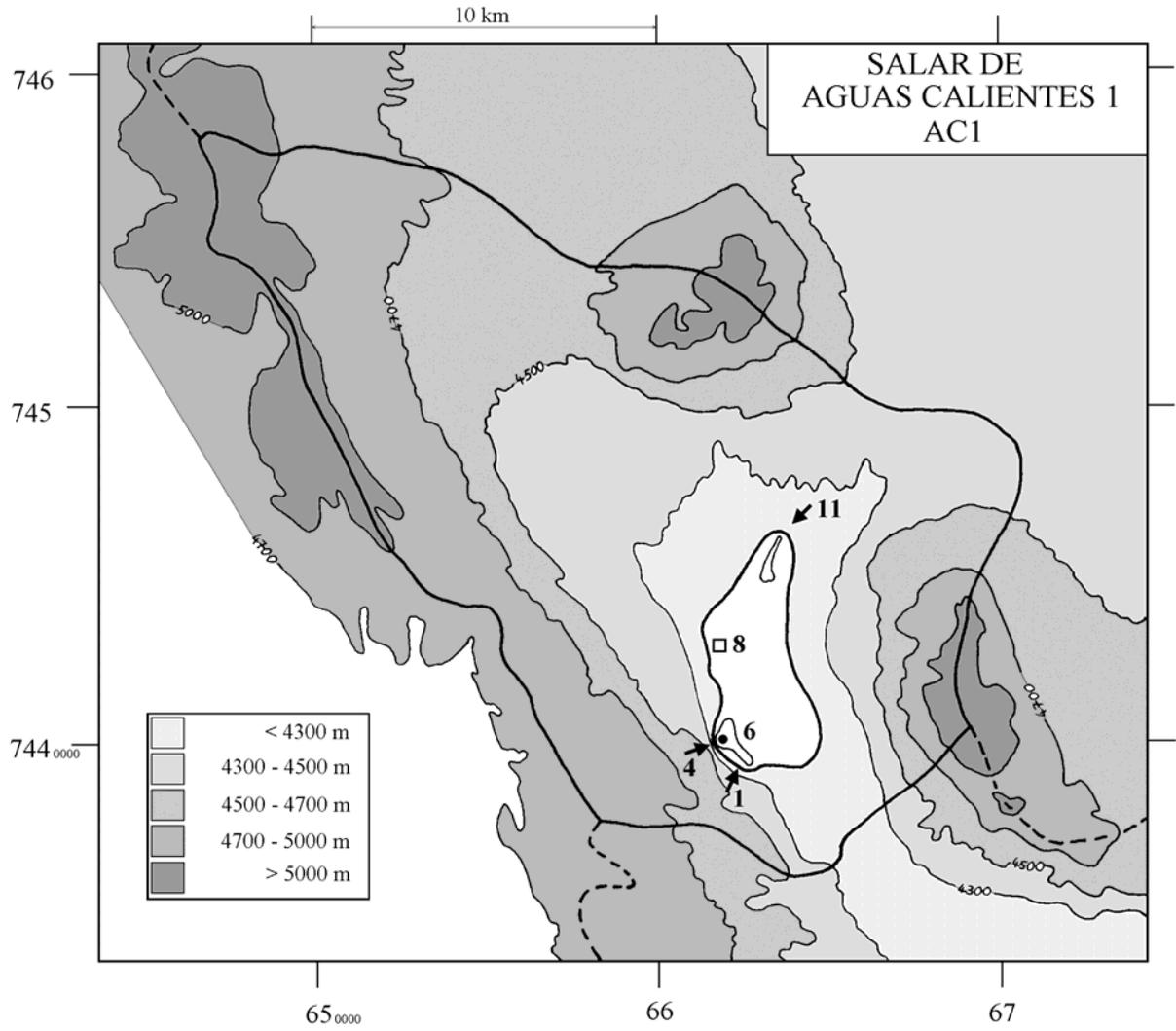
Conclusiones

Las aguas de aporte del salar de Aguas Calientes 1 son de mala calidad debido a una salinización por salmueras de tipo Na-(Ca) / Cl, de origen desconocido, probablemente afuera de la cuenca. El agua de la vertiente norte del salar, menos salina, muestra todavía algunos rasgos del agua diluida inicial. Su vía evolutiva es neutra sulfatada, mientras que las vertientes más contaminadas siguen la vía cálcica produciendo efectivamente salmueras de tipo Na-(Ca) / Cl. Las posibilidades de encontrar aguas diluidas de buena calidad son más elevadas en el norte de la cuenca.

Referencias y estudios anteriores

Alonso, H. y Vargas, L. 1988. Hidroquímica de lagunas del Altiplano, Segunda Región. V Congreso Geológico Chileno, Santiago, 8-12 Agosto de 1988, Actas, tomo II, D35-D43.

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



SALAR DE AGUAS CALIENTES 1

AC1

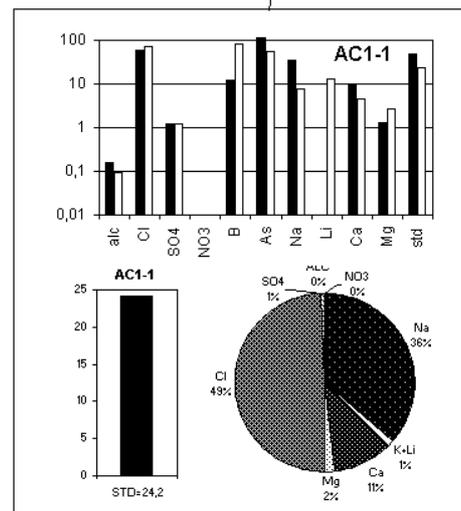
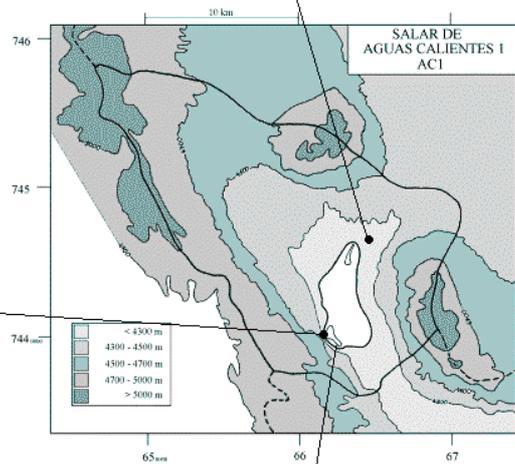
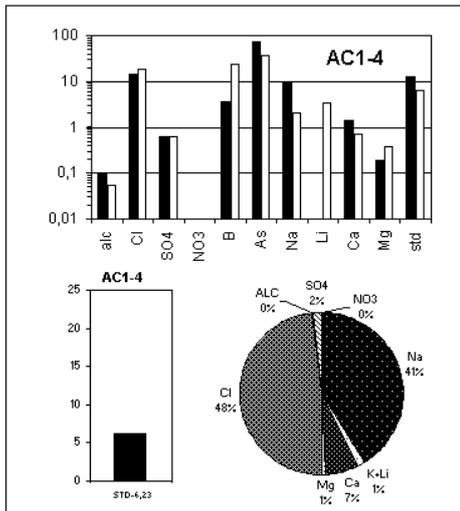
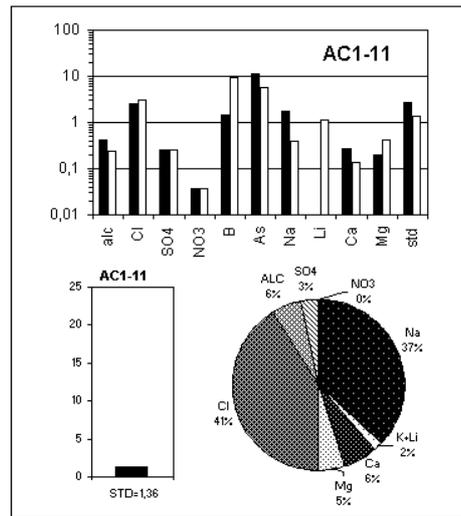
NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
AC1-1	10/10/93	09 ^H 45	661925	7439250	4280	Manantial corriente
AC1-4	10/10/93	10 ^H 10	661775	7440450	4280	Manantial corriente
AC1-6	10/10/93	10 ^H 30	662225	7440575	4280	Laguna
AC1-8	10/10/93	11 ^H 30	661575	7442375	4280	Napa (cateo)
AC1-11	10/10/93	12 ^H 30	665375	7446575	4285	Manantial corriente

NUMERO	CEL	T	DS	PH	ALC	F	CL	Br	I	SO4	NO3	PO4	B	SI	AS	NH4	NA	K	LI	CA	MG
AC1-1	35200	52	1,017	6,74	0,917	1,65	14500	4,46	0,069	311	0,06	0,19	61,2	18,3	5,68	0,85	6950	185	33,0	1820	159
AC1-4	10300	17	1,004	7,33	0,554	1,44	3620	1,41	0,042	156	0,43	0,10	17,6	24,7	3,61	0,09	1940	54,0	8,74	277	23,1
AC1-6	120900	14	1,074	7,25	3,80	4,39	64600	22,4	0,113	1830	2,2	0,86	286	44,0	26,6	0,86	31100	805	145	7900	705
AC1-8	131500	6	1,083	7,63	13,5	3,04	71700	16,9	0,142	2640	0,12	1,20	531	36,4	55,0	0,20	37000	1180	169	6980	501
AC1-11	2240	17	1,001	6,98	2,36	0,285	614	0,584	0,020	63,8	1,7	0,10	7,33	29,7	0,58	0,13	352	13,0	2,80	54,1	25,0

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. %
AC1-1	24245	50,3	0,54	9,2	415,4	415,6	0,03
AC1-4	6233	31,8	0,12	2,0	102,8	105,9	2,9
AC1-6	108356	131	4,86	10	1844	1863	1,0
AC1-8	122890	462	28,3	17	2054	2089	1,7
AC1-11	1359	143	0,12	23	20,80	21,04	1,2

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

AC1

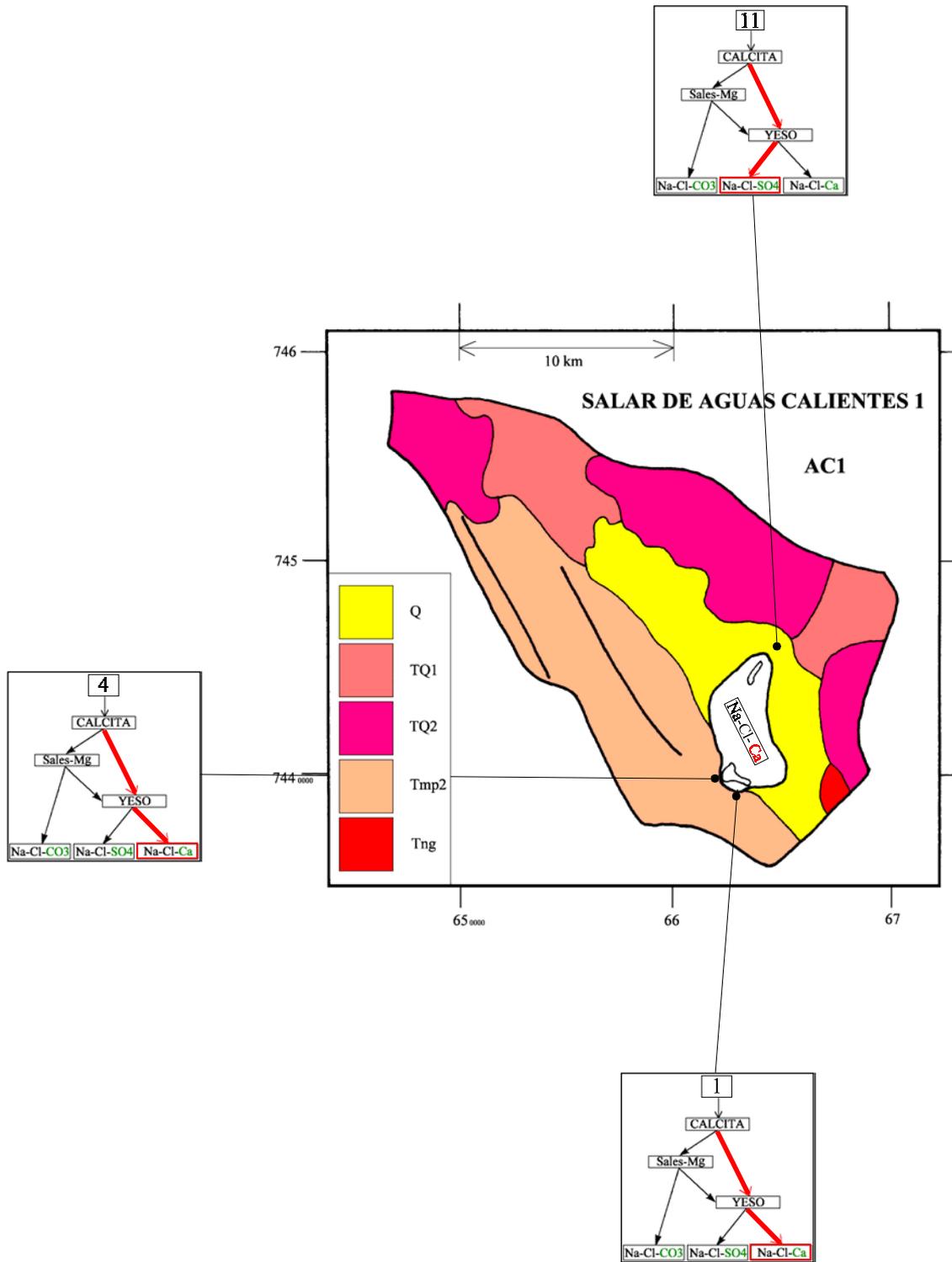
Q : *Cuaternario*. Sedimentos fluviales, lacustres, glaciales, eólicos aluviales, coluviales y laháricos.

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 riodacíticas con intercalaciones sedimentarias.

Tng : *Neogeno*. Rocas plutónicas e hipabisales.



SALAR DE PUJSA

Introducción

El salar de Pujsa se encuentra al norte del Altiplano de la II Región al sur-oeste del salar de Tara y separado por un cordón de la cuenca del salar de Atacama, al oeste. Sus principales características morfométricas y climatológicas son:

- altura: 4500 m
- superficie de la cuenca: 634 km²
- superficie del salar: 18 km²
- superficie de las lagunas: 1-10 km²
- precipitaciones: 150 mm/año
- evaporación potencial: 1500 mm/año
- temperatura media: 1°C

Es un salar de tipo playa con lagunas superficiales. No sabemos casi nada sobre la extensión y las variaciones de superficie de las lagunas. Existen antiguas islas de hielo en el salar que proveen aguas diluidas a las lagunas al derretirse (Hurlbert and Chang, 1984). No es posible, entonces, estimar el balance hídrico, aún muy aproximado, de las lagunas. Se ha muestreado tres aguas de aporte y una de laguna.

Composición de las aguas

Las composiciones de aguas del salar de Pujsa están presentadas en la figura 1 y en la tabla 1. Se observa un gran dispersión de los puntos representativos.

<u>APORTES</u>	<u>SALINIDAD</u> mg/l	<u>TIPO QUÍMICO</u>		<u>VIA EVOLUTIVA</u>
		Cationes	Aniones	
PSA-11	239	Na- (Ca) - (Mg)	/ SO ₄ -HCO ₃ - (Cl)	CO ₃
PSA-1	758	Ca-Na- (Mg)	/ SO ₄ - (HCO ₃) - (Cl)	SO ₄ (N)
PSA-8	1363	Na- (Mg) - (Ca)	/ SO ₄ -Cl-HCO ₃	SO ₄ (A)
<u>LAGUNA</u>				
PSA-5	57578	Na	/ SO ₄ -Cl	SO ₄

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

La característica mas importante que hay que retener es el alto contenido en sulfato de todas las aguas. Pujsa es un salar de tipo sulfatado. Tres aportes no son suficientes para hacer correlaciones significativas entre los componentes. Notamos primero que la salinidad y la composición de los aportes diluidos (1) y (11) corresponden a aguas de alteración de rocas volcánicas con azufre.

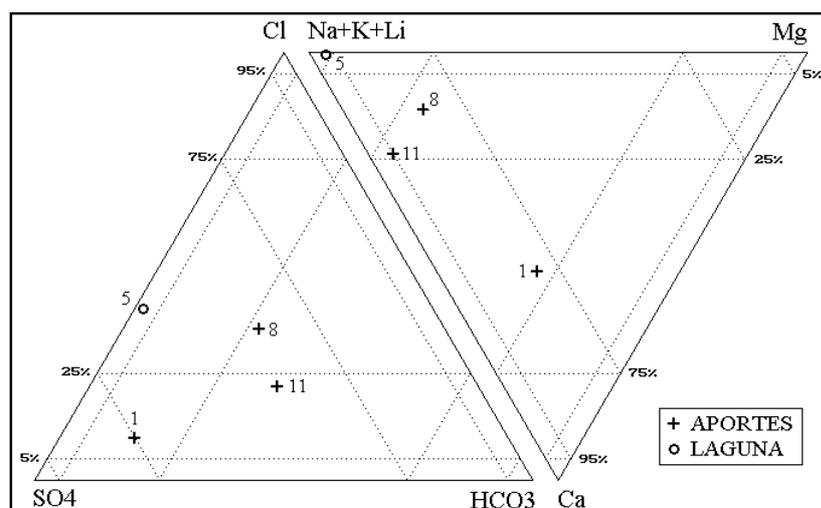


Fig.1: Composición de las aguas del salar de Pujsa

La salinidad mas alta de la vertiente difusa (8) que surge justo a la orilla del salar es más difícil de interpretar. Puede tratarse de una pre- evaporación de la napa diluida de aporte antes de escurrirse por la vertiente difusa, de una cuña salina, o también de la redisolución de sulfato de sodio del mismo salar llevado por el viento hacia las orillas (sales reciclados). Una redisolución de antiguas evaporitas es menos probable (aunque no descartada) puesto que los dos otros aportes, cuenca arriba, no han sido afectados por tal proceso.

Vías evolutivas y relación con la geología

Las tres aguas de aporte siguen al evaporarse tres vías evolutivas distintas, todas en buen acuerdo con la litología de la cuenca de drenaje:

- el agua más diluida (11) sigue la vía carbonatada
- la vertiente salobre (8) sigue la vía alcalina sulfatada
- el río (1) sigue la vía neutra sulfatada

La vía carbonatada de PSA-11 no se desarrolla en el salar, indicando un aporte menor.

Evolución cuantitativa de aguas

La tabla 1 presenta la composición calculada de todas las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta la salinidad de la laguna del salar.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
PSA-5	9,00	16,7	12200	24000	231	31,4	18100	985	59,3	107	306	
PSA-8E	8,49	15,2	14200	19700	669	29,7	16200	2550	104	94,2	433	0,224
PSA-1E	8,12	3,34	6030	33600	172	29,4	10200	1860	50,4	473	4250	0,596
PSA-11E	9,47	77,3	8350	23000	537	38,3	18400	329	78,9	2,62	8,83	0,909

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

El agua de aporte evaporada que mas se asemeja a la salmuera de la laguna es la vertiente salobre (8). Sin embargo, el acuerdo no es excelente; debe existir otros aportes no encontrados que se mezclan con PSA-8. Los dos otros aportes (1 y 11) producen al evaporarse salmueras muy distintas de la del salar. Se nota en particular las concentraciones muy dispares de Ca y Mg.

Calidad de agua

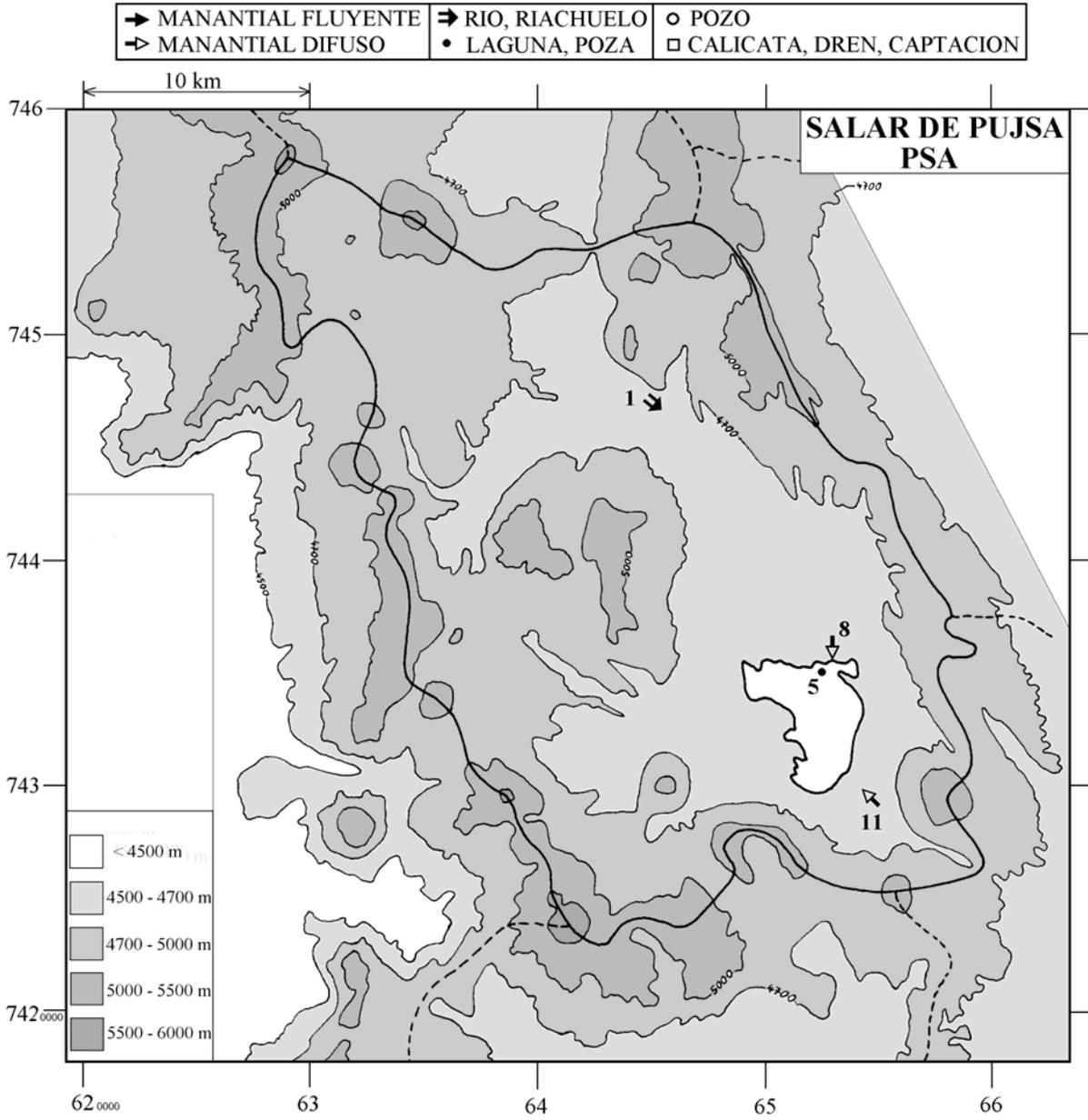
El agua más diluida (11) tiene concentraciones muy por debajo de las normas de potabilidad, excepto para el arsénico que sobrepasa 16 veces el límite permisible para agua potable. El contenido de boro la hace no recomendable para riego. PSA-1 está levemente por encima de la norma de potabilidad en sulfato, arsénico y salinidad total. PSA-8 tiene 20 veces más arsénico que esta norma y es demasiada salada.

Conclusiones

El salar de Pujsa recibe aguas de aporte de composición y salinidad variada, pero donde predominan los tipos químicos sulfatados. La composición química de la laguna, de tipo Na / SO₄-Cl, no proviene de la evaporación de los dos aportes cuenca arriba, sino del agua de una vertiente difusa a la orilla norte del salar. Sin embargo, deben existir aportes adicionales no detectados. La composición de los aportes y las vías evolutivas que siguen al evaporarse esta en acuerdo con la geología de la cuenca. La aptitud de uso de las aguas, aún las muy diluidas, está limitada en potabilidad por el alto contenido en arsénico.

Referencias

Hurlbert, S.H. y Chang, C.C.Y. 1984. Ancient ice islands in salt lakes of the Central Andes. Science, 224, 299-302.



**SALAR DE PUJSA
PSA**

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
PSA-1	07/10/93	15 ^H 00	643900	7446775	4590	Vegas de Pujsa
PSA-5	10/10/93	15 ^H 15	652575	7435175	4500	Laguna
PSA-8	10/10/93	15 ^H 30	653125	7435750	4500	Manantial difuso
PSA-11	10/10/93	16 ^H 30	654800	7429200	4550	Manantial difuso

NUMERO	CEL	T	DS	PH	ALC	F	CL	Br	I	SO4	NO3	PO4	B	SI	AS	NH4	NA	K	LI	CA	MG
PSA-1	914	12	1,000	7,50	1,56	0,23	34,9	0,049	0,0127	368	nd	nd	0,995	26,8	0,0742	0,43	59,1	10,8	0,291	104	24,8
PSA-5	60800	19	1,032	9,00	16,7	0,80	12200	18,1	0,602	24000	0,25	0,9	231	31,4	79,4	0,76	18100	985	59,3	107	306
PSA-8	1696	14	1,000	8,88	5,01	0,40	226	0,283	0,0140	324	2,0	nd	13,8	40,6	1,09	nd	258	40,7	1,66	48,1	35,0
PSA-11	302	13	1,000	8,82	1,08	0,27	19,8	0,016	0,0047	55,2	4,2	nd	3,10	10,7	0,839	0,14	45,3	0,782	0,187	13,5	1,73

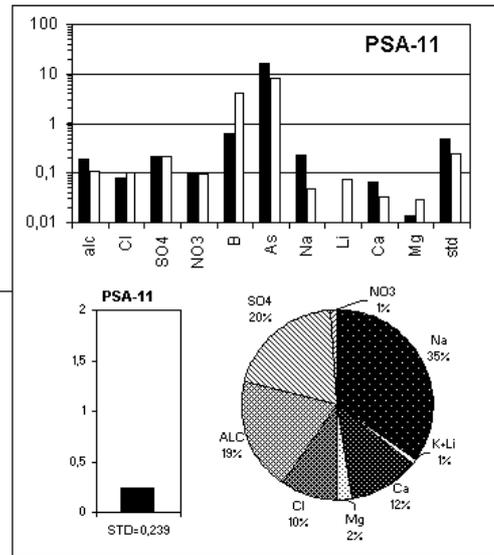
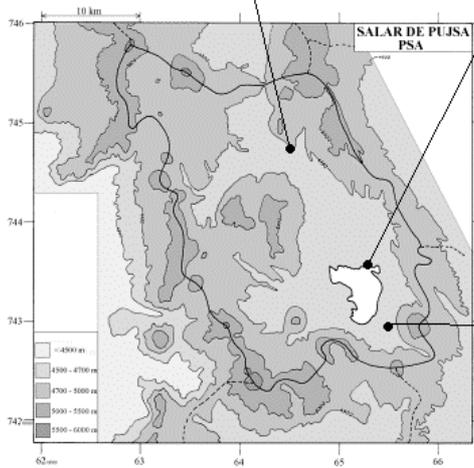
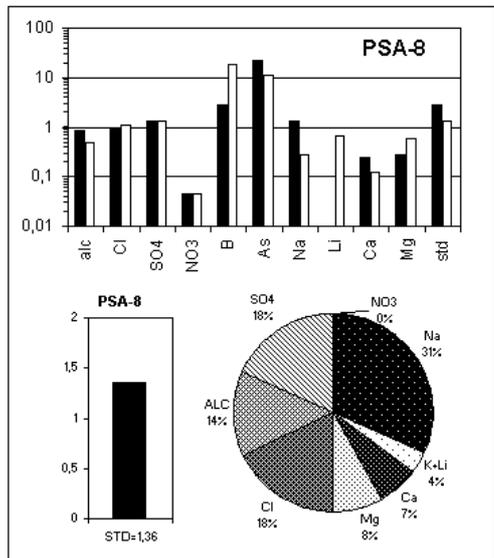
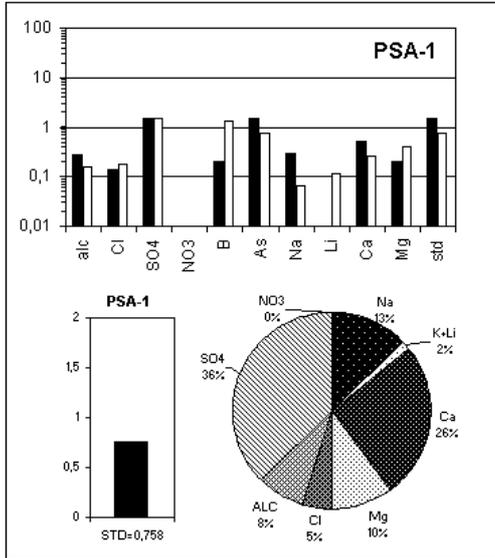
T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l.

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

NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF.%
PSA-1	757,9	93,9	0,30	5,3	10,13	10,22	0,8
PSA-5	57578	198	50,1	0,17	849,3	860,0	1,2
PSA-8	1363	241	17,0	0,53	17,76	18,17	2,3
PSA-11	238,7	56,2	1,92	0,15	2,839	2,870	1,1

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

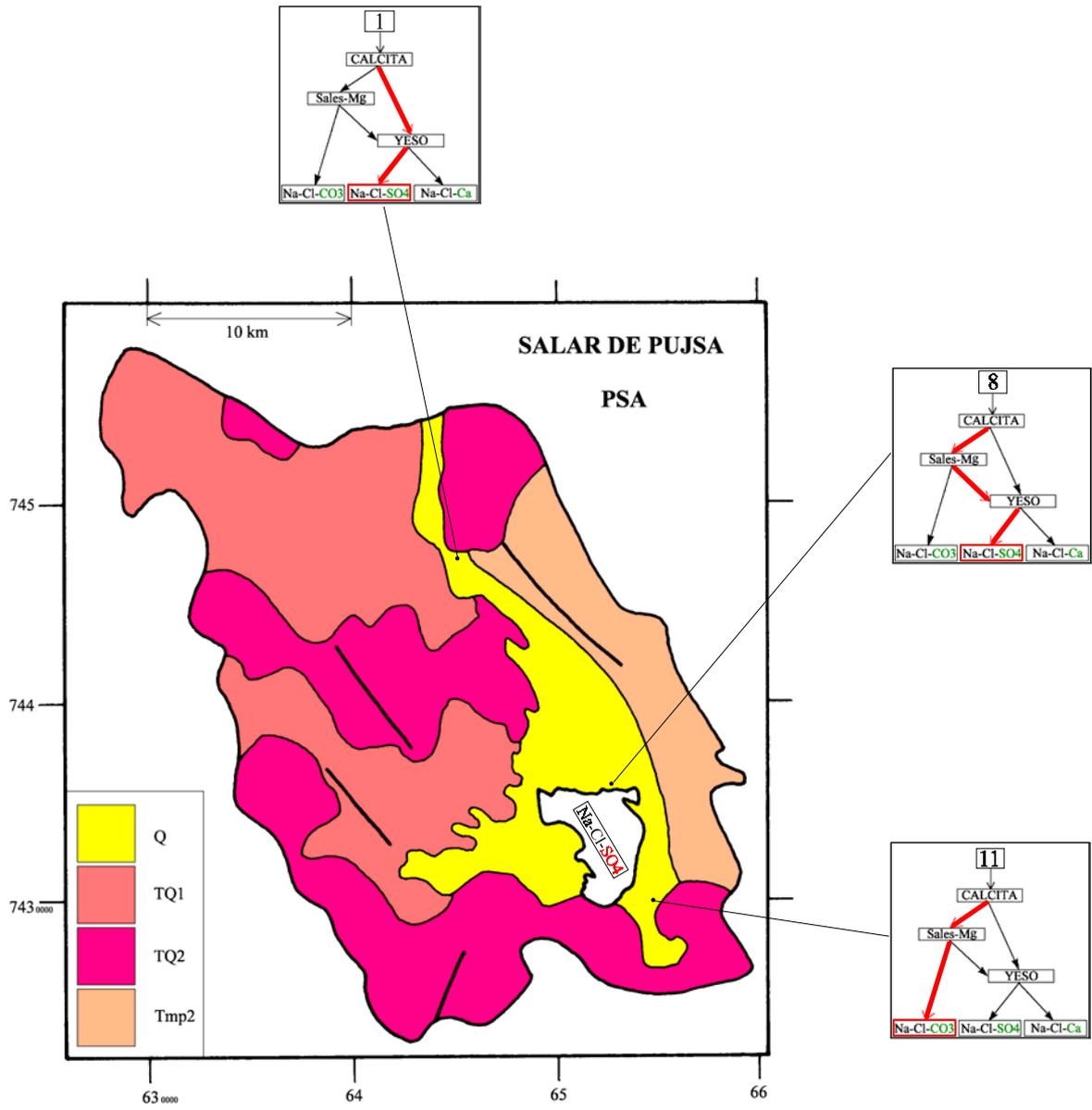
PSA

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 riodacíticas con intercalaciones sedimentarias.



SALAR DE LOYOQUES

Introducción

El salar de Loyoques (o de Quisquiro) se encuentra en el Altiplano de la II Región al sur del salar de Tara. Es un salar de tipo playa con lagunas superficiales de extensión variable y una napa de salmuera a unos decímetros de profundidad. Es una boratera con niveles explotables de ulexita ($\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$). Los principales aportes superficiales son el río Salado en el sur, que nace en las vegas Ojos del Salado, y el estero Loyoques en el norte. Sus principales características morfométricas y climatológicas son:

- altura: 4150 m
- superficie de la cuenca: 676 km²
- superficie del salar: 80 km²
- superficie de las lagunas 5 km²
- precipitaciones: 150 mm/año
- evaporación potencial: 1500 mm/año
- temperatura media: 1°C

Se ha muestreado todas las aguas de aporte que se encontraron, de la napa subterránea del salar y del río Salado. No se pudo extraer muestras de lagunas del salar principal, por problemas de acceso.

Aportes de agua

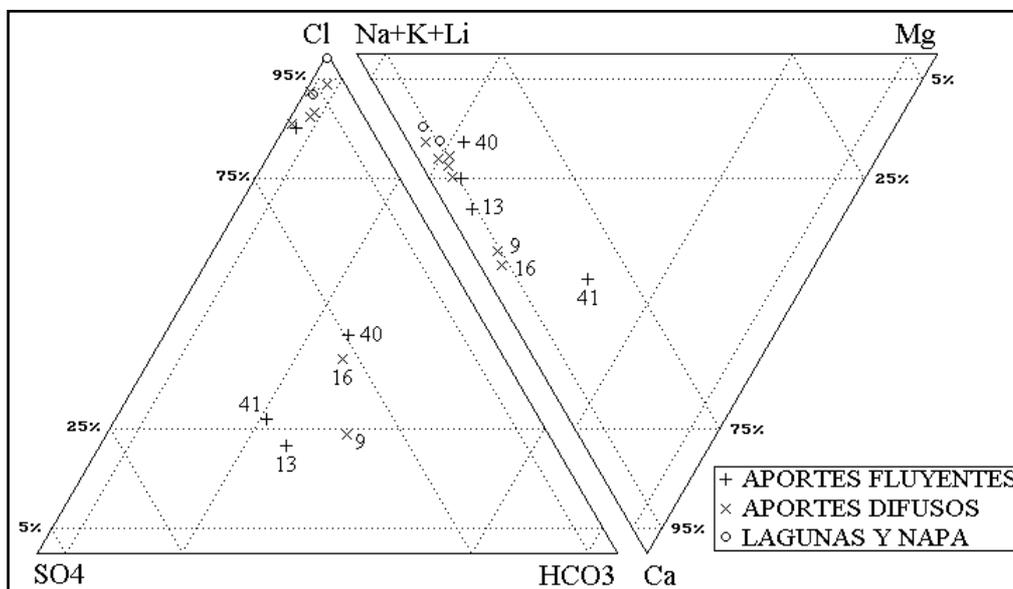


Fig.1 : Composición de las aguas de aporte y de las salmueras del salar de Loyoques.

Hemos prelevado 3 ríos, 2 vertientes fluyentes, 6 vertientes difusas y una napa en la orilla. El rango de salinidad va desde 163 mg/l hasta 15900 mg/l STD. La figura 1 presenta la composición de esas soluciones. Se distingue netamente dos grupos de aguas :

- LOY-9, 13, 16, 40 y 41 de tipo : Na-(Ca) / HCO₃-SO₄-Cl
- LOY-1, 5, 20, 24, 28, 32 y 35 de tipo : Na-(Ca) / Cl

El primer grupo tiene un rango de salinidad de 163 mg/l a 650 mg/l STD y se encuentra a lo largo de la orilla este, mientras que el segundo presenta salinidades desde 2710 mg/l hasta 15900 mg/l con sus aguas al oeste y al norte del salar. Sin embargo, el aporte más salado (LOY-5) se encuentra al este donde predominan las vertientes diluidas. Las figuras 2 y 3 muestran las relaciones entre Na y Cl, de una parte, y Na+Ca y Cl de otra parte.

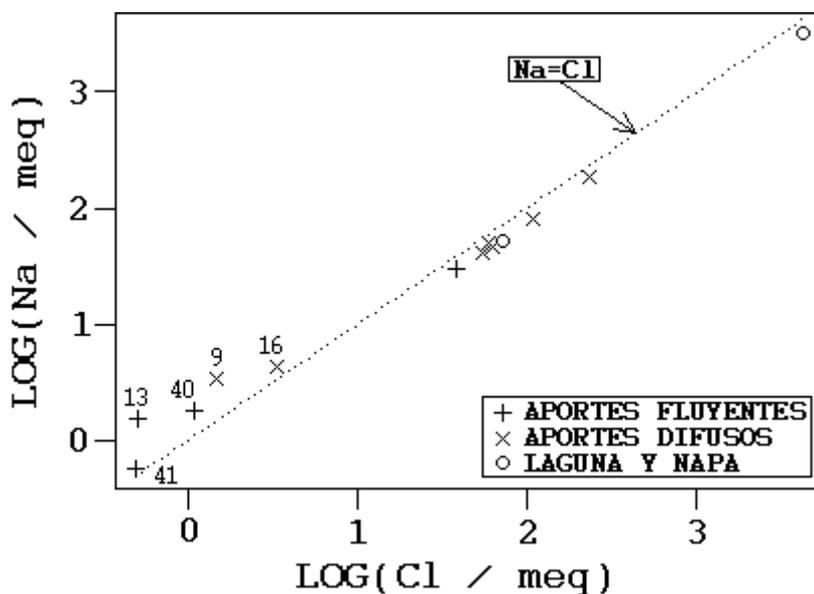


Fig.2 : Relación entre Na y Cl en las aguas del salar de Loyoques

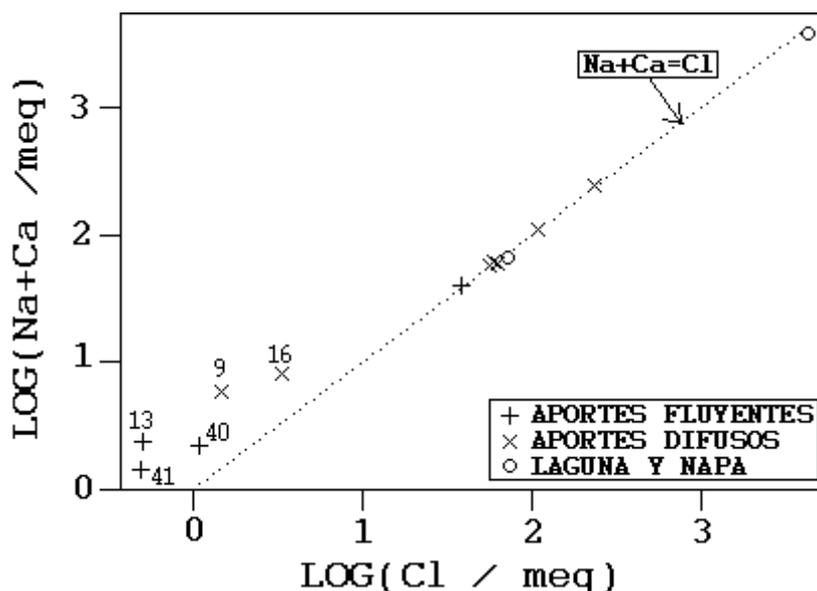


Fig.3 : Relación entre Na+Ca y Cl en las aguas del salar de Loyoques

Se distingue netamente los dos grupos de aguas de aporte. En ninguno de los dos grupos, Na y Cl se encuentran en concentraciones equimolares. Al contrario, las aguas del grupo salado presentan una excelente correlación equimolar entre Na+Ca y Cl. La figura 4 presenta la relación Ca versus SO₄. No aparece ninguna tendencia a la igualdad de las concentraciones entre Ca y SO₄. Estas relaciones sugieren que :

- las aguas de aporte diluidas no han redissuelto ningún tipo de antiguas evaporitas. Deben su composición esencialmente a la alteración de rocas volcánicas de la cuenca de drenaje

- las aguas de aporte saladas no deben su alta salinidad a la redisolución de las evaporitas mas comunes : la halita (NaCl) y el yeso (CaSO₄.2H₂O). Parece más bien que han sido salinizadas por soluciones salinas de tipo Na-Ca / Cl. No consideramos la posibilidad de redisolución de antiguas evaporitas de este tipo químico puesto que el cloruro de calcio es una sal extremadamente soluble que solamente cristaliza a temperaturas muy bajas (< - 40°C) no propias de esta zona.

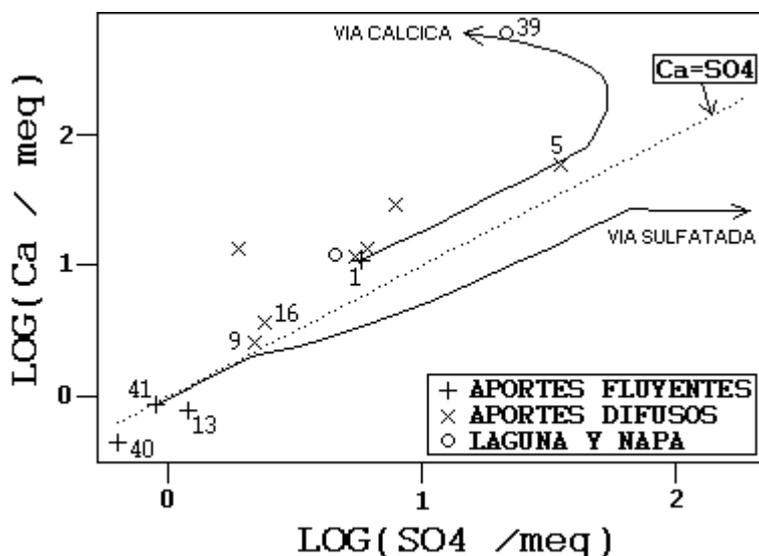


Fig.4 : Relación entre Ca y SO₄ en las aguas de Loyoques.

Se plantea aquí un problema. Con excepción de uno, todos los aportes salados aparecen como vertientes difusas, es decir que fluyen muy lentamente a lo largo de las orillas : podrían provenir estos aportes salados de la lixiviación de cuñas salinas por aguas diluidas ? Por ejemplo, la vertiente difusa (5) es casi una salmuera. Hay un solo aporte del grupo salado que no es una vertiente difusa : el Estero Loyoques (LOY-1), la que también es la menos concentrada del grupo (2710 mg/l STD). Es entonces la única agua del grupo salado para la cual estamos seguros, por ahora, de que se trata de un aporte. Las demás podrían ser una mezcla de aguas de aporte diluidas con salmueras del mismo salar.

Consideremos el caso de la vertiente difusa más concentrada: LOY-5 (15900 mg/l STD). Si esta solución proviniera de la mezcla de la salmuera subterránea (39) con aguas diluidas como LOY-40 (la más cercana), la concentración en SO₄ sería de 95 mg/l para una mezcla de misma salinidad que LOY-5 (6,5% LOY-39 con 93,5% LOY-40). Sin embargo, el contenido en sulfato

de LOY-5 es de 1680 mg/l, superior aún al de la salmuera subterránea (1030 mg/l). Eso sugiere que LOY-5 no es una mezcla de salmuera del salar con aportes diluidos.

Composición de la pequeña laguna y de la salmuera subterránea

La laguna de las vegas Ojos del Salado (20) y la napa subterránea del salar (39) son del mismo tipo químico : Na-(Ca) / Cl, a pesar de tener salinidades muy diferentes : 4 g/l para la lagunita y 242 g/l para la napa.

Vías evolutivas y relación con la geología

Las aguas de aporte diluidas siguen tres vías evolutivas :

- LOY-40 sigue la vía carbonatada, típica de aguas muy diluidas que drenan terrenos volcánicos sin azufre.

- LOY-9 y 13 siguen la vía alcalina sulfatada

- LOY-16 y 41 siguen la vía neutra sulfatada

Las vías sulfatadas están también en buen acuerdo con la litología. La transición de la vía alcalina hacia la vía neutra refleja probablemente un aumento del contenido en azufre, u otras mineralizaciones con azufre, en las rocas del sector oriental de la cuenca.

Las aguas de aporte saladas siguen todas la vía neutra calcica, típica de aguas de alteración de rocas sedimentarias. Como se puede ver en el mapa geológico no aparece ningún terreno sedimentario en la cuenca de Loyoques, por tanto estas soluciones no provienen de la alteración de las formaciones superficiales de la cuenca de drenaje.

Para recalcar las vías evolutivas cálcicas y sulfatadas que siguen los aportes de Loyoques, representamos en la figura 4 dos trayectos evaporatorios típicos:

- el agua (1) del grupo salado (estero Loyoques) se concentra por evaporación concentrándose en Ca en desmedro del sulfato. El trayecto pasa casi por el punto representativo de la napa subterránea. En lo que se refiere a Ca y SO₄, la salmuera del salar parece bien provenir de la evaporación del agua salobre del estero.

- el agua diluida de la vertiente 41 sigue la via sulfatada, concentrándose en SO₄.

Puesto que la composición de la salmuera subterránea es efectivamente de tipo Na-(Ca) /Cl, se puede decir de manera abreviada que el salar de Loyoques no corresponde a la litología de su cuenca de drenaje. El origen de las sales y salmueras del salar queda desconocido. Podrían provenir de niveles sedimentarios por debajo de las formaciones volcánicas o, también, del exterior de la cuenca. Las aguas de aporte diluidas no parecen tener mucha influencia en el salar.

Evolución cuantitativa de aguas

Veamos ahora la evolución cuantitativa de las aguas de aporte cuando se evaporan. La tabla 1 presenta la composición calculada de todas las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta la salinidad de la napa del salar.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
LOY-39	6,57	11,2	148000	1030	498	11,5	75000	1700	273	12000	2070	
LOY-24E	6,95	3,83	146000	836	701	9,91	71500	1630	194	15800	2190	0,038
LOY-35E	7,08	4,07	147000	981	628	9,68	72300	2620	325	13000	3010	0,045
LOY-5E	7,13	3,76	145000	1480	643	9,51	78200	2420	306	8210	2660	0,058
LOY-1E	6,90	3,26	145000	1260	838	9,55	75100	2700	338	9680	3110	0,080
LOY-28E	7,01	3,07	144000	2000	813	9,61	81300	3040	285	6030	1630	0,150
LOY-32E	6,56	2,44	142000	1510	1390	9,77	76800	3360	327	8040	2040	0,168
LOY-16E	6,99	3,86	121000	24000	1390	11,0	74100	10600	346	667	4030	1,010
LOY-9E	6,82	3,63	117000	25900	1730	11,3	70100	13300	398	636	4590	1,100
LOY-13E	6,82	4,34	99500	33000	2170	14,5	63200	15500	415	700	5500	1,210
LOY-40E	9,68	211	115000	21700	563	24,7	84600	7560	549	0,554	1,80	1,410
LOY-41E	7,17	10,4	71000	74600	1970	15,8	39300	22600	56,8	353	16500	1,680

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

El punto más impactante es el salto en el coeficiente de desviación que separa exactamente el grupo salado del grupo diluido. Las aguas evaporadas del grupo salado (24E a 32E) tienen una buena correlación con la napa, con coeficientes de desviación de 0,038 hasta 0,168. Al contrario, las aguas del grupo diluido no presentan correlación con la napa; sus coeficientes de desviación son pésimos: de 1 a 1,68. Se desprende entonces que la napa del salar no proviene de la evaporación de las aguas diluidas, sino de las aguas de aporte saladas.

Hemos aplicado el mismo procedimiento comparativo con la vertiente más concentrada (LOY-5) como si ella fuera una salmuera de laguna o napa. La tabla 2 presenta el resultado de las simulaciones

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
LOY-5.EQ	7,93	0,694	8050	1680	37,6	25,5	4330	134	16,9	1130	147	
LOY-1E	7,92	0,762	8070	1670	50,9	31,4	4170	150	18,8	1210	173	0,019
LOY-24E	7,89	0,685	8800	870	44,4	31,3	4300	98,3	11,7	1300	132	0,074
LOY-28E	8,00	0,917	8490	1080	52,8	31,3	4810	180	16,9	771	96,2	0,076
LOY-32E	7,96	1,07	8270	1200	91,1	31,3	4470	195	19,0	946	118	0,108
LOY-35E	7,95	0,753	9240	391	41,2	31,2	4560	165	20,5	963	190	0,179
LOY-16E	8,10	1,35	5130	4670	77,0	31,9	4250	451	14,7	616	171	0,317
LOY-9E	8,71	5,80	3260	6400	103	33,1	4710	369	11,0	44,4	162	0,751
LOY-13E	8,71	5,93	2320	7190	104	33,4	4580	362	9,68	46,2	164	0,828
LOY-40E	9,14	16,3	4940	3790	138	35,2	5120	324	23,5	5,30	20,6	0,928
LOY-41E	8,17	1,99	3380	6310	118	32,3	2620	1100	2,70	526	791	1,030

Tabla 2 : Comparación de las aguas de aporte evaporadas con la vertiente más salada (5).
ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

Puesto que LOY-5 está muy sobresaturado respecto a la calcita, se ha debido equilibrar la solución precipitando este mineral. Se nota la excelente correlación entre el agua de la vertiente salada y la del estero evaporado (LOY-1E). En consecuencia, LOY-5 proviene de la evaporación de una agua casi idéntica a LOY-1. Eso confirma que no se trata de una mezcla de salmuera con agua diluida. Napas de aguas parecidas a la del estero (LOY-1) se descargan lentamente en vertientes difusas a lo largo de las orillas evaporándose a través de los sedimentos del borde del salar.

Calidad de aguas

Un agua solamente cumple estrictamente con las normas de potabilidad: LOY-41. Las cuatro otras aguas de aporte diluidas tienen un exceso de arsénico respecto a la norma de potabilidad: desde 2 veces para LOY-40 hasta 14 veces para LOY-9. Todos los demás componentes presentan concentraciones aceptables para este uso. En cuanto a las aguas de aporte saladas, todas están muy por encima de los límites permitidos para uso potable en varios componentes.

Balance hídrico

No tenemos ningún dato químico sobre las lagunas. Según los mapas, la superficie total de ellas es de 5 km². Podemos adelantar el orden de magnitud del volumen total de aportes V_{ap} a las lagunas (pero no al salar entero):

$$V_{ap} = S(H_e - H_p) = 6\,750\,000 \text{ m}^3/\text{año} = 210 \text{ l/s}$$

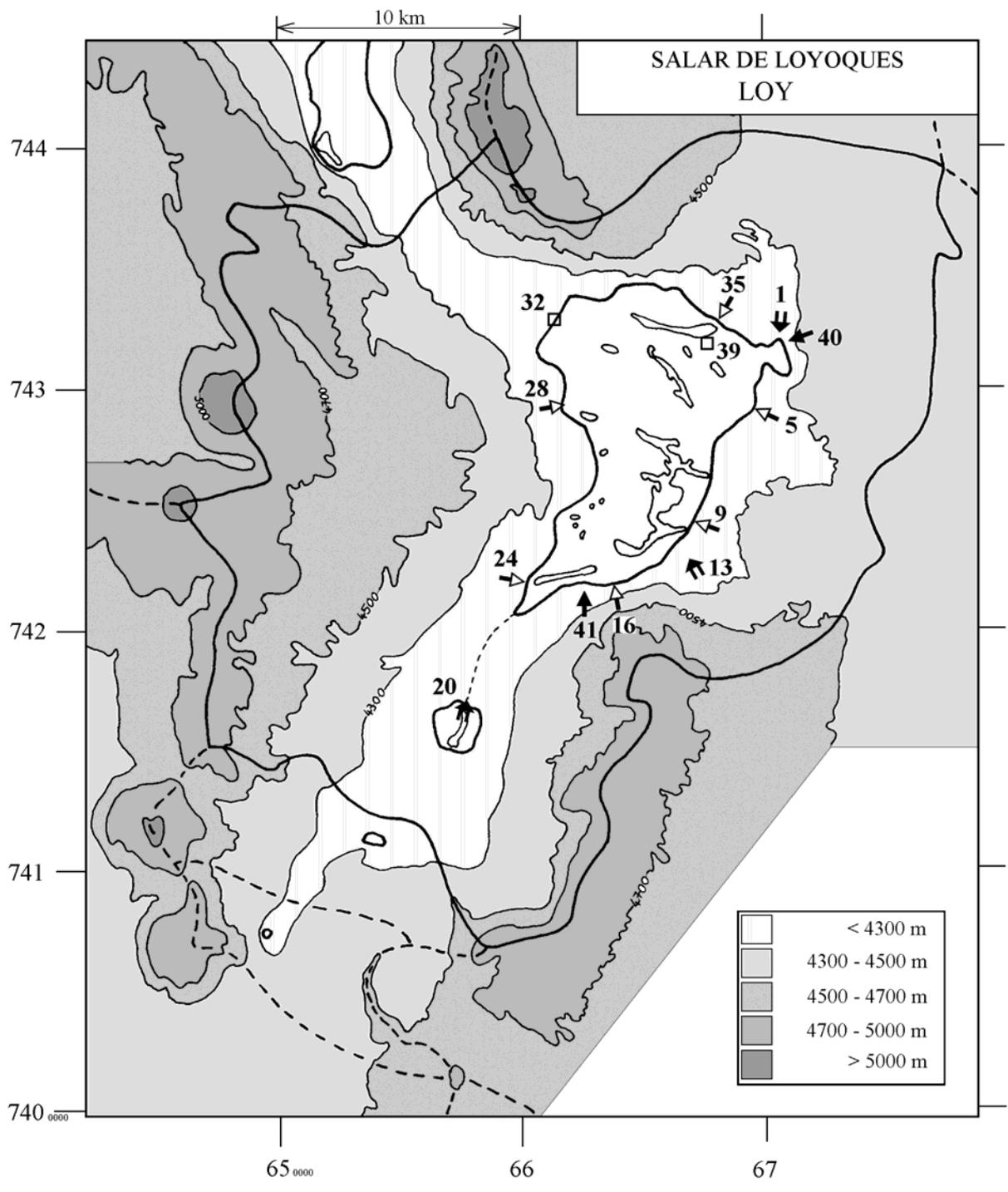
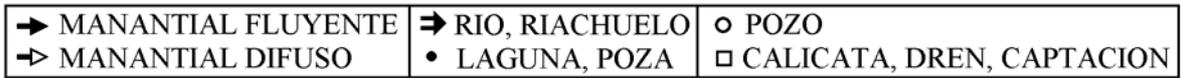
con: $S = 5 \times 10^6 \text{ m}^2$ $H_e = 1,5 \text{ m/año}$ $H_p = 0,15 \text{ m/año}$

Conclusiones

El salar de Loyoques recibe dos tipos de aportes muy distintos:

- aguas diluidas de tipo Na-(Ca) / HCO₃-SO₄-Cl
- aguas de salobres a saladas de tipo Na-(Ca) / Cl

Al evaporarse, las aguas diluidas siguen las vías carbonatadas o sulfatadas, mientras que las aguas saladas siguen la vía neutra cálcica. La salmuera subterránea, de tipo cálcica Na-(Ca) / Cl, proviene de la evaporación de los aportes salados y no de las aguas diluidas. Las vertientes saladas provienen de la descarga muy lenta de napas salobres de tipo Na-(Ca) / Cl que empiezan a evaporarse un poco antes de llegar al salar. Las aguas diluidas provienen de la alteración de rocas volcánicas de la cuenca. El origen de las aguas de aporte salobres es desconocido, sospechándose una contaminación por antiguas soluciones cálcicas. Las aguas salobres de Loyoques son muy parecidas a las del sector oriental del salar de Ascotán. Las aguas de aporte diluidas son de calidad buena a regular, con exceso de arsénico para uso potable. La importancia de estas últimas aguas en la cuenca es dudosa, puesto que no influyen en lo mínimo en la química del salar. Pero no olvidemos que la alta concentración de los aportes salados podría esconder la influencia de aportes muy diluidos aun en grandes volúmenes.



**SALAR DE LOYOQUES
LOY**

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
LOY-1	08/10/93	09 ^H 30	680300	7432525	4155	Estero Loyoques
LOY-5	08/10/93	10 ^H 00	679950	7429525	4152	Manantial difuso
LOY-9	08/10/93	10 ^H 30	677625	7424300	4152	Manantial difuso
LOY-13	08/10/93	11 ^H 00	677175	7422150	4240	Río
LOY-16	08/10/93	11 ^H 45	673550	7421675	4152	Manantial difuso
LOY-20	08/10/93	12 ^H 30	667675	7416950	4150	Río Ojos del Salado
LOY-24	08/10/93	15 ^H 00	670325	7422625	4190	Manantial difuso
LOY-28	08/10/93	16 ^H 15	671500	7429550	4152	Manantial difuso
LOY-32	08/10/93	16 ^H 30	671325	7432850	4150	Napa (cateo)
LOY-35	08/10/93	17 ^H 00	677800	7432950	4152	Manantial difuso
LOY-39	08/10/93	17 ^H 35	677700	7431700	4150	Napa (cateo)
LOY-40	11/07/94		681113	7432404	4220	Manantial corriente
LOY-41	11/07/94	17 ^H 52	673092	7434684	4360	Manantial corriente

SALAR DE LOYOQUES
LOY

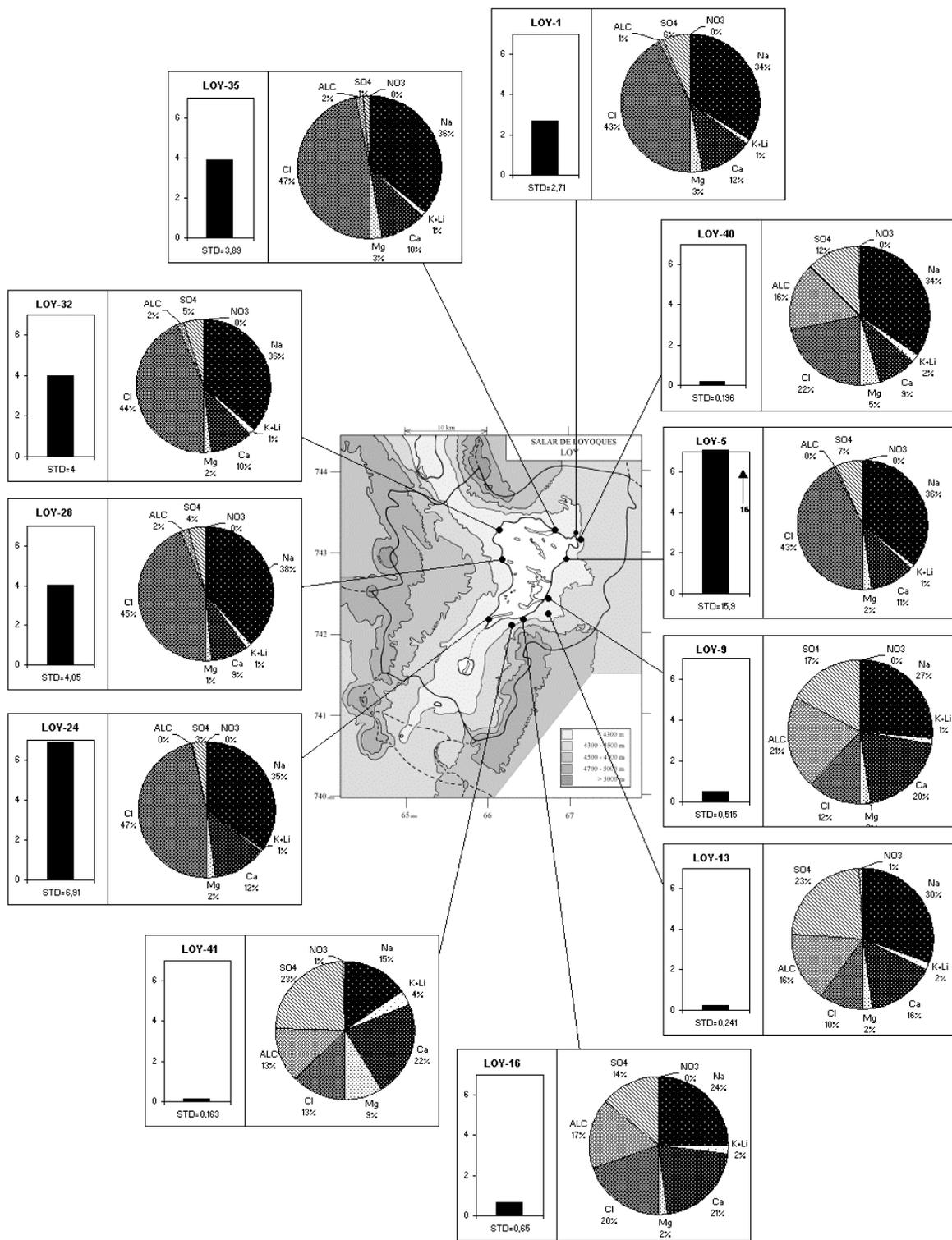
NUMERO	CEL	T	DS	PH	ALC	F	CL	Br	I	SO4	NO3	PO4	B	SI	AS	NH4	NA	K	LI	CA	MG
LOY-1	4570	5	1,002	9,50	0,979	0,40	1360	0,278	0,0171	276	0,062	nd	8,44	17,5	0,428	0,22	676	24,8	3,11	219	28,7
LOY-5	16060	6	1,008	8,37	2,49	2,91	8170	1,55	0,0532	1680	0,434	0,2	37,6	25,5	7,94	0,99	4260	134	16,9	1170	147
LOY-9	637,0	6	1,001	7,41	2,61	1,16	53,3	0,042	0,0156	105	0,124	nd	1,69	23,9	0,712	0,38	78,2	6,02	0,180	50,9	3,47
LOY-13	279,0	17	1,000	8,08	0,828	0,46	18,3	0,026	0,0031	57,1	2,23	nd	0,822	24,9	0,588	nd	35,9	2,85	0,076	15,9	1,36
LOY-16	890,0	13	1,001	7,25	2,88	1,24	120	0,055	0,0189	115	nd	nd	1,82	19,8	0,202	0,29	101	10,6	0,347	73,8	4,03
LOY-20	7020	21	1,004	8,43	1,22	1,41	2280	0,491	0,0117	219	0,124	nd	7,93	22,5	0,706	0,68	1170	43,4	2,42	238	47,1
LOY-24	11140	17	1,005	7,30	0,812	1,63	3830	1,61	0,0452	377	0,062	nd	19,2	26,5	0,636	0,18	1850	42,6	5,05	573	57,1
LOY-28	6720	13	1,003	7,70	2,45	1,25	2090	0,382	0,0357	263	0,062	nd	12,9	19,5	0,127	0,40	1160	43,8	4,11	233	23,4
LOY-32	6590	10	1,003	7,88	2,24	0,42	2030	0,807	0,0418	290	2,54	nd	22,1	24,2	1,28	0,11	1060	47,3	4,61	269	28,7
LOY-35	6830	11	1,003	8,01	2,07	0,32	2200	0,443	0,0085	91,7	0,062	nd	9,66	20,7	0,030	0,18	1050	38,7	4,80	264	44,5
LOY-39	200000	5	1,160	6,57	11,2	0,19	148000	5,21	0,286	1030	43,4	1,3	498	11,5	12,9	na	75000	1700	273	12000	2070
LOY-40	307,0	10,1	1,000	7,54	0,814	na	39,4	0,041	0,0072	30,1	0,874	na	1,10	19,7	0,094	na	40,7	2,58	0,187	9,14	2,96
LOY-41	236,0	9,8	1,000	7,35	0,501	na	17,4	0,021	0,0019	43,0	1,63	na	0,605	28,6	0,028	na	13,4	5,67	0,014	17,6	4,06

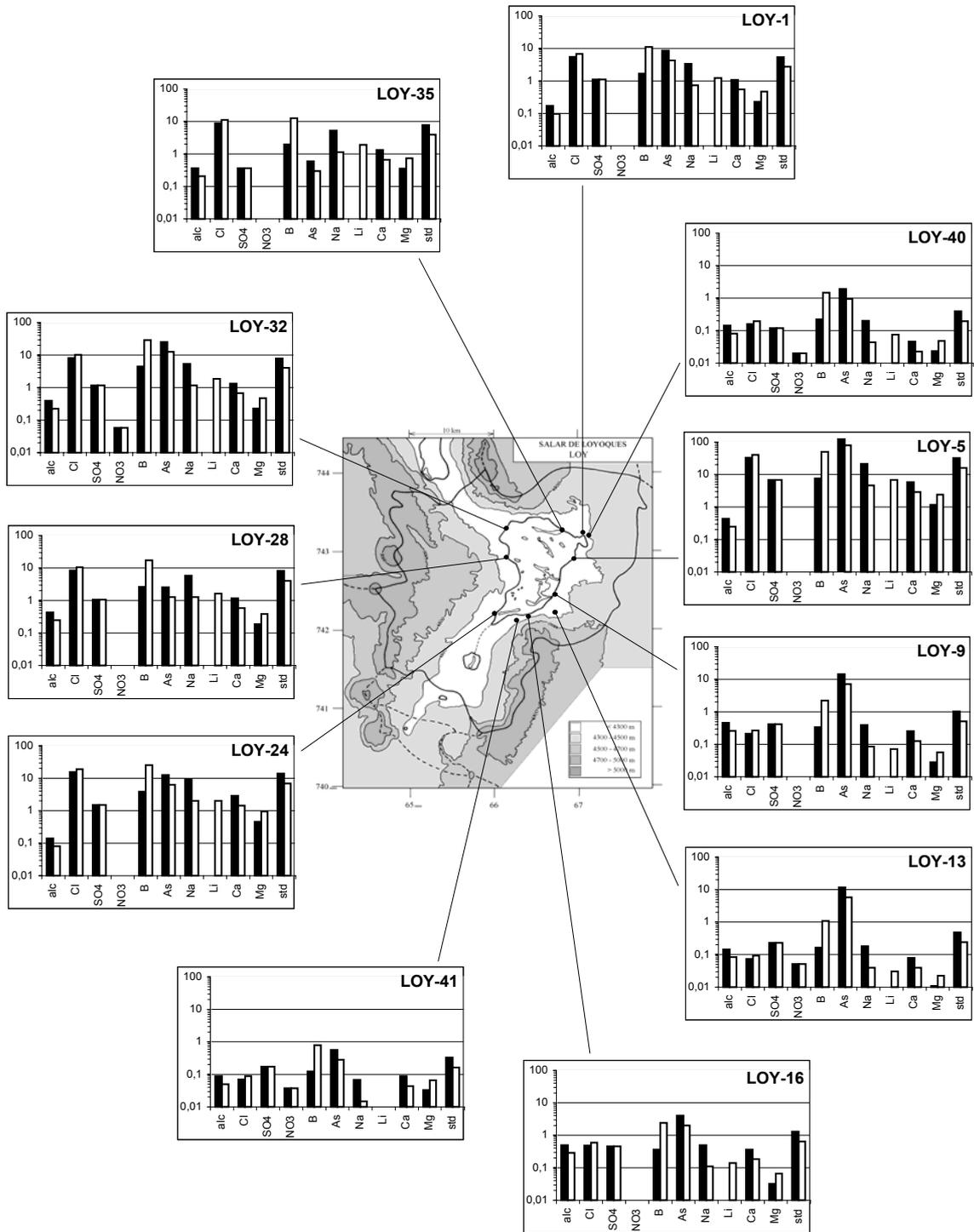
T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l.
CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF. %	NUMERO	$\delta^{18}O$	δ^2H
LOY-1	2710	13,1	4,92	0,008	43,76	45,17	3,2	LOY-40	-12.37	-102.1
LOY-5	15905	102	6,96	0,70	261,2	267,7	2,4	LOY-41	-12.32	-94.6
LOY-9	514,6	159	0,24	13	6,427	6,353	1,2			
LOY-13	240,9	48,7	0,36	0,66	2,550	2,593	1,7			
LOY-16	650,4	175	0,30	17	8,730	8,726	0,04			
LOY-20	4156	57,6	3,24	0,28	68,24	70,16	2,8			
LOY-24	6913	47,0	0,30	3,2	115,6	116,8	1,0			
LOY-28	4053	145	1,14	4,4	65,56	67,00	2,2			
LOY-32	3999	127	1,50	2,8	63,94	65,55	2,5			
LOY-35	3893	118	1,98	1,8	64,01	66,00	3,1			
LOY-39	242456	-	-	-	4111	4204	2,2			
LOY-40	196,4	49,3	0,06	2,7	2,563	2,566	0,1			
LOY-41	162,5	30,4	0,06	2,6	1,941	1,912	1,5			

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

LOY

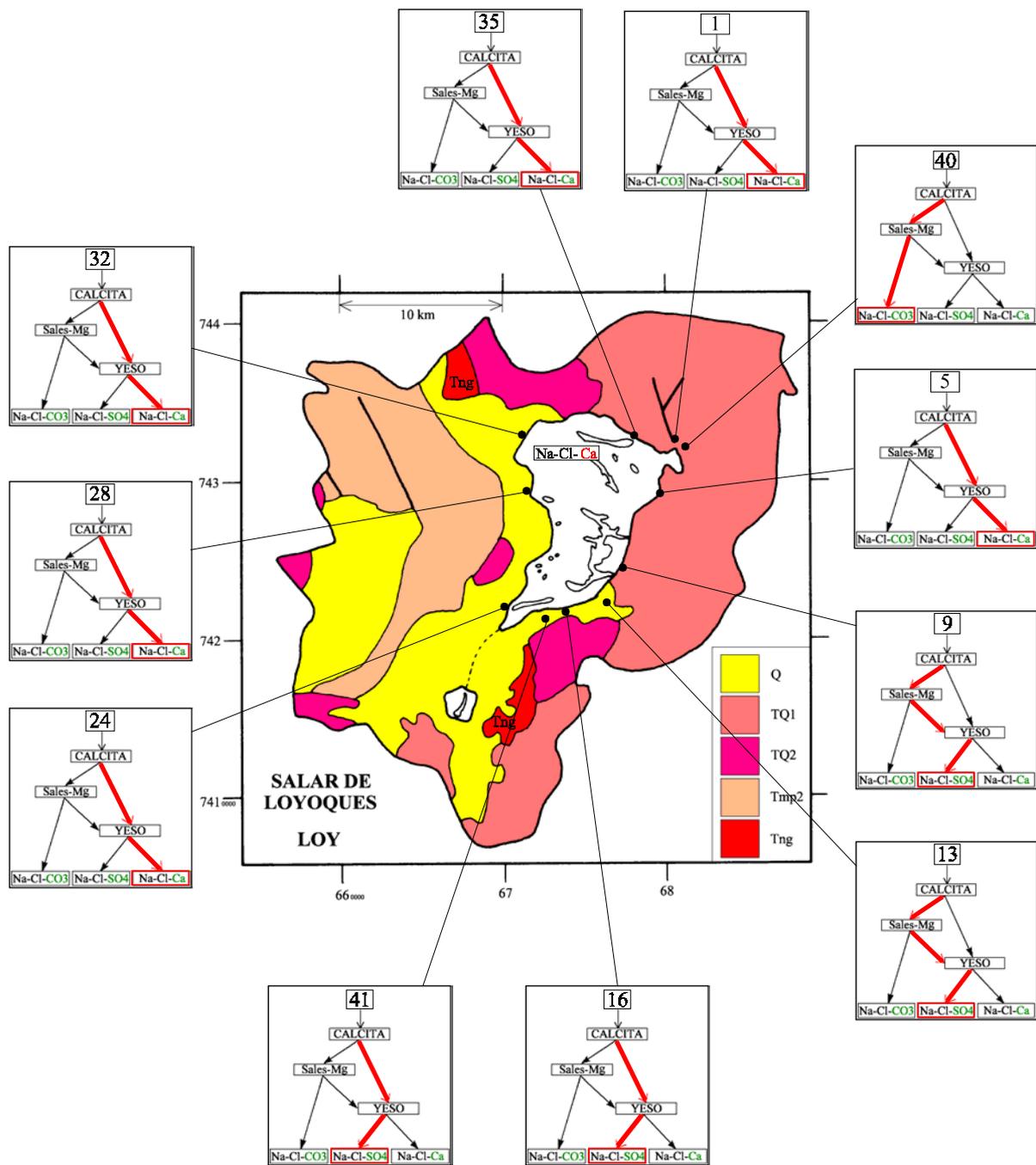
Q : *Cuaternario*. Sedimentos fluviales, lacustres, glaciales, eólicos aluviales, coluviales y laháricos.

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 riodacíticas con intercalaciones sedimentarias.

Tng : *Neogeno*. Rocas plutónicas e hipabisales.



LAGUNA TRINCHERA LAGUNA CHIVATO MUERTO

Introducción

Las lagunas Trinchera y Chivato Muerto se encuentran en el Altiplano de la II Región. Son pequeñas depresiones con agua salada en la pampa que prolonga la cuenca del salar de Loyoques al sur. Presentan notorias variaciones estacionales de la superficie. Se puede considerar sus cuencas como sub-cuencas del salar de Loyoques. Chivato Muerto tiene un fuerte olor a compuestos sulfurados, que emanan con diferente intensidad según la época del año. Las curvas de nivel en el mapa de ubicación sugieren que el movimiento de las napas subterráneas debe hacerse de sur a norte según :

Chivato Muerto ==> Trinchera ==> Loyoques

Sus principales características morfométricas y climatológicas son:

	<u>Trinchera</u>	<u>Chivato</u>
- altura:	4290 m	4295 m
- superficie de la cuenca:	59 km ²	41 km ²
- superficie del salar :	0,4 km ²	-
- superficie de la laguna	0,3 km ²	0,03 km ²
- precipitaciones:	200 mm/año	200 mm/año
- evaporación potencial:	1500 mm/año	1500 mm/año
- temperatura media:	0°C	0°C

No se ha encontrado ningún aporte nítido. En la orilla de la laguna Chivato Muerto hemos prelevado un agua más diluida que la laguna que podría corresponder a una mezcla de agua diluida de la napa contaminada por la cuña salina de la laguna. Hemos clasificado, sin mayor justificación esta agua dentro de las vertientes difusas, pero podría tratarse esencialmente de agua de la laguna. Además, esta agua es más salada que la laguna Trinchera. Hemos sacado una muestra de salmuera de cada laguna. Con solamente tres muestras, las interpretaciones no pueden ser más que muy preliminares.

Composición de las aguas

Las tres aguas tienen una similar composición porcentual (Fig.1) con leves variaciones en los componentes catiónicos menores Ca y Mg. Las salinidades y los tipos químicos son :

- Laguna Trinchera :	11 g/l	Na-(Ca) / Cl-(SO ₄)
- “ Vertiente ” Chivato Muerto	31 g/l	Na-(Mg) / Cl-SO ₄
- Laguna Chivato Muerto	97 g/l	Na-(Mg) / Cl-SO ₄

No se puede interpretar la salinidad de la “ vertiente ” puesto que la influencia de la propia laguna es dominante, ni tampoco determinar la composición del agua que diluye la salmuera. Las

aguas de las dos lagunas pertenecen al mega-grupo sulfatado, lo que no es discrepante con la litología volcánica de la cuenca de drenaje. El agua de la “vertiente” pertenece a la vía neutra sulfatada, lo que tampoco nos permite concluir sobre un origen de los componentes por alteración de rocas volcánicas o sedimentarias o por redisolución de antiguas evaporitas.

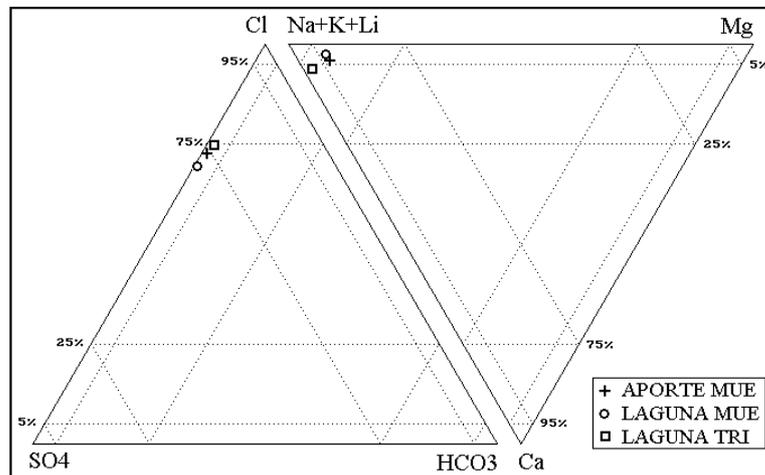


Fig.1: Composición de aguas de las lagunas del Chivato Muerto y de Trincherera

Calidad de agua

Las aguas son totalmente impropias para cualquier uso. Pero eso no descarta la posibilidad de encontrar napas de aguas diluidas en las cuencas de drenaje. La presencia de estas lagunas, indica por lo menos la existencia de napas no muy profundas en las cuencas de drenaje.

Balance hídrico

Puesto que no disponemos de la composición de los aportes es imposible calcular la tasa de infiltración. Lo único que podemos establecer es una estimación muy gruesa del volumen de aportes suponiendo que los aportes no son muy concentrados. La altura de evaporación potencial de la laguna Chivato Muerto debe ser reducida de 10 % para tomar en cuenta la salinidad de 97 g/l de la salmuera. Se obtiene :

- Chivato Muerto ($H_e = 1,35$ m/año ; $H_p = 0,2$ m/año ; $S = 0,03$ km²)

$$V_{ap} = S(H_e - H_p) = 34\ 500 \text{ m}^3/\text{año} = 1 \text{ l/s}$$

- Trincherera ($H_e = 1,5$ m/año ; $H_p = 0,2$ m/año ; $S = 0,3$ km²)

$$V_{ap} = S(H_e - H_p) = 390\ 000 \text{ m}^3/\text{año} = 12 \text{ l/s}$$

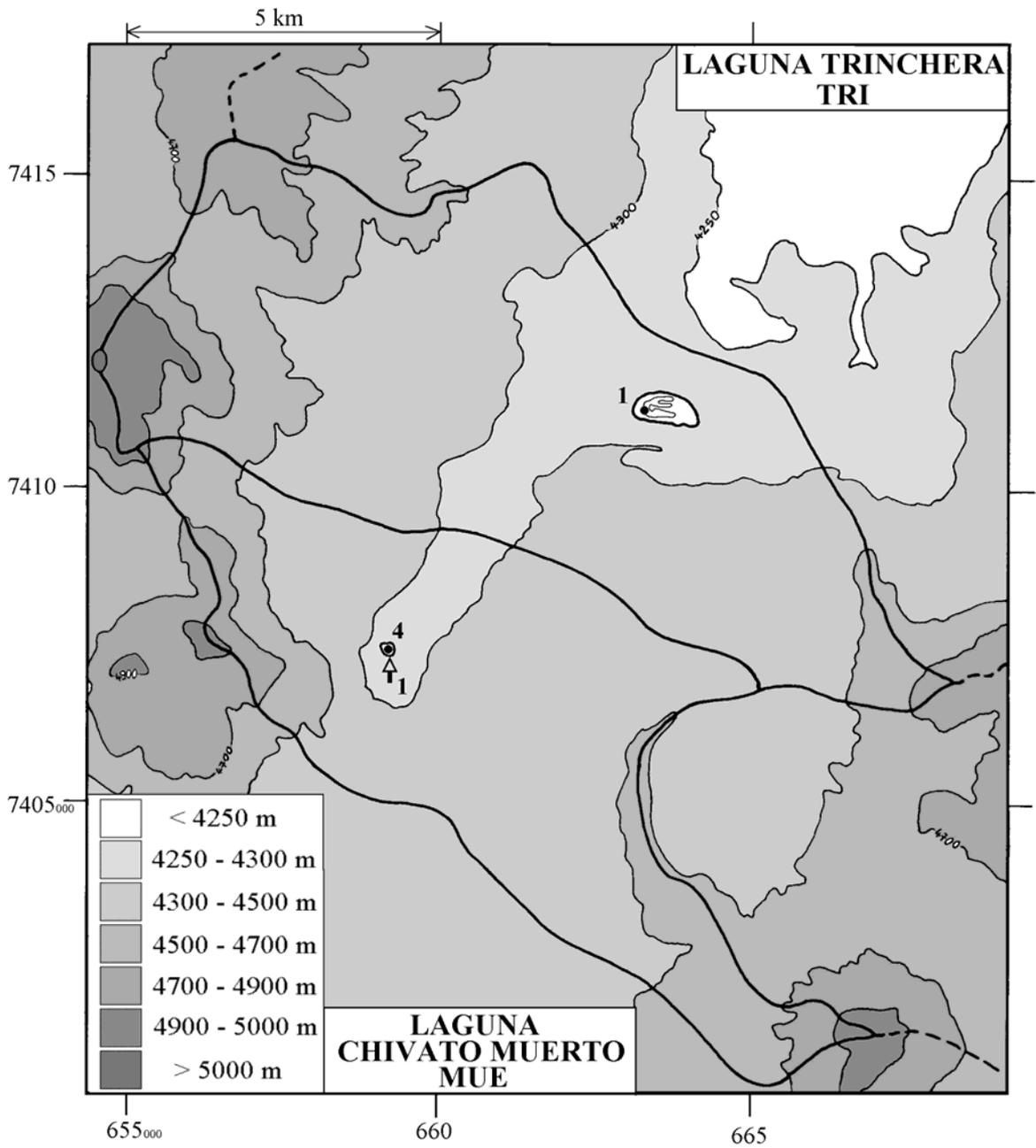
Los caudales entrantes son muy débiles. Esto sugiere que las lagunas son afloramientos del nivel freático del área. En otras palabras son como ventanas abiertas sobre las napas donde las aguas se evaporan.

Conclusiones

Las dos pequeñas lagunas Trincheras y Chivato Muerto no presentan gran interés como recursos de agua. Parecen ser simplemente afloramientos de napas. Por lo menos indican la existencia de napas subterráneas poco profundas, sobre las cuales no tenemos ninguna idea de su composición y calidad.

Referencias y estudios anteriores

Alonso, H. y Vargas, L. 1988. Hidroquímica de lagunas del Altiplano, Segunda Región. V Congreso Geológico Chileno, Santiago, 8-12 Agosto de 1988, Actas, tomo II, D35-D43.



**LAGUNA CHIVATO MUERTO / LAGUNA TRINCHERA
MUE / TRI**

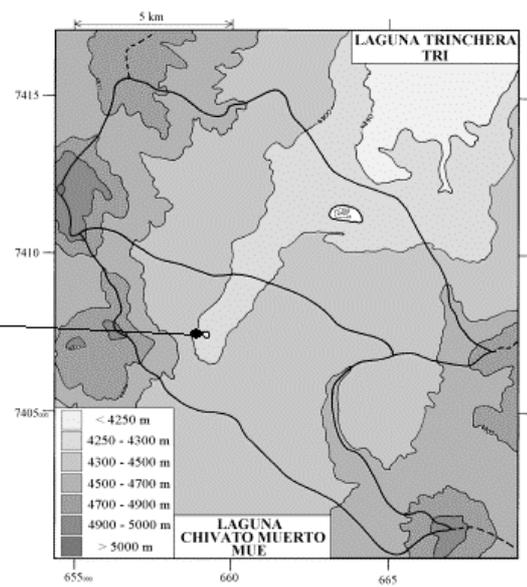
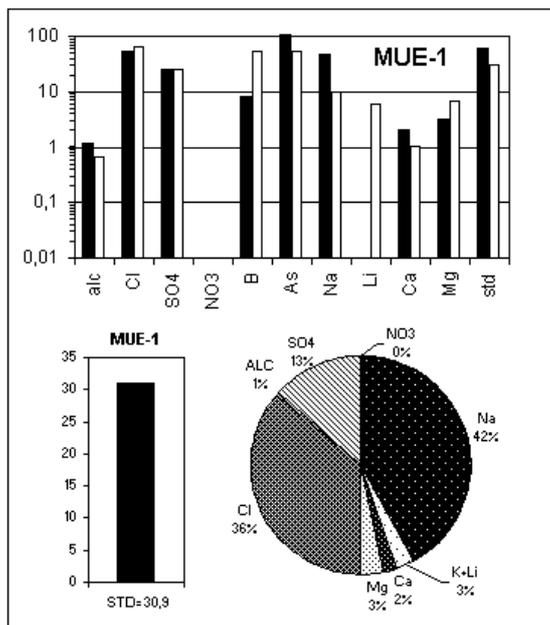
NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
MUE-1	11/10/93	10 ^H 50	659300	7406775	4295	Manantial difuso
MUE-4	11/10/93	11 ^H 10	659250	7407175	4295	Laguna
TRI-1	11/10/93	10 ^H 15	663325	7411400	4290	Laguna

NUMERO	CEL	T	DS	PH	ALC	F	CL	Br	I	SO4	NO3	PO4	B	SI	AS	NH4	NA	K	LI	CA	MG
MUE-1	39200	11	1,023	8,67	6,73	6,0	12900	3,05	0,095	6290	nd	0,3	39,6	20,8	5,36	0,3	9320	981	15,1	405	401
MUE-4	97900	10	1,070	8,71	12,0	6,7	38700	9,99	0,897	22500	0,2	0,8	225	43,1	18,7	2,3	30800	1820	46,4	790	1240
TRI-1	18200	7	1,01	7,49	2,73	5,9	4650	1,13	0,128	1980	3,2	0,1	18,3	13,6	4,14	0,04	3520	162	4,91	216	41,8

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. %
MUE-1	30916	278	31,1	0,70	485,5	502,1	3,4
MUE-4	97153	128	29,9	0,26	1535	1571	2,3
TRI-1	10841	163	0,6	7,9	172,1	175,3	1,9

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

TRI / MUE

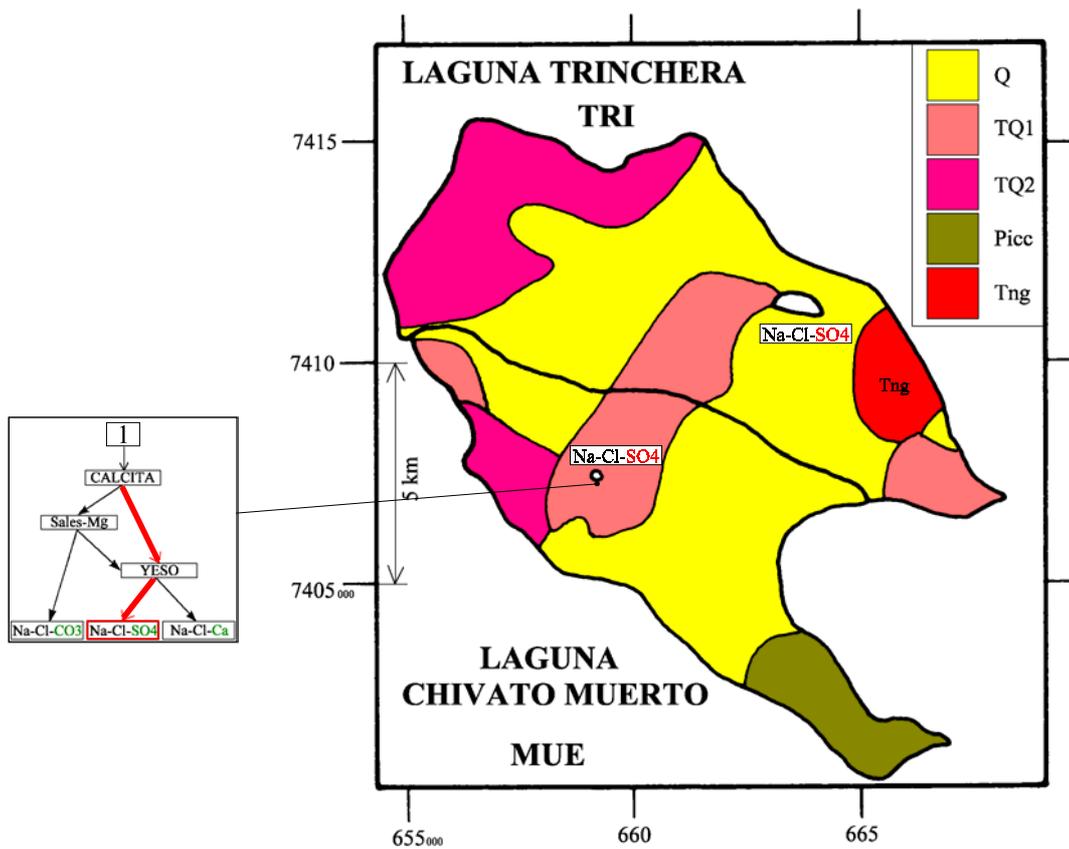
Q : *Cuaternario*. Sedimentos fluviales, lacustres, glaciales, eólicos aluviales, coluviales y laháricos.

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.

Picc : *Plioceno*. Depósitos piroclásticos no consolidados de cenizas, pómez y bloques.

Tng : *Neogeno*. Rocas plutónicas e hipabisales.



SALAR DE AGUAS CALIENTES 2

Introducción

El salar de Aguas Calientes 2 se encuentra en el sector central del Altiplano de la II Región. El aporte superficial más importante es el río Pili en el norte. Otro aporte importante es la quebrada de Chamaca que, a igual que el anterior, forma unas vegas al desembocar en el salar. Es un salar de tipo playa con varias lagunas de extensión variable, siendo la principal la de Aguas Calientes en el sur. Sus principales características morfométricas y climatológicas son:

- altura: 4200 m
- superficie de la cuenca: 1168 km²
- superficie del salar: 134 km²
- superficie de las lagunas: 9 km²
- precipitaciones: 150 mm/año
- evaporación potencial: 1500 mm/año
- temperatura: 1°C

Se pudo obtener solamente 6 muestras: 5 de vertientes y una de laguna. Son muy pocas para un estudio adecuado de un salar de este tamaño.

Composición de las aguas

Las composiciones de aguas del salar de Aguas Calientes 2 están presentadas en la figura 1 y en la tabla 1. Se muestrearon 2 vertientes fluyentes y tres difusas. Todas surgen a la orilla misma del salar y tienen salinidades elevadas. Cuatro son salobres (AC2-1, 4, 7 y 13), desde 2530 mg/l hasta 5930 mg/l de STD, y una salada (AC2-15), con 13600 mg/l de STD. La única laguna que se ha podido muestrear tiene una salinidad de 11500 mg/l de STD, o sea inferior a la salinidad de la vertiente más concentrada.

<u>APORTES</u>	<u>SALINIDAD</u> mg/l	<u>TIPO QUÍMICO</u>		<u>VÍA EVOLUTIVA</u>
		Cationes	Aniones	
AC2-1	2530	Na-Ca- (Mg)	/ Cl-SO4- (HCO3)	SO4 (N)
AC2-13	3797	Na-Ca- (Mg)	/ Cl-SO4	Ca
AC2-4	3902	Na-Ca	/ Cl-SO4	SO4 (N)
AC2-7	4202	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl-SO4- (HCO3)	SO4 (N)
AC2-10	13656	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl- (SO4)	Ca
<u>LAGUNA</u>				
AC2-15	11544	Na-Ca- (Mg)	/ Cl- (SO4)	Ca

Tabla 1 : Salinidades, tipos químicos y vías evolutivas de aguas del salar de Aguas Calientes 2. SO₄ (N) = vía neutra sulfatada; Ca = vía cálcica.

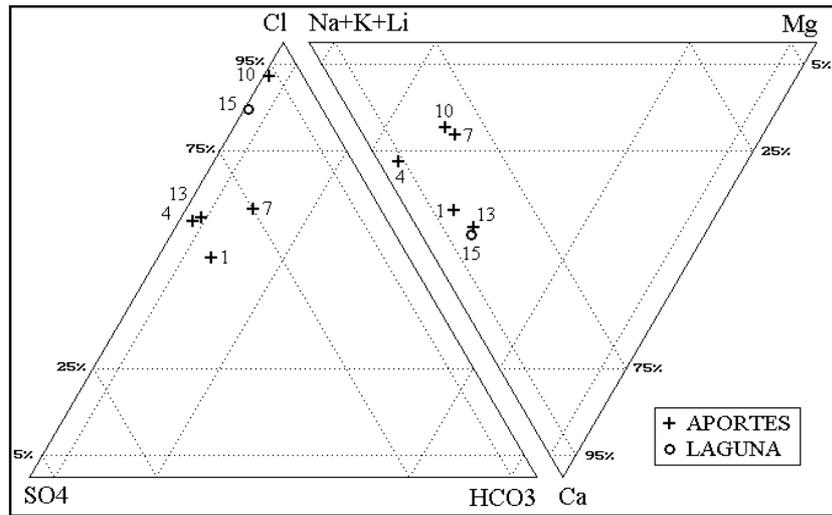


Fig.1: Composición de los aportes y de una laguna del salar de Aguas Calientes 2.

Las cuatro vertientes salobres tienen una composición más o menos homogénea mientras que la vertiente salada tiene una composición aniónica particular, mucho más rica en cloruro. Una primera pregunta se refiere al origen de las altas salinidades de los aportes. Las figuras 2 y 3 presentan las relaciones Na versus Cl y Ca versus SO₄. Los puntos representativos de la vertiente fluyente (1) se encuentran casi exactamente encima de las rectas de equimolaridad Na = Cl y Ca = SO₄, lo que indica una redisolución de halita (NaCl) y yeso (CaSO₄·2H₂O). Es muy probable que el mismo proceso afecta también, en parte, las aguas salobres de aporte (4, 7 y 13) cuyos puntos no se encuentran muy alejados de las rectas equimolares. Al contrario, el agua salada de la vertiente difusa (10) tiene sus puntos más alejados de las rectas, casi como los de la laguna (15). Eso sugiere que la alta salinidad de la vertiente más concentrada se debe a una cuña de la salmuera del salar en la napa que se descarga en esta orilla. La formación sedimentaria más común en este sector con antiguas evaporitas es la Formación San Pedro. No aparece en la cuenca de Aguas Calientes 2, pero podría encontrarse recubierta por niveles volcánicos.

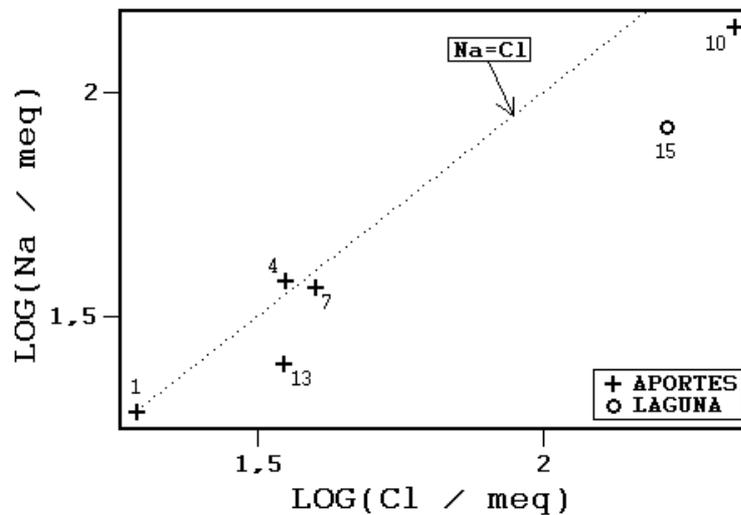


Fig.2 : Relación entre Na y Cl en las aguas del salar de Aguas Calientes 2.

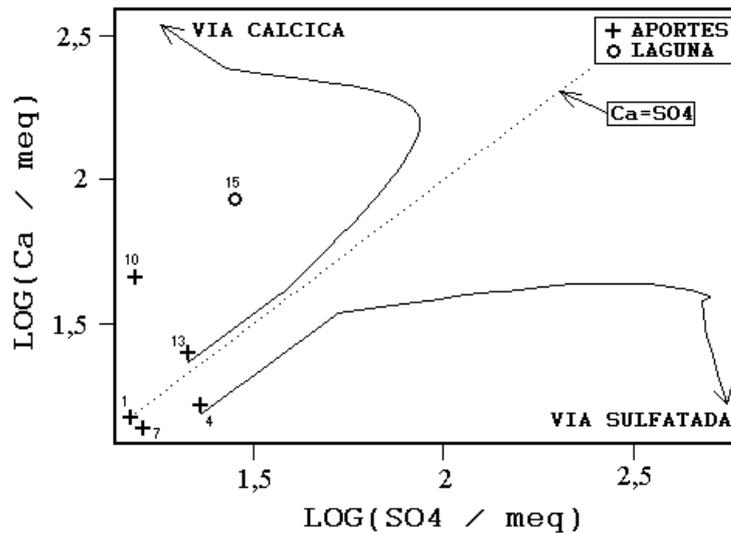


Fig.3 : Relación entre Ca y SO₄ en las aguas del salar de Aguas Calientes 2.

Vías evolutivas y relación con la geología

Tres vertientes salobres (1, 4, 7) siguen la vía evolutiva neutra sulfatada. La vertiente salada (10) y la vertiente salobre (13) siguen la vía cálcica. Dos trayectos evaporatorios típicos quedan representados en la figura 2. Las aguas iniciales (4 y 13) no son muy diferentes. Pero al evaporarse, su composición cambia drásticamente. La laguna estudiada proviene de la evaporación de aportes de vía evolutiva cálcica, y no sulfatada. Sin embargo, faltan muestras de otras lagunas y de la napa subterránea para caracterizar con más precisión la química del salar. Las aguas de aporte no corresponden a la litología superficial de la cuenca. La vía evolutiva cálcica caracteriza terrenos sedimentarios que no aparecen en el mapa geológico. La vía neutra sulfatada puede corresponder tanto a terrenos volcánicos ricos en azufre como a niveles sedimentarios. Pero las altas salinidades excluyen un simple origen a partir de la alteración de rocas volcánicas. Hemos visto que antiguas evaporitas han probablemente contribuido a las altas salinidades de los aportes.

Evolución cuantitativa de aguas

La tabla 1 presenta la composición calculada de todas las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta la salinidad de la laguna. La composición de la laguna ha sido equilibrada con la calcita.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
AC2-15.EQ	7,86	0,477	5840	1320	18,3	28,5	1920	196	3,61	1700	231	
AC2-13E	7,95	0,630	5040	2160	22,6	32,0	2300	386	4,45	1020	323	0,118
AC2-1E	8,03	0,793	4290	3000	26,4	32,1	2780	120	6,24	739	273	0,214
AC2-4E	8,04	0,830	4130	2990	33,1	32,2	2870	365	10,6	711	97,5	0,389
AC2-7E	8,18	1,39	4610	2550	56,8	32,2	2750	254	9,15	368	468	0,459

Tabla 1 : Comparación de las aguas de aporte evaporadas con una laguna del salar de Aguas Calientes 2. (ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l).

El agua de aporte cuya evaporación produce la salmuera más parecida a la de la laguna (15) es la vertiente más cercana (AC2-13). Sin embargo, se nota ciertas discrepancias, especialmente en Ca y SO₄, que indican otros aportes a la laguna.

Calidad de aguas

Es obvio, en vista de las altas salinidades de los aportes, que todas las aguas prelevadas están muy lejos de cumplir con las normas de potabilidad y de uso agrícola. La menos mala es la vertiente (1) con una salinidad 5 veces superior al límite de potabilidad, pero sin exceso de arsénico. El hecho de que las altas salinidades se deban a la redisolución de antiguas evaporitas limita las posibilidades de encontrar aguas netamente más diluidas y en grandes cantidades en la cuenca de Aguas Calientes 2.

Balance hídrico

De las varias lagunas, tenemos datos químicos solamente de una. Según los mapas, la superficie total del agua es de 9 km². Podemos adelantar el orden de magnitud del volumen total de aportes V_{ap} a las lagunas (pero no al salar entero):

$$V_{ap} = S(H_c - H_p) = 12\,150\,000 \text{ m}^3/\text{año} = 385 \text{ l/s}$$

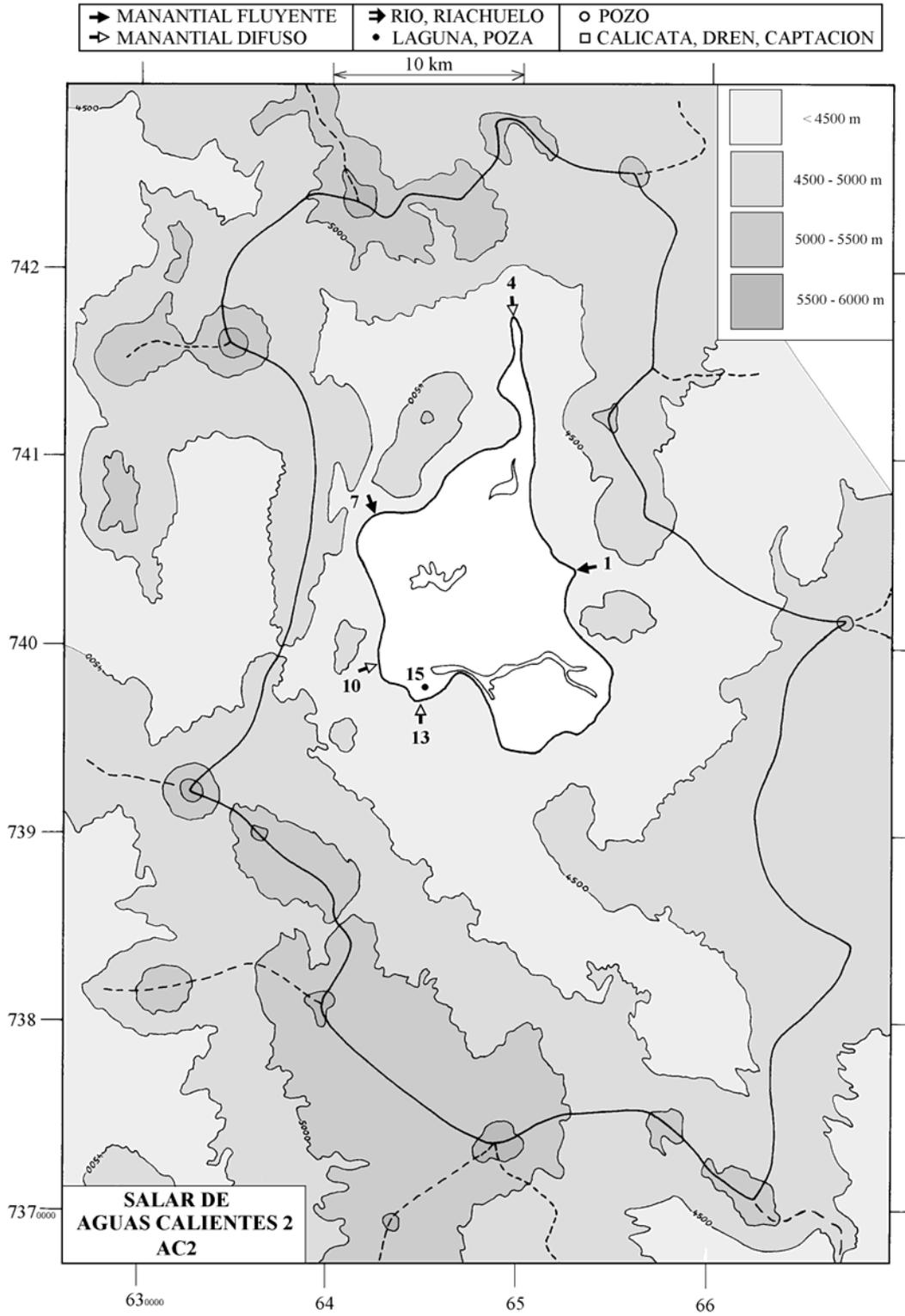
con: $S = 9 \times 10^6 \text{ m}^2$ $H_c = 1,5 \text{ m/año}$ $H_p = 0,15 \text{ m/año}$

Conclusiones

El salar de Aguas Calientes 2 recibe aguas de aporte salobres y saladas de mala calidad. Las sales disueltas en esas aguas provienen de la redisolución de antiguas evaporitas (halita y yeso) que se encuentran enteradas por debajo de las formaciones volcánicas de la cuenca de drenaje. Podría tratarse de la Formación San Pedro bien desarrollada al oeste de la cuenca en el sector del salar de Atacama. La única salmuera superficial analizada es de tipo Na-Ca / Cl. Pero falta contar con mayor cantidad de análisis de las lagunas y de la napa del salar para poder caracterizar más precisamente la química del salar.

Referencias y estudios anteriores

Alonso, H. y Vargas, L. 1988. Hidroquímica de lagunas del Altiplano, Segunda Región. V Congreso Geológico Chileno, Santiago, 8-12 Agosto de 1988, Actas, tomo II, D35-D43.



**SALAR DE AGUAS CALIENTES 2
AC2**

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
AC2-1	11/10/93	11 ^H 30	653425	7404025	4200	Vegas de Chamaca
AC2-4	11/10/93	12 ^H 35	649550	7417750	4250	Manantial difuso
AC2-7	11/10/93	13 ^H 30	642350	7406950	4230	Manantial corriente
AC2-10	11/10/93	14 ^H 15	642675	7398575	4200	Manantial difuso
AC2-13	13/10/93	16 ^H 40	645300	7396950	4200	Manantial difuso
AC2-15	13/10/93	17 ^H 00	645750	7398225	4200	Laguna

NUMERO	CEL	T	DS	PH	ALC	F	CL	Br	I	SO4	NO3	PO4	B	SI	AS	NH4	NA	K	LI	CA	MG
AC2-1	3500	3	1,002	8,22	4,12	4,18	689	0,209	0,028	720	0,12	nd	4,23	22,1	0,046	0,14	444	19,2	1,00	298	43,7
AC2-4	5680	16	1,003	9,27	1,78	3,55	1260	0,615	0,023	1100	0,19	nd	10,1	27,0	0,485	0,25	869	111	3,22	329	29,6
AC2-7	5930	15	1,004	7,28	8,60	1,98	1420	0,943	0,131	781	nd	0,5	17,4	35,0	1,19	0,16	840	77,8	2,80	277	143
AC2-10	25600	17	1,010	8,03	3,34	1,18	7700	2,25	0,170	743	0,12	0,1	25,5	27,5	1,76	0,11	3220	234	5,83	914	486
AC2-13	5210	14	1,003	7,81	2,55	1,81	1250	1,05	0,062	1030	0,06	nd	5,57	46,8	0,734	0,25	566	95,0	1,10	501	79,5
AC2-15	16960	14	1,009	7,67	1,62	1,94	5860	3,58	0,113	1350	0,99	0,1	18,3	47,3	1,38	0,14	1920	196	3,61	1720	231

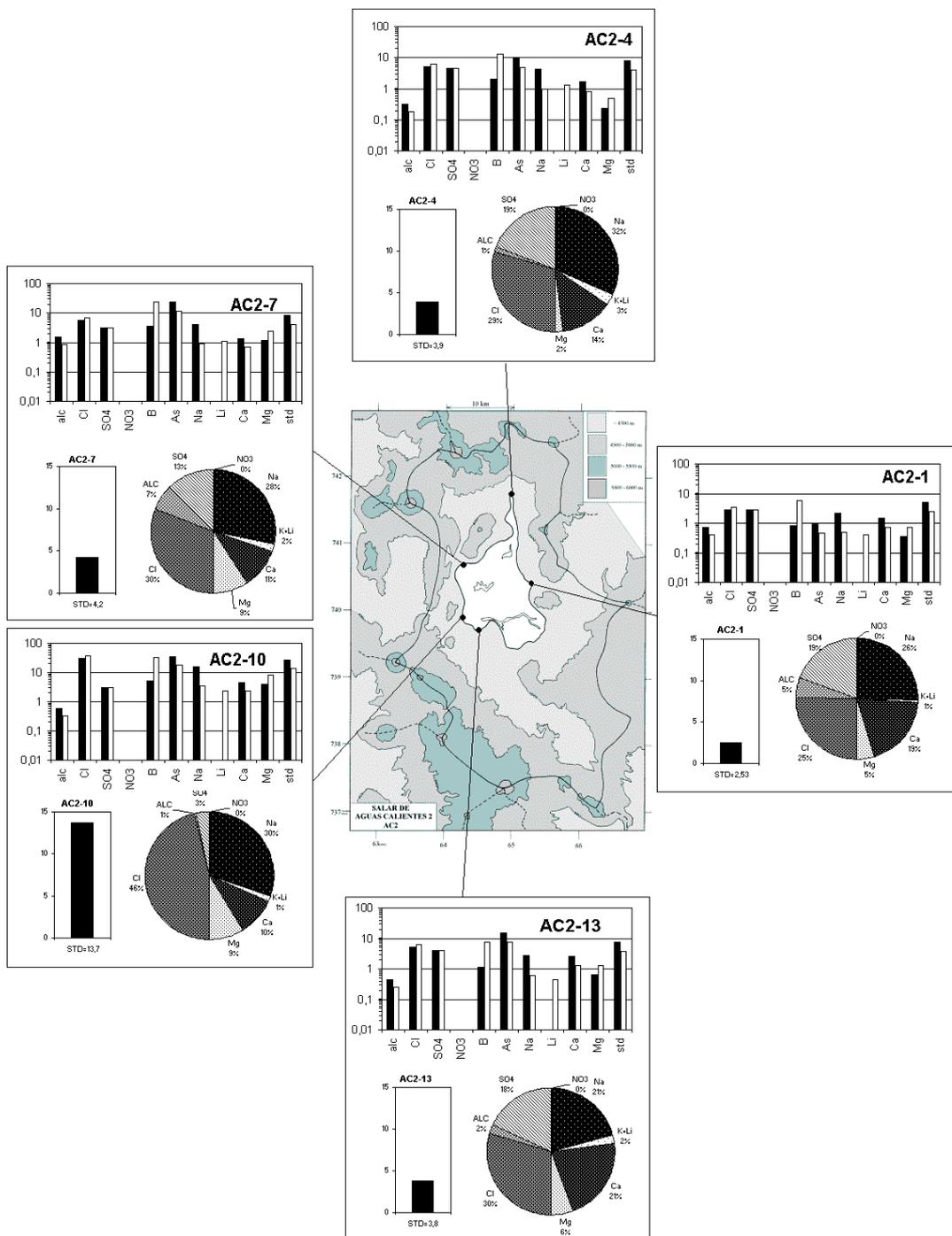
T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l.

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

NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF. %
AC2-1	2530	239	5,16	2,9	38,42	38,74	0,83
AC2-4	3902	37,2	13,0	0,03	59,96	60,48	0,86
AC2-7	4202	519	2,10	40	64,50	65,01	0,79
AC2-10	13656	170	8,52	2,1	232,4	235,9	1,5
AC2-13	3797	148	2,40	3,5	58,74	59,26	0,88
AC2-15	11544	88,5	2,28	2,8	193,6	195,0	0,70

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

AC2

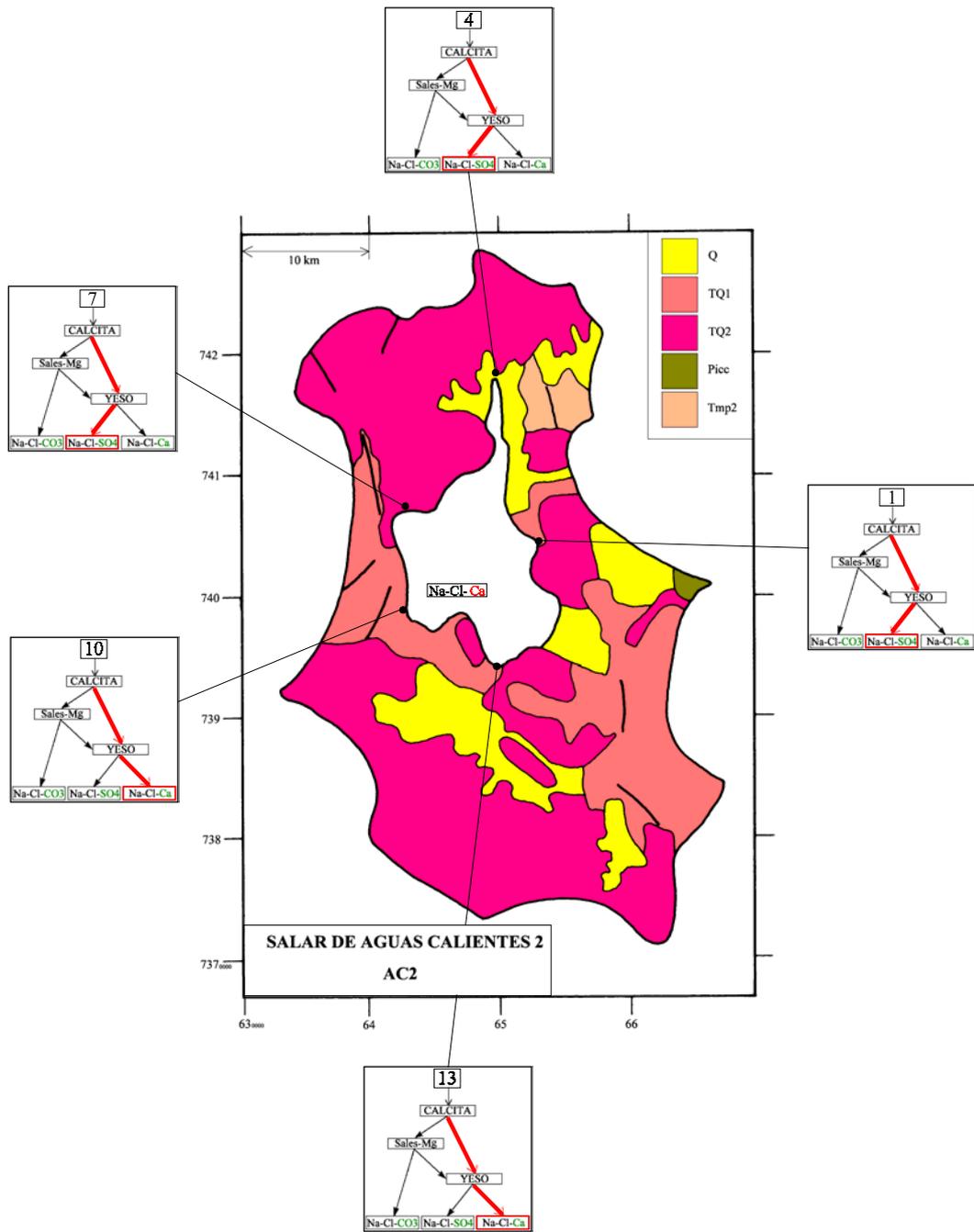
Q : *Cuaternario*. Sedimentos fluviales, lacustres, glaciales, eólicos aluviales, coluviales y laháricos.

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.

Picc : *Plioceno*. Depósitos piroclásticos no consolidados de cenizas, pómez y bloques.

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



LAGUNA LEJIA

Introducción

La laguna Lejía se encuentra en el Altiplano de la II Región. Su cuenca es colindante con la del salar de Atacama al oeste y la del salar Aguas Calientes 2 al este. El activo volcán Lascar domina la cuenca de drenaje al norte. La paleohidrología de la laguna ha sido estudiada detalladamente por Grosjean et al., 1995. Sus principales características morfométricas y climatológicas son:

- altura: 4325 m
- superficie de la cuenca: 193 km²
- superficie de la laguna: 1,9 km²
- precipitaciones: 150 mm/año
- evaporación potencial: 1500 mm/año
- temperatura media: 1°C

La única alimentación que hemos encontrado es una vertiente difusa al oeste de la laguna. Hemos extraído solamente dos muestras : la vertiente y la laguna. Las interpretaciones son entonces muy preliminares.

Composición de las aguas

El agua de la vertiente difusa tiene una salinidad 1,3 g/l STD. La laguna es una salmuera de 70 g/l STD. Los tipos químicos son :

- vertiente : Na-Mg-(Ca) / HCO₃-SO₄-(Cl)
- laguna : Na-Mg / SO₄-Cl

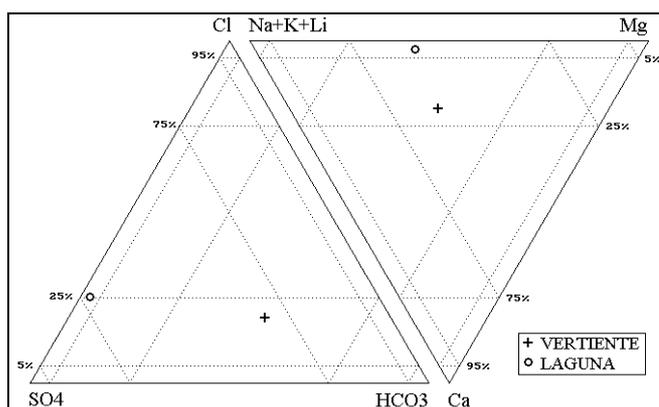


Fig.1. Composición de las aguas de la laguna Lejía

Se observa en la figura 1 la posición de los puntos representativos de las aguas de la laguna Lejía. No son composiciones muy comunes en los salares y lagunas del norte de Chile, especialmente en lo que se refiere a la laguna. Es la salmuera de mas alto porcentaje en magnesio que hemos

encontrado en el norte chileno. La sobrepasan solamente las aguas diluidas de las lagunas Cotacotani y Chungará en el extremo norte. En anexo, presentamos los análisis de elementos trazas realizados por ICP-MS del agua de la laguna.

La composición porcentual de la vertiente difusa corresponde a un agua de alteración de rocas volcánicas con azufre. La salinidad relativamente elevada de esta agua se debe probablemente a la pre-evaporación de la napa a través de los sedimentos de la orilla o a una mezcla con la cuña salina. No se detecta ninguna correlación equimolar entre aniones y cationes que sugieren la redisolución de antiguas salmueras o evaporitas.

Evolución de aguas

El agua de la vertiente sigue la vía evolutiva alcalina sulfatada que refleja generalmente terrenos volcánicos con algo de azufre. Por otra parte, hay concordancia entre esta vía evolutiva y la composición sulfatada de la laguna. Entonces, hay buena adecuación entre la litología volcánica de la cuenca, la vía evolutiva del único aporte prelevado y la composición de la laguna. Hay que recalcar que no son muchos los salares y lagunas en el Altiplano de la II Región cuyo quimismo refleja el ambiente geológico.

La tabla 1 presenta la composición calculada del agua de la vertiente evaporada por simulación computacional hasta la salinidad de la laguna. La columna "desviación" da el coeficiente del chi-cuadrado adaptado que mide el grado de semejanza entre la solución evaporada y la solución real.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
<u>LEJ-1</u>	8,23	27,4	9730	37800	213	12,8	13300	1180	26,9	533	5220	
LEJ-3E	8,29	6,76	13900	31100	323	28,7	18500	2310	63,1	510	1780	0,306

Tabla 1 : Comparación del agua evaporada de la vertiente difusa con la laguna Lejía. ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

La concordancia entre la salmuera calculada y la salmuera real no es muy buena, sobre todo para Mg, Li y K. La primera explicación es que hay otros aportes, en particular subterráneos, que alimentan la laguna con la misma composición global y la misma vía evolutiva. Eso es evidente al establecer el balance hídrico (ver mas abajo). Otra posibilidad es la depositación de cenizas del volcan Lascar directamente sobre la laguna durante las frecuentes erupciones.

Calidad de aguas

La vertiente difusa tiene un contenido de arsénico 4 veces superior a la norma de potabilidad. La otra limitación es un leve exceso de la salinidad total. Es posible encontrar napas de aguas diluidas más arriba en la cuenca, puesto que no parece haber salinización de aguas diluidas por antiguas salmueras o evaporitas. Sin embargo, la presencia del activo volcán Lascar con fumarolas permanentes podría acarrear problemas.

Balance hídrico

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

- $H_e = 1,5$ m/año
- $H_p = 0,15$ m/año
- $S = 1,9$ km²
- $C_{ap} = 111$ mg/l
- $C_L = 9730$ mg/l

Volumen de aporte : $V_{ap} = S(H_e - H_p)/(1 - C_{ap}/C_L) = 2\,600\,000$ m³/año = 82 l/s

Volumen de infiltraciones : $V_i = S(H_e - H_p)/(1 - C_L/C_{ap}) = 29\,600$ m³/año ~ 1 l/s

No se observa ningún flujo en alguna vertiente difusa. Es probable que la laguna sea alimentada principalmente por una napa subterránea de composición parecida a la vertiente.

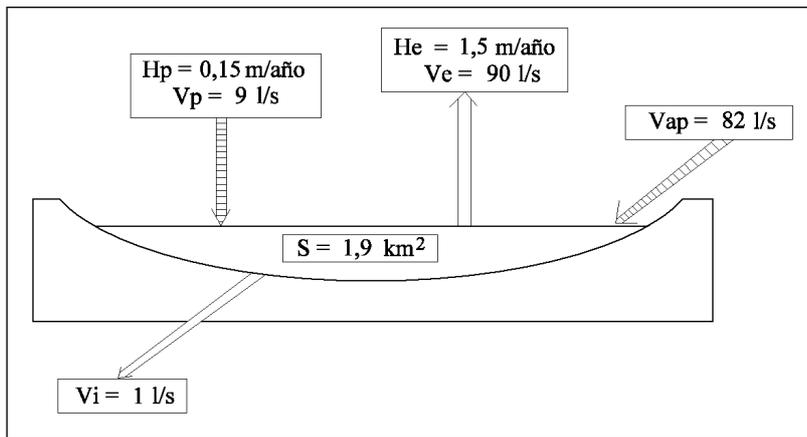


Fig.2 : Balance hídrico de la laguna Lejía.

Conclusiones

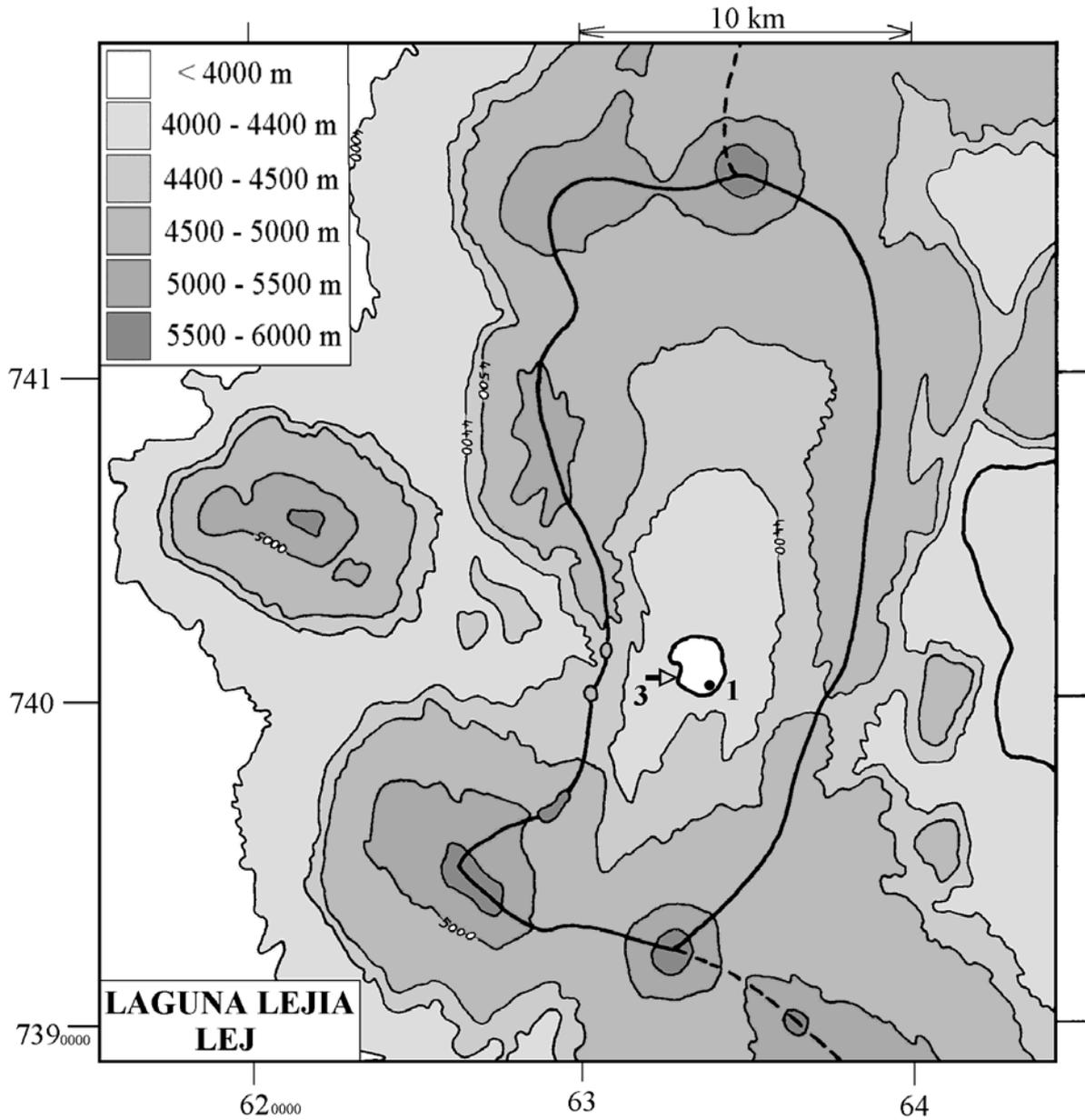
Tenemos muy pocos datos para sacar conclusiones firmes. La cuenca de la laguna Lejía podría presentar potencialidades para recursos de agua, si no fuera por la presencia muy cercana del activo volcán Lascar. La composición del agua de la única vertiente difusa que hemos prelevado proviene bien de la alteración de rocas volcánicas con leve contenido de azufre. La laguna es del mega-grupo sulfatado con un contenido porcentual excepcionalmente elevado en magnesio.

Referencias y estudios anteriores

Alonso, H. y Vargas, L. 1988. Hidroquímica de lagunas del Altiplano, Segunda Región. V Congreso Geológico Chileno, Santiago, 8-12 Agosto de 1988, Actas, tomo II, D35-D43.

Grosjean, M. 1994. Paleohydrology of the Laguna Lejía (north Chilean Altiplano) and climatic implications for late-glacial times. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 109, 89-100.

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



**LAGUNA LEJIA
LEJ**

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
LEJ-1	13/10/93	17 ^H 45	634000	7400575	4325	Laguna
LEJ-3	13/10/93	18 ^H 10	632975	7400525	4326	Manantial difuso

NUMERO	CEL	T	DS	PH	ALC	F	CL	Br	I	SO4	NO3	PO4	B	SI	AS	NH4	NA	K	LI	CA	MG
LEJ-1	53600	11	1,060	8,23	27,4	5,8	9730	9,99	1,46	37800	0,3	1,4	213	12,8	47,9	na	13300	1180	26,9	533	5220
LEJ-3	1584	0	1,001	7,97	8,17	1,2	111	0,081	0,028	250	0,6	nd	2,59	41,7	0,202	0,02	153	18,6	0,507	67,0	77,0

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.

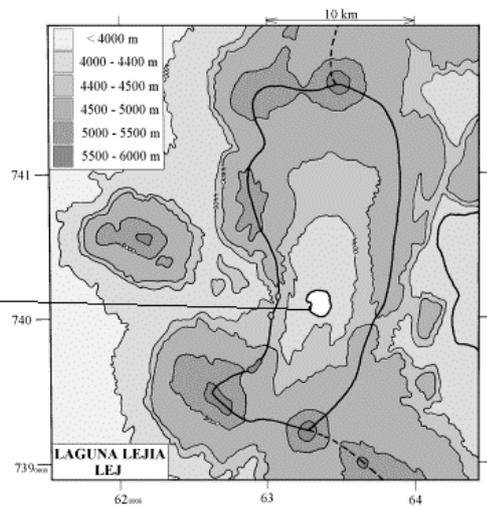
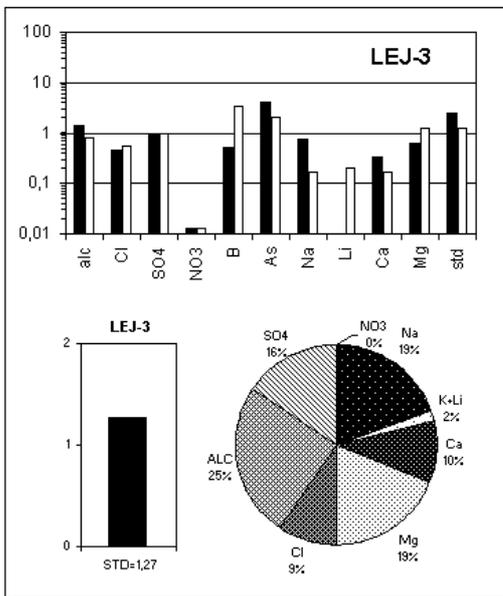
NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF. %
LEJ-1	70273	1140	131	7	1070	1090	1,9
LEJ-3	1273	490	3,84	12	16,89	16,59	1,8

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 elementos trazas por ICP-MS del agua de la laguna Lejía (LEJ-1)

		$\mu\text{g} / \text{l}$			$\mu\text{g} / \text{l}$
Vanadio	V	124	Samario	Sm	nd
Cromo	Cr	6,0	Europio	Eu	0,0039
Cobalto	Co	5,4	Gadolinio	Gd	0,019
Niquel	Ni	3,3	Terbio	Tb	0,0031
Cobre	Cu	9,9	Disproseo	Dy	0,020
Cinc	Zn	5,7	Holmio	Ho	0,0032
Rubidio	Rb	379	Erbio	Er	0,0030
Estroncio	Sr	398	Tulio	Tm	0,0045
Itrio	Y	0,027	Iterbio	Yb	0,0092
Circonio	Zr	0,040	Lutecio	Lu	0,0011
Niobio	Nb	0,077	Hafnio	Hf	0,0067
Molibdeno	Mo	20,9	Tantalio	Ta	0,0028
Rutenio	Ru	0,15	Tungsteno	W	5,1
Rodio	Rh	0,035	Renio	Re	0,13
Plata	Ag	0,030	Osmio	Os	0,064
Paladio	Pd	0,024	Iridio	Ir	0,018
Cadmio	Cd	0,15	Platino	Pt	0,091
Indio	In	0,013	Oro	Au	0,018
Estaño	Sn	0,040	Talio	Tl	nd
Antimonio	Sb	1,6	Plomo 206	Pb	0,85
Cesio	Cs	7,0	Plomo 207	Pb	0,92
Bario	Ba	12,6	Plomo 208	Pb	0,73
Lantano	La	0,15	Bismuto	Bi	0,0061
Cerio	Ce	0,0011	Torio	Th	0,0050
Praseodimio	Pr	nd	Uranio	U	10,9
Neodimio	Nd	0,0054			

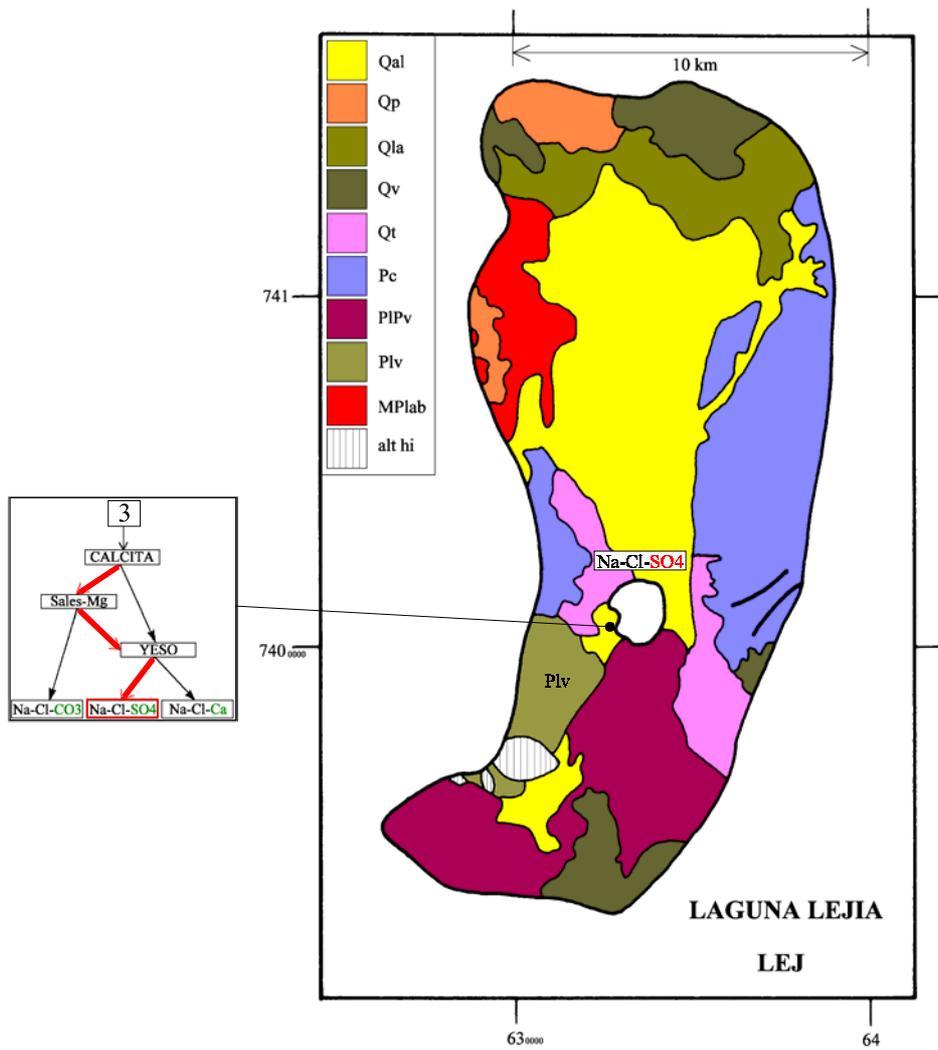
En microgramos por litro; nd = no detectado



MAPA GEOLOGICO
Y
VIAS EVOLUTIVAS

LEJ

- Qal** : *Cuaternario*. Depósitos aluviales: gravas, arenas y limos.
- Qp** : *Cuaternario*. Piroclastos, escoria volcánica, pómez y ceniza.
- Qla** : *Cuaternario*. Lahares, depósitos mal seleccionados de bolones y ceniza localmente litificada.
- Qv** : *Cuaternario*. Estrato-volcanes IV. Dacitas y andesitas de piroxeno, andesitas de hornblenda y/o biotita, basaltos y andesitas basálticas subordinadas.
- Qt** : *Cuaternario*. Ignimbrita Tuyajto. Toba de cristales y vidrio.
- Pc** : *Pleistoceno*. Ignimbrita Cajón. Toba dacítica y andesítica de cristales vidrio y pómez debilmente soldada.
- PIPv** : *Plioceno - Pleistoceno*. Andesitas de piroxeno, andesitas de hornblenda y/o de biotita y dacitas, basaltos y andesitas basálticas subordinados.
- Plv** : *Plioceno*. Estrato-volcanes II. Andesitas de piroxeno y andesitas de hornblenda y/o biotita. Dacitas subordinadas.
- MPlab** : *Mioceno - Plioceno*. Porfido andesítico de biotita y hornblenda.
- alt hi** : alteración hidrotermal.



LAGUNA MISCANTI

Introducción

La laguna Miscanti se encuentra en el Altiplano de la II Región a menos de un kilómetro del borde oriental de la cuenca del salar de Atacama, a los pies del volcán del mismo nombre. Su cuenca colinda al sur con la cuenca de la pequeña laguna Miñique de la cual lo separa un pequeño portezuelo. Generalmente los estudios asocian las dos lagunas en un solo sistema. La laguna salobre Miscanti se encuentra a unos 10 metros más arriba que la laguna salada Miñique, por lo que se supone que las aguas de la laguna Miscanti se infiltran hacia la laguna Miñique. La paleolimnología de la laguna ha sido estudiada por Valero-Garcés et al. (1996). Las principales características morfométricas y climatológicas de la laguna Miscanti son:

- altura: 4120 m
- superficie de la cuenca: 303 km²
- superficie de la laguna 13,4 km²
- precipitaciones: 180 mm/año
- evaporación potencial: 1500 mm/año
- temperatura media: 2°C

Hemos encontrado dos vertientes difusas a la orilla de la laguna y una vertiente fluyente cuenca arriba. La vertiente fluyente ha sido captada para conducirla a través de una tubería hasta el poblado de Peine, en la cuenca del salar de Atacama. Entonces este aporte ya no alimenta más la laguna Miscanti. Sin embargo, lo consideraremos en el estudio puesto que la napa que se descarga en esta vertiente debe seguir alimentando de manera difusa la laguna. La captación solamente remueve 2 l/s de la napa.

Composición de los aportes y de la laguna

Las composiciones de aguas la laguna Miscanti están presentadas en la figura 1 y en la tabla 1. Se observa una gran variación en la composición de los aportes

<u>APORTES</u>	<u>SALINIDAD</u> mg/l	<u>TIPO QUÍMICO</u>		<u>VIA EVOLUTIVA</u>
		Cationes	Aniones	
MIS-9	217	Ca- (Na) - (Mg)	/ SO ₄ - (HCO ₃)	SO ₄ (N)
MIS-1	636	Na-Mg-Ca	/ SO ₄ - (HCO ₃) - (Cl)	SO ₄ (N)
MIS-5	705	Na- (Ca)	/ Cl-SO ₄ - (HCO ₃)	CO ₃
<u>LAGUNA</u>				
MIS-3	5224	Na- (Mg) - (Ca)	/ SO ₄ -Cl	SO ₄
MIS-8	5308	Na- (Mg) - (Ca)	/ SO ₄ -Cl	SO ₄

Tabla 1 : Salinidades, tipos químicos y vías evolutivas de aguas de la laguna Miscanti.
SO₄ (N) = vía neutra sulfatada; CO₃ = vía carbonatada.

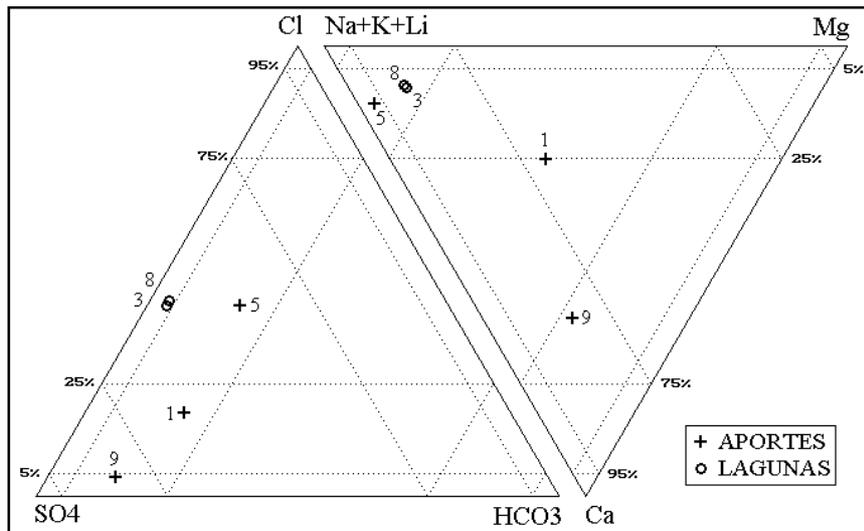


Fig.1 : Composición de las aguas de aporte y de la laguna Miscanti.

La laguna es salobre y netamente de tipo aniónico sulfatado. No se observa en las aguas de aporte las relaciones de equimolaridad entre Na y Cl, Na+Ca y Cl, Ca y SO₄, Na y Cl+SO₄ que indican una redisolución de antiguas evaporitas o salmueras. Considerando también la baja salinidad de los aportes, se puede asumir que la composición de los aportes se debe a la alteración de rocas volcánicas de la cuenca de drenaje.

Vías evolutivas y relación con la geología

La vertiente difusa (1), al norte de la laguna, y la vertiente fluyente (9), cuenca arriba, siguen al evaporarse la vía neutra sulfatada, lo que corresponde bien a la composición de la laguna y a la litología volcánica de la cuenca. El alto contenido en sulfato de estos aportes, y su vía evolutiva neutra sulfatada, indican la presencia de azufre en estos sectores de la cuenca. El aporte MIS-5 es distinto: sigue la vía evolutiva carbonatada, lo que caracteriza terrenos volcánicos sin o con poco azufre. Esta vía no logra desarrollarse porque las aguas de la vertiente (5) se mezclan con las otras aguas de aporte de vía neutra. Sin embargo debe tener alguna influencia en la composición de la laguna. Veamos entonces el aspecto cuantitativo de la evolución de aguas por evaporación.

Evolución cuantitativa de aguas

La tabla 1 presenta la composición calculada de todas las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional (MIS-xE) hasta la salinidad de la laguna (MIS-3.EQL). El agua de la laguna siendo sobresaturada en calcita (CaCO₃), se ha equilibrado su composición con este mineral. El aporte cuya evaporación produce la solución que más se acerca a la composición de la laguna es la vertiente norte (1). Sin embargo su coeficiente de desviación no es muy bueno. Varios componentes discrepan notablemente. El aporte MIS-5 tampoco tiene un buen coeficiente de desviación, lo que es normal puesto que esta agua evoluciona hacia una salmuera carbonatada bien distinta del agua sulfatada de la laguna.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
<u>MIS-3.EQL</u>	8,43	1,74	1150	1960	24,0	30,4	1290	198	1,11	109	101	
60% (1) +40% (5)	8,54	2,34	914	2300	26,3	30,6	1150	201	0,992	69,3	208	0,079
MIS-1E	8,38	1,53	615	2810	16,3	33,2	884	143	0,842	141	343	0,222
MIS-5E	8,85	5,10	1250	1610	38,0	34,3	1460	269	1,15	13,4	32,3	0,388
MIS-9E	8,12	0,822	151	3290	13,0	33,2	549	204	0,233	459	276	0,771

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

Puesto que la laguna esta alimentada por las dos vertientes, hemos simulado la evaporación de varias mezclas de las dos aguas. La que produce la solución evaporada con el desvío más bajo es una mezcla de 60% de MIS-1 y 40% de MIS-5. El ajuste, sin ser perfecto, es notablemente mejor que el de cada aporte evaporado solo. Los dos componentes que menos se ajustan son Ca y Mg. Se podría mejorar todavía el ajuste jugando con otros parámetros como la temperatura o la presión parcial del CO₂. Por otra parte, es posible que entren otros aportes no detectados. La vertiente fluyente (9) no parece tener mucha influencia en la composición de la laguna. El coeficiente de desviación de su agua evaporada es bastante elevado.

Calidad de aguas

El agua de la vertiente captada para la alimentación del pueblo de Peine es de excelente calidad y apta para cualquier uso, doméstico o agrícola. Las aguas de las dos vertientes difusas contienen demasiado arsénico para el consumo humano y valores aceptables para el boro en riego, según la experiencia regional.

Balance hídrico

La laguna Miscanti presenta condiciones favorables para establecer su balance hídrico con una buena precisión, por lo menos mejor que un simple orden de magnitud. Se trata de una laguna permanente, de superficie poco variable, y cuyos aportes han sido relativamente bien identificados. Se utiliza el cloruro como elemento conservativo. Los parámetros del balance son:

- H_e = 1,5 m/año
- H_p = 0,18 m/año
- S = 13,4 km²
- C_{ap} = 88,2 mg/l (60% MIS-1 + 40% MIS-5)
- C_L = 1180 mg/l (promedio de MIS-3 y MIS-8)

Se obtiene:

Volumen de aportes: $V_{ap} = S(H_e - H_p) / (1 - C_{ap}/C_L) = 19 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año} = 606 \text{ l/s}$

Volumen de infiltraciones: $V_i = S(H_e - H_p) / (C_L/C_{ap} - 1) = 1,4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año} = 45 \text{ l/s}$

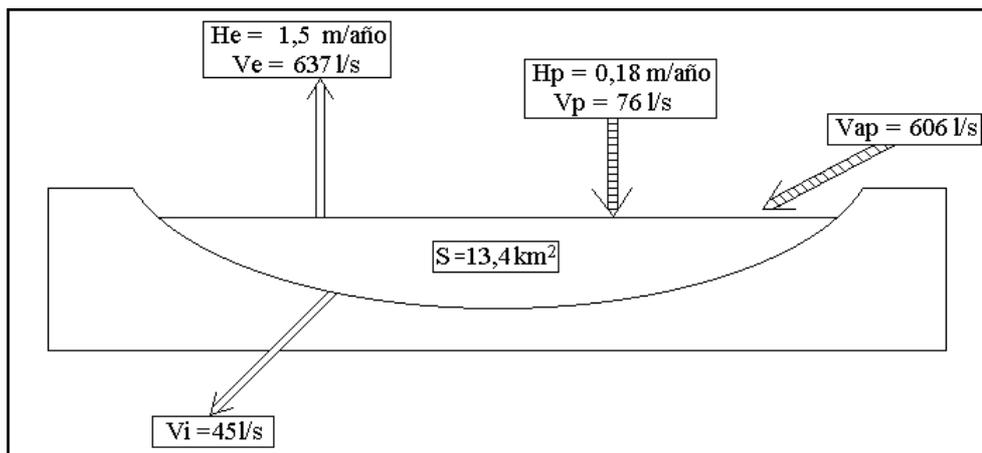


Fig.2 : Balance hídrico de la laguna Miscanti.

El volumen de aportes es elevado, lo que sugiere la existencia de importantes napas en la cuenca de drenaje. Con tal volumen es sorprendente que no haya vertientes fluyentes de buen caudal. Aun considerando que toda la orilla de la laguna es una inmensa vertiente difusa, el caudal sería de 40 mililitros por segundo y por metro de orilla. Toda la orilla sería un verdadero pantano. Por eso, es más probable que la laguna es alimentada en gran parte por descarga de napas debajo de la superficie de la laguna. El volumen de las infiltraciones tiene gran importancia en la discusión del balance hídrico de la vecina laguna Miñique. El valor que adelantamos está basado sobre una concentración promedio ponderada en Cl de los dos aportes MIS-1 y 5. Considerando las composiciones extremas (MIS-1 solo y MIS-5 solo) podemos precisar el rango de incertidumbre de la tasa de infiltración : $28 \text{ l/s} < V_i < 74 \text{ l/s}$.

Conclusiones

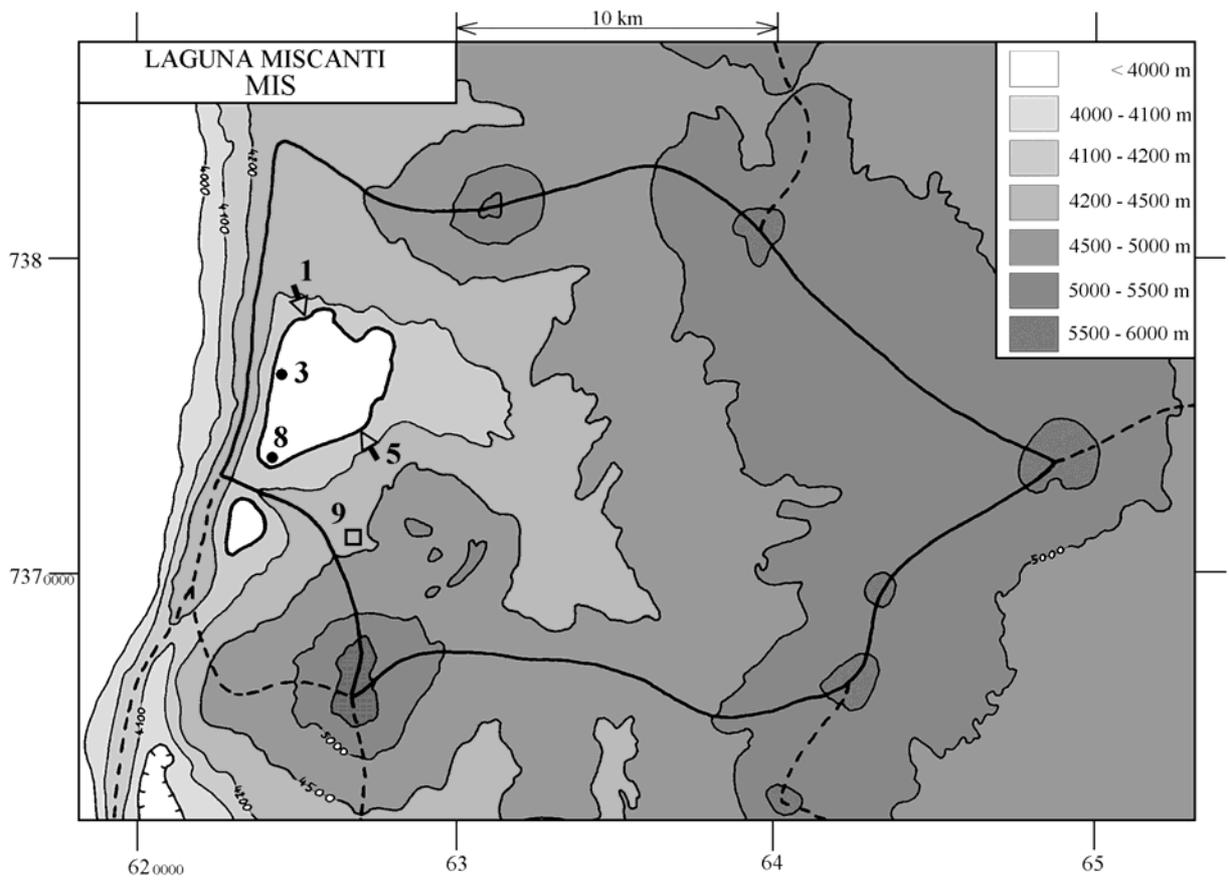
La cuenca de laguna Miscanti presenta interesantes potencialidades hídricas. Las aguas de aporte son diluidas y no muestran contaminación por antiguas evaporitas. El caudal entrante en la laguna es de unos 600 l/s, valor elevado en esta zona árida. La alimentación se hace sobre todo por descarga de napas subterráneas en la laguna. La composición de la laguna es de agua salobre de tipo Na / SO₄-Cl y proviene de la evaporación de una mezcla de aguas de aporte de vía evolutiva carbonatada con aguas de vía evolutiva neutra sulfatada.

Referencias y estudios anteriores

Alonso, H. y Vargas, L. 1988. Hidroquímica de lagunas del Altiplano, Segunda Región. V Congreso Geológico Chileno, Santiago, 8-12 Agosto de 1988, Actas, tomo II, D35-D43.

Valero-Garcés, B.L.; Grosjean, M.; Schwalb, A.; Geyh, M.; Messerli, B.; Kelts, K. 1996. Limnogeology of Laguna Miscanti: evidence for mid to late Holocene moisture changes in the Atacama Altiplano (Northern Chile). *Journal of Paleolimnology* 16, 1-21.

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



**LAGUNA MISCANTI
MIS**

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS ESTE	UTM NORTE	ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
MIS-1	14/10/93	10 ^H 00	625075	7378250	4121	Manantial difuso
MIS-3	14/10/93	10 ^H 30	624375	7376250	4120	Laguna
MIS-5	14/10/93	11 ^H 00	626700	7374075	4120	Manantial difuso
MIS-8	14/10/93	11 ^H 45	624100	7373475	4120	Laguna
MIS-9	17/04/97	11 ^H 00	626893	7370964	4250	Manantial corriente

NUMERO	CEL	T	DS	PH	ALC	F	CL	Br	I	SO4	NO3	PO4	B	SI	AS	NH4	NA	K	LI	CA	MG
MIS-1	998	30	1,001	7,77	1,64	0,3	55,7	0,072	0,023	255	nd	nd	1,48	24,4	0,102	0,13	80,0	13,0	0,076	42,9	31,1
MIS-3	7200	9	1,004	8,56	3,05	7,1	1150	1,06	0,0088	1990	0,06	nd	24,0	47,0	1,99	0,07	1280	198	1,11	136	101
MIS-5	1020	22	1,000	8,89	1,66	1,9	137	0,109	0,012	175	nd	nd	4,12	30,8	0,202	0,45	157	29,2	0,125	23,7	3,50
MIS-8	7000	9	1,004	8,53	3,04	7,2	1210	0,983	0,0075	1990	0,06	nd	24,3	47,3	2,14	0,09	1300	198	1,14	136	102
MIS-9	292	19	1,000	7,61	0,356	na	3,16	0,029	na	108	1,3	na	0,27	28,6	0,003	na	11,5	4,26	0,005	33,2	5,76

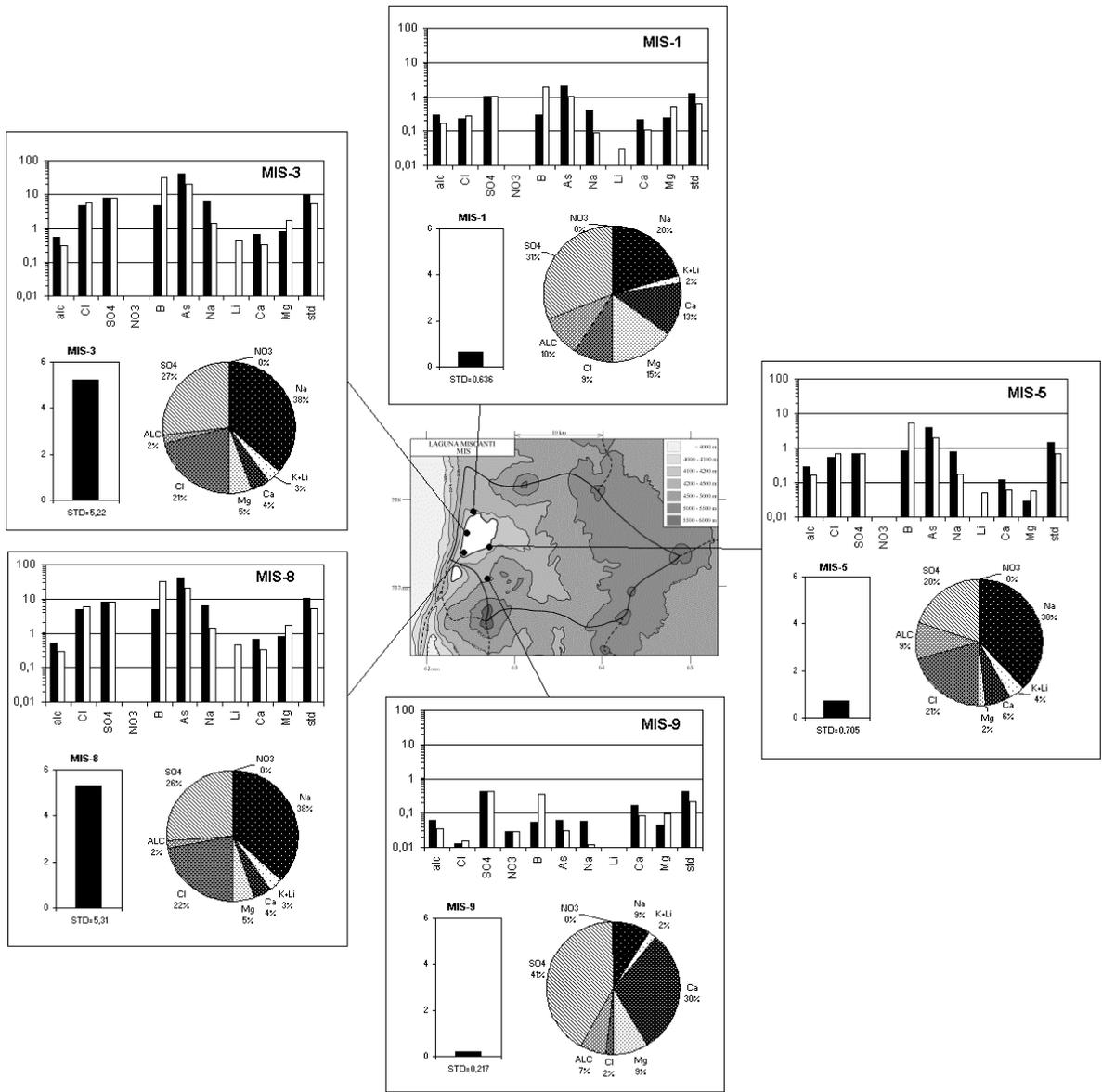
T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l.

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

NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF. %
MIS-1	635,6	97,0	0,84	2,2	8,530	8,549	0,2
MIS-3	5224	146	6,24	0,62	75,91	77,24	1,7
MIS-5	705,2	76,3	4,68	0,15	9,097	9,259	1,8
MIS-8	5308	148	5,88	0,70	77,09	78,83	2,2
MIS-9	217,2	21,2	0,06	0,84	2,738	2,706	1,2

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

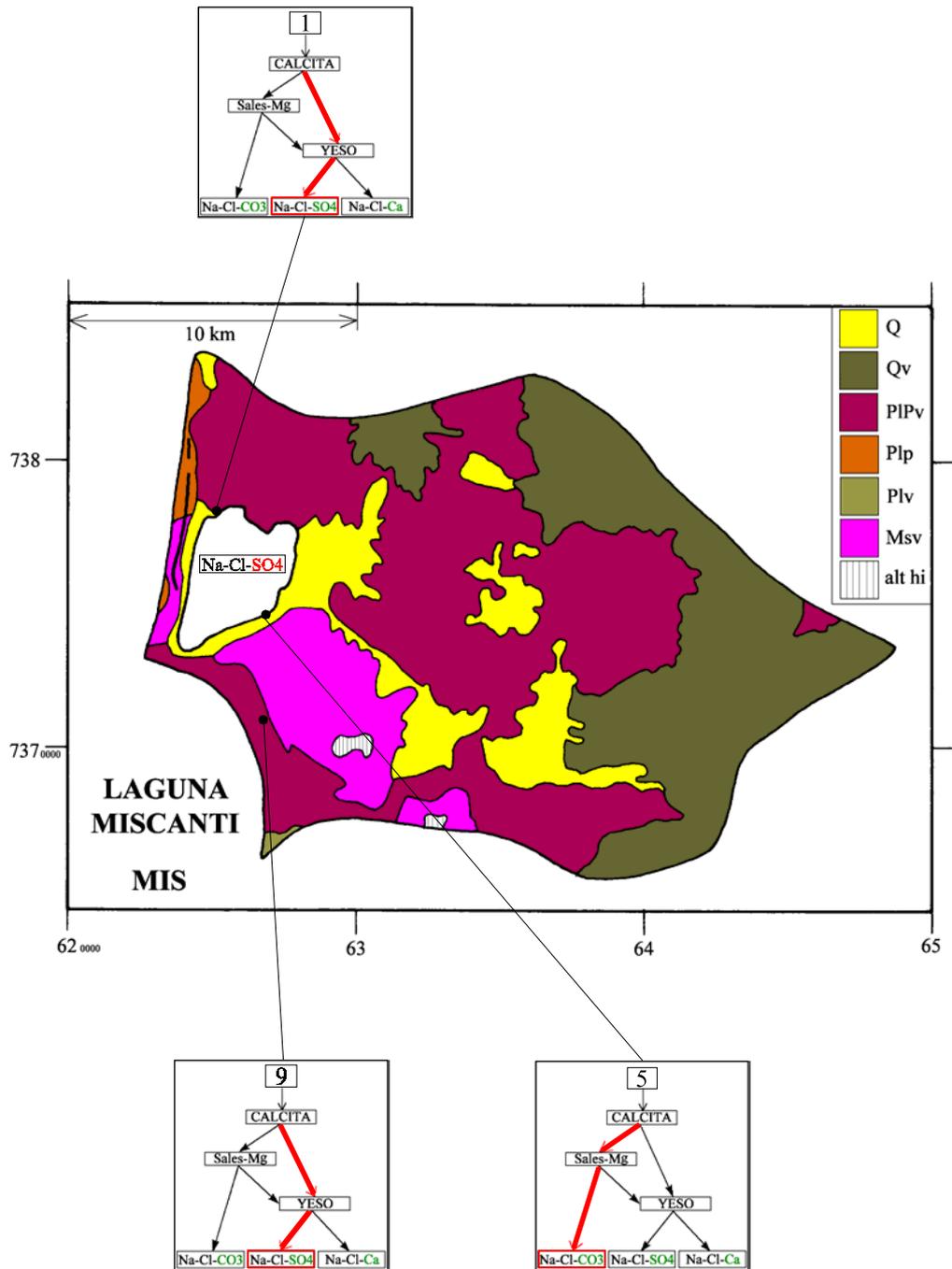
S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l); DIF.% = diferencia en %



MAPA GEOLOGICO Y VIAS EVOLUTIVAS

MIS

- Q** : *Cuaternario*. Depósitos aluviales: gravas, arenas y limos.
- Qv** : *Cuaternario*. Estrato-volcanes IV. Dacitas y andesitas de piroxeno, andesitas de hornblenda y/o biotita, basaltos y andesitas basálticas subordinadas.
- PIPv** : *Plioceno - Pleistoceno*. Andesitas de piroxeno, andesitas de hornblenda y/o de biotita y dacitas, basaltos y andesitas basálticas subordinados.
- Plp** : *Plioceno*. Ignimbrita Patao. Toba dacítica de vidrio y escasos pómez y cristales.
- Plv** : *Plioceno*. Estrato-volcanes II. Andesitas de piroxeno y andesitas de hornblenda y/o biotita. Dacitas subordinadas.
- Msv** : *Mioceno sup.* Andesitas de piroxeno, subordinamente dacitas, andesitas de hornblenda y/o biotita, basaltos y andesitas basálticas.
- alt hi** : alteración hidrotermal.



LAGUNA MIÑIQUE

Introducción

La laguna Miñique se encuentra en el Altiplano de la II Región cerca del borde oriental de la cuenca del salar de Atacama. Hacia el sur un cordón de baja altura la separa del Callejón Varela, que podría haber sido una antigua vía de desagüe. Al norte su cuenca colinda con la cuenca de la laguna Miscanti, de la cual la separa un cordón de lavas de unos 1200 m de ancho. El portezuelo entre las dos cuencas es muy bajo. Generalmente los estudios asocian las dos lagunas en un solo sistema. La laguna salada Miñique se encuentra unos 10 metros más bajo que la laguna salobre Miscanti, por lo que se supone que las aguas de la laguna Miscanti se infiltran hacia la laguna Miñique. Las principales características morfométricas y climatológicas de la laguna Miñique son:

- altura: 4120 m
- superficie de la cuenca: 27,5 km²
- superficie de la laguna 1,6 km²,
- precipitaciones: 180 mm/año
- evaporación potencial: 1500 mm/año
- temperatura media: 2°C

Hemos extraído cuatro muestras. No se observa ningún aporte fluyente. Se ha encontrado solamente una vertiente difusa (6). Las aguas de laguna (1) y (3) fueron obtenidas en la misma orilla y el agua (8) un poco más adentro de la laguna.

Composición de las aguas

Presentamos en la figura 1 la composición de las aguas de la laguna Miñique y también de la laguna Miscanti.

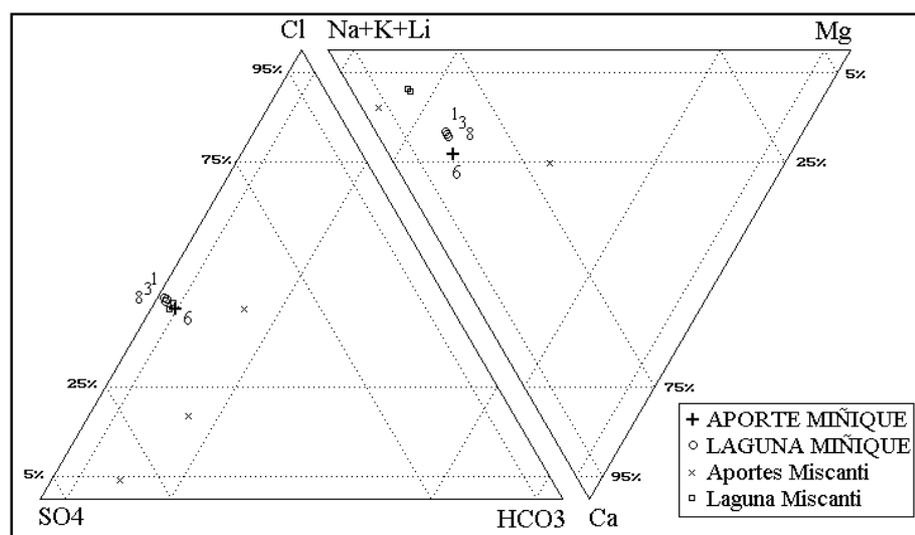
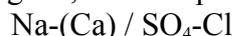


Fig.1 : Composición de las aguas de las lagunas Miñique y Miscanti.

Todas la aguas, vertiente y laguna, de Miñique tienen una composición homogénea:



La composición aniónica de sus aguas es rigurosamente la misma que la laguna Miscanti. No es así para los cationes. Las aguas de Miñique tienen más calcio que las de la laguna Miscanti. La salinidad del aporte difuso es de 3,7 g/l, un valor elevado que no corresponde a un agua de alteración de rocas volcánicas. No se observa en esta agua las relaciones de equimolaridad entre Na y Cl, Na+Ca y Cl, Ca y SO₄, Na y Cl+SO₄ que indican una redisolución de antiguas evaporitas o influencia de salmueras.

La ubicación de esta vertiente justo del otro lado del cordón de separación entre Miscanti y Miñique parece indicar que la vertiente proviene de infiltraciones de la laguna Miscanti. Sin embargo topamos con un problema : el calcio. No solamente las aguas de la laguna Miñique son más concentradas que Miscanti en Ca (136 mg/l), sino también el agua de la vertiente difusa (6) con una concentración de 254 mg/l Ca. La laguna Miscanti contiene solamente 136 mg/l Ca. En la tabla 1 presentamos las razones entre las concentraciones de la laguna Miscanti y de la vertiente difusa de Miñique. Se nota que todos los componentes, menos el calcio, están más diluidos en la vertiente que en la laguna. Por una parte, eso indica que la vertiente no proviene solamente de infiltraciones de la laguna Miscanti, sino de una mezcla entre el agua de la laguna y otra más diluida. Pero esta agua diluida debería tener una concentración excepcionalmente elevada en calcio.

NUMERO	ALC	CL	SO4	B	AS	NA	K	LI	CA	MG	STD
MIS-8	3,04	1210	1990	24,3	2,14	1300	198	1,14	136	102	5308
MIN-6	2,72	831	1400	14,8	0,996	761	79,8	0,666	254	82,6	3702
<i>razón</i>	<i>1,12</i>	<i>1,46</i>	<i>1,42</i>	<i>1,64</i>	<i>2,14</i>	<i>1,71</i>	<i>2,48</i>	<i>1,71</i>	<u>0,54</u>	<i>1,23</i>	<i>1,43</i>

MIS-8 : laguna Miscanti ; MIN-6 : vertiente difusa Miñique
 ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

Tabla 1 : Comparación del agua de la vertiente difusa de Meñique con el agua de la laguna Miscanti.

Es mucho más simple y probable que el agua de la vertiente difusa MIN-6 sea una mezcla entre un agua diluida y la salmuera de la laguna Miñique, es decir una cuña salina a dentro de una napa diluida que se descarga lentamente en la laguna. El mejor argumento que sostiene esta hipótesis es la casi perfecta similitud entre las concentraciones porcentuales de la vertiente y de la laguna (Fig.1).

Evolución cuantitativa de aguas

No disponemos entonces de ningún agua de aporte a la laguna Miñique, sino solamente de una mezcla entre una napa diluida y la laguna. La evaporación simulada del agua de la vertiente difusa produce una solución muy similar a la de la laguna (Tabla 2), lo que sugiere que la napa

alimentando la laguna por el nor-noreste de la cuenca constituye la alimentación principal de la laguna.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
<u>MIN-8</u>	8,43	3,04	2220	3620	38,1	44,5	1990	266	1,58	541	228	
MIN-6E	8,11	1,01	2230	3700	39,7	32,6	2060	214	1,79	546	222	0,016

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

Tabla 2 : Comparación del agua evaporada de la vertiente difusa con la laguna Miñique.

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

Esto es consistente con las observaciones de terreno. No hemos encontrado otro sector de la orilla donde las aguas sean más diluidas, lo que hubiera indicado un aporte en la cuña salina. Al contrario, las muestras (1) y (3), pegadas a las orillas sur y oeste son aún levemente más concentradas que la laguna (8).

Vía evolutiva y relación con la geología

La vertiente difusa sigue la vía evolutiva neutra sulfatada. Pero no sabemos cual vía sigue el agua de napa antes de mezclarse con el agua de la laguna. Lo único que podemos decir es que no hay discrepancia entre esta vía y la geología volcánica de la cuenca de drenaje. Miñique es una laguna sulfatada, un tipo muy común en terrenos volcánicos con presencia de azufre.

Calidad de agua

El agua de la vertiente difusa (6) carece de aptitud para uso potable o agrícola. Pero no se puede descartar la presencia de napas diluidas en el sector oriental de la cuenca.

Balace hídrico

No se puede aplicar las ecuaciones del balance hídrico puesto que desconocemos la composición de los aportes diluidos iniciales. Por otra parte, la concentración de la laguna no es muy elevada (~10 g/l STD) lo que impide despreciar las infiltraciones. Lo único que se puede estimar es el volumen *mínimo* de los aportes, que corresponde a una concentración nula de los componentes entrantes ($C_{ap} = 0$; agua destilada) :

$$V_{ap} = S(H_c - H_p) / (1 - C_{ap}/C_L) = S(H_c - H_p)$$

Con $S = 1,6 \times 10^6 \text{ m}^2$, $H_c = 1,5 \text{ m/año}$ y $H_p = 0,18 \text{ m/año}$ se obtiene

$$V_{ap} = 2\ 112\ 000 \text{ m}^3/\text{año} = 67 \text{ l/s}$$

Conclusiones

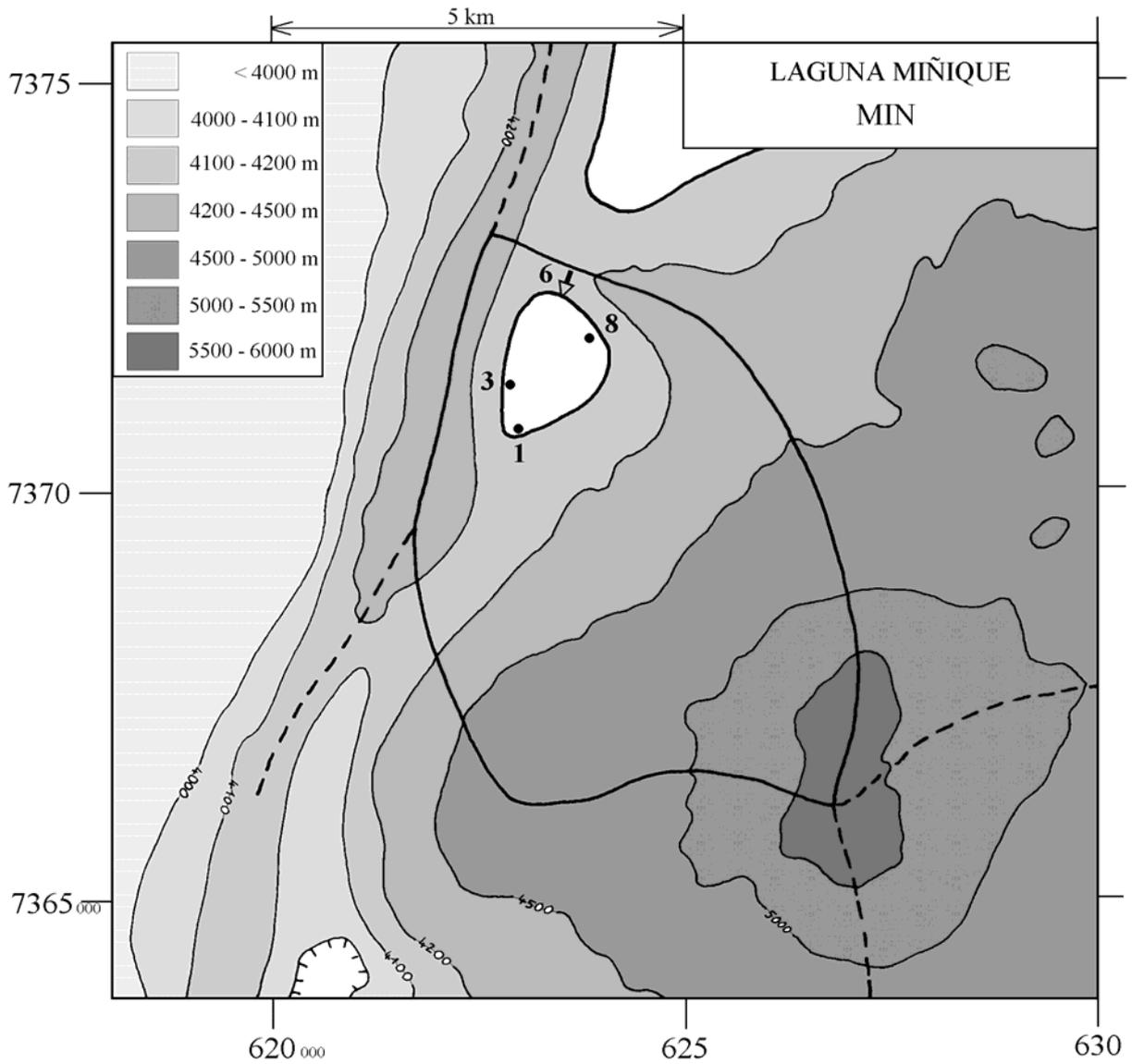
La laguna Miñique tiene una composición química de tipo Na-(Ca) / SO₄-Cl, con una proporción de calcio netamente más elevada que en la vecina laguna Miscanti que es de tipo Na / SO₄-Cl. La única alimentación encontrada es una vertiente difusa y salobre al norte del salar. La composición de este aporte no corresponde a la laguna Miscanti, especialmente en calcio. Concuenda mucho

más con la composición de la propia laguna Miñique, lo que sugiere que la vertiente difusa es la descarga de una napa diluida en la cuña salina de la laguna. El caudal entrante de la napa diluida es igual o superior a 67 l/s y proviene del este y noreste de la cuenca.

Referencias y estudios anteriores

Alonso, H. y Vargas, L. 1988. Hidroquímica de lagunas del Altiplano, Segunda Región. V Congreso Geológico Chileno, Santiago, 8-12 Agosto de 1988, Actas, tomo II, D35-D43.

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



**LAGUNA MIÑIQUE
MIN**

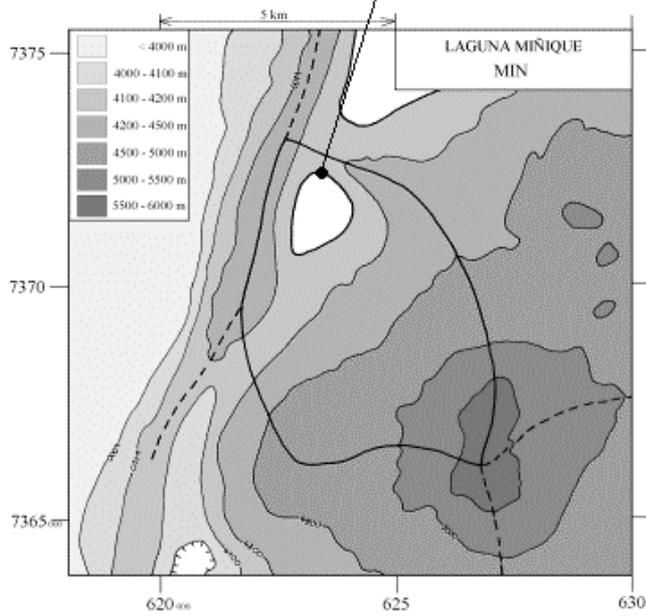
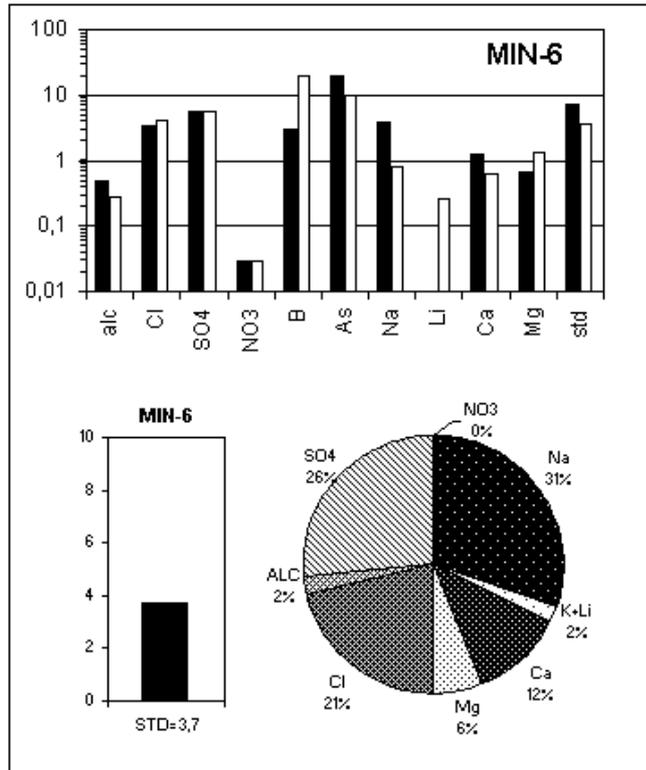
NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE	METROS	
MIN-1	14/10/93	12 ^H 00	623025	7370400	4120	Laguna
MIN-3	14/10/93	12 ^H 15	622675	7371450	4120	Laguna
MIN-6	14/10/93	13 ^H 00	623425	7372300	4122	Manantial difuso
MIN-8	14/10/93	13 ^H 30	623700	7371775	4120	Laguna

NUMERO	CEL	T	DS	PH	ALC	F	CL	Br	I	SO4	NO3	PO4	B	SI	AS	NH4	NA	K	LI	CA	MG
MIN-1	13380	14	1,009	8,67	2,18	3,2	2650	2,40	0,0223	4300	0,06	0,1	44,9	47,3	2,86	0,09	2390	315	1,89	602	270
MIN-3	12090	16,5	1,008	8,52	3,20	3,1	2380	1,93	0,0217	3840	nd	0,1	40,2	44,2	2,60	0,07	2130	294	1,72	561	240
MIN-6	4960	16	1,003	7,62	2,72	1,4	831	0,721	0,0253	1400	1	nd	14,8	34,4	0,996	nd	761	79,8	0,666	254	83
MIN-8	12040	13,5	1,008	8,43	3,04	2,9	2220	1,90	0,0127	3620	0,6	0,1	38,1	44,5	2,26	0,02	1990	266	1,58	541	230

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. %
MIN-1	10912	44,3	5,28	0,12	164,3	166,6	1,4
MIN-3	9874	118	10,4	0,44	148,3	150,5	1,5
MIN-6	3702	160	1,20	5,3	54,72	55,42	1,3
MIN-8	9279	127	8,22	0,66	139,4	141,2	1,3

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

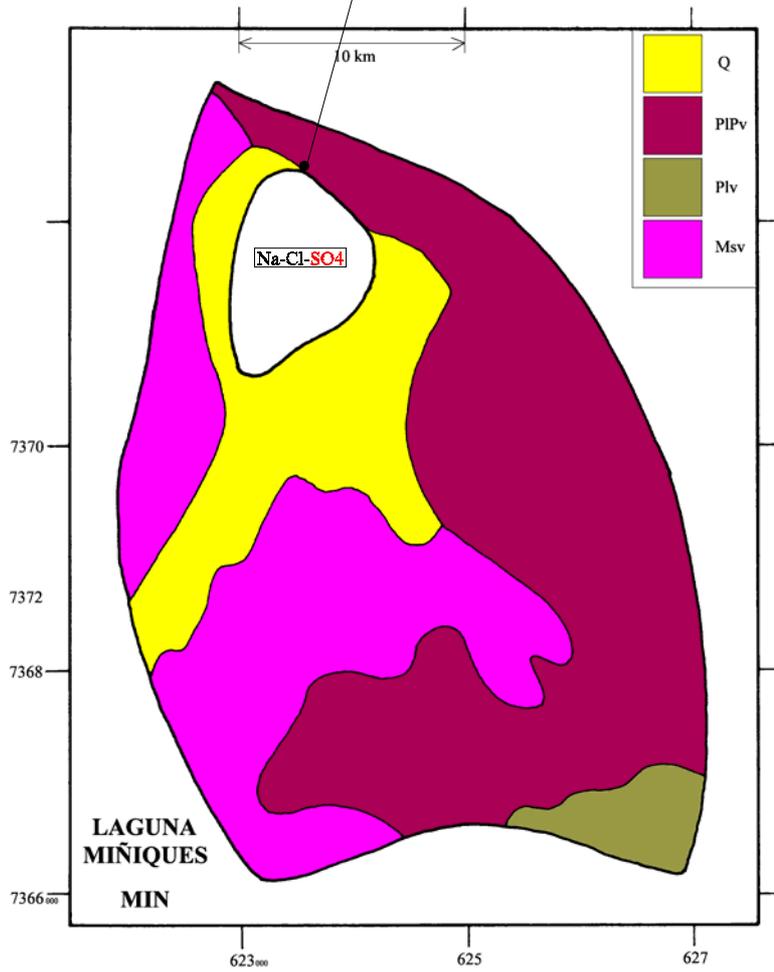
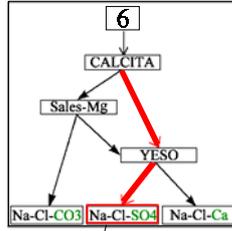
MIN

Q : *Cuaternario*. Depósitos aluviales: gravas, arenas y limos.

PIPv : *Plioceno - Pleistoceno*. Andesitas de piroxeno, andesitas de hornblenda y/o de biotita y dacitas, basaltos y andesitas basálticas subordinados.

PIv : *Plioceno*. Estrato-volcanes II. Andesitas de piroxeno y andesitas de hornblenda y/o biotita. Dacitas subordinadas.

Msv : *Mioceno sup.* Andesitas de piroxeno, subordinamente dacitas, andesitas de hornblenda y/o biotita, basaltos y andesitas basálticas.



SALAR DEL LACO

Introducción

El salar del Laco se encuentra en el rincón sureste del Altiplano de la II Región, delimitada por un anfiteatro de cerros y volcanes de alturas cercanas y sobre los 5000 m. Sus principales características morfométricas y climatológicas son:

- altura: 4250 m
- superficie de la cuenca: 306 km²
- superficie del salar: 16,2 km²
- superficie de las lagunas: 2,2 km²
- precipitaciones: 200 mm/año
- evaporación potencial: 1500 mm/año
- temperatura media: 1°C

Es un salar de tipo playa con una laguna poco profunda. Se obtuvieron tres aguas de aporte y una de laguna.

Composición de las aguas

Las composiciones de aguas del salar de Laco están presentadas en la figura 1 y en la tabla 1. Hemos sacado muestras de la laguna y de tres aportes : dos vertientes difusas y una napa

<u>APORTES</u>	<u>SALINIDAD</u> mg/l	<u>TIPO QUÍMICO</u>		<u>VIA EVOLUTIVA</u>
		Cationes	Aniones	
LAC-1	601	Na- (Ca) - (Mg)	Cl- (SO4) - (HCO3)	SO4 (N)
LAC-4	636	Na- (Ca) - (Mg)	Cl-SO4- (HCO3)	SO4 (N)
LAC-7	2076	Na- (Ca) - (Mg)	Cl- (SO4) - (HCO3)	SO4 (N)
<u>LAGUNA</u>				
LAC-5	24433	Na- (Ca) - (Mg)	Cl- (SO4)	SO4

Tabla 1 : Salinidades, tipos químicos y vías evolutivas de aguas del salar del Laco.
SO₄ (N) = vía neutra sulfatada.

Puesto que el agua de la laguna tiene mas sulfato que calcio (en meq), se puede clasificar el salar del Laco en el mega-grupo de salares sulfatados. Es difícil hacer correlaciones significativas entre los componentes con solamente tres aportes. Notamos primero que la salinidad y la composición de los aportes diluidos (1) y (4) pueden corresponder a aguas de alteración de rocas volcánicas con azufre. La salinidad mas alta de la vertiente difusa (7), que surge justo a la orilla

del salar, se debe o bien a la pre-evaporación de la napa diluida de aporte antes de escurrirse por la vertiente o a una cuña salina del salar. No se observa en el diagrama circular de LAC-7 equimolaridad entre Na y Cl o entre Na+Ca y Cl, dos indicios de redisolución de antiguas evaporitas o salmueras.

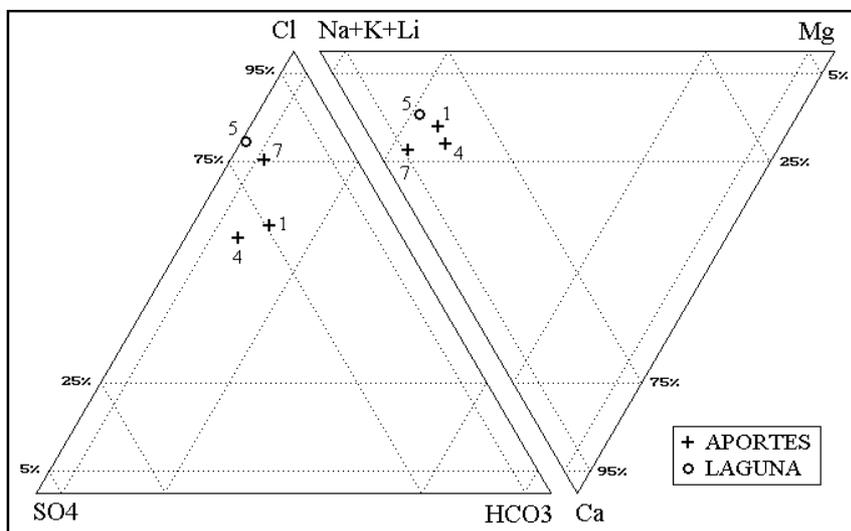


Fig.1 : Composición de las aguas del salar del Laco

Vía evolutiva y relación con la geología

Las tres aguas de aporte siguen al evaporarse la misma vía evolutiva neutra sulfatada. Esta vía caracteriza aguas que drenan rocas volcánicas con azufre (o mineralizaciones) o terrenos volcano-sedimentarios. No hay contradicción con lo que sabemos de la litología de la cuenca.

Evolución cuantitativa de aguas

La tabla 1 presenta la composición calculada de todas las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional (LAC-xE) hasta la salinidad de la laguna del salar (LAC-5EQ).

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
LAC-5.EQ	7,45	1,37	11400	3790	40,1	17,2	6460	571	9,16	1090	598	
LAC-4E	8,10	1,44	9110	6260	67,8	30,8	6290	661	8,29	687	762	0,117
LAC-7E	7,97	1,13	11500	3270	84,8	30,5	6410	1070	20,3	1130	318	0,216
LAC-1E	8,36	2,80	9700	5420	85,9	30,9	6760	722	9,25	202	794	0,304

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

El agua de la laguna, sobresaturada respecto a la calcita (CaCO₃), ha equilibrado su composición con este mineral. La napa de la orilla oeste es el agua cuya evaporación mejor se acerca a la composición de la laguna. Pero, se observa diferencias en SO₄ y Ca que sugieren otros aportes no

encontrados. Las diferencias en boro y silice no son significativas, siendo estos componentes removidos comunamente por arcillas y diatomeas, respectivamente.

Calidad de agua

Las dos aguas, napa y vertiente difusa, de la orilla oeste tienen calidad aceptable para el consumo humano, pero un exceso de boro para el riego. El agua de la vertiente difusa (7) no cumple ni con las normas de potabilidad ni con las de riego. Se nota en particular un fuerte exceso de arsénico: 15 veces por encima del límite de potabilidad. Si la interpretación de la salinidad elevada de la vertiente norte como una cuña salina o una pre-evaporación de napa de aporte diluida es correcta, podrían entonces encontrarse napas diluidas en el norte de la cuenca.

Balance hídrico

Se puede adelantar un orden de magnitud del balance hídrico de la laguna principal del salar. No tenemos datos sobre las variaciones de su superficie. La principal alimentación proviene del sector occidental del salar. Se utiliza el cloruro como elemento conservativo. Los parámetros del balance son:

- $H_c = 1,5 \text{ m/año}$
- $H_p = 0,2 \text{ m/año}$
- $S = 2,2 \text{ km}^2$
- $C_{ap} = 184 \text{ mg/l (LAC-4)}$
- $C_L = 11500 \text{ mg/l (LAC-5)}$

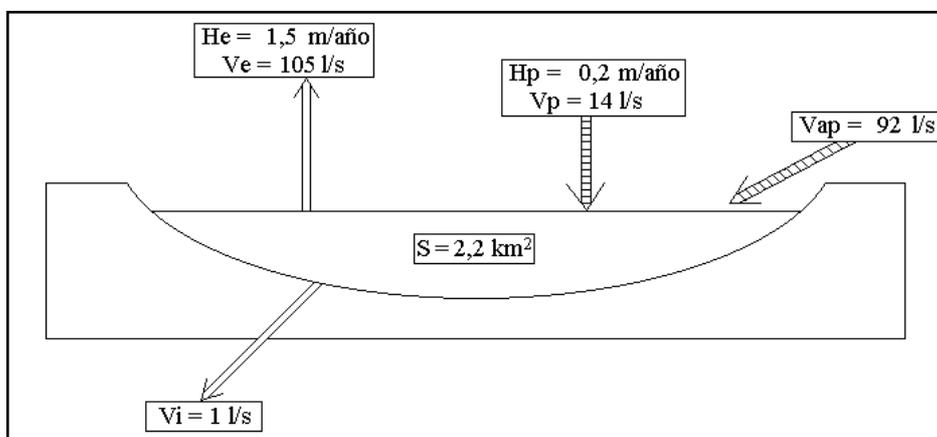


Fig.2 : Balance hídrico de la laguna del salar del Laco.

Se obtiene:

Volumen de aportes: $V_{ap} = S(H_c - H_p) / (1 - C_{ap}/C_L) = 2,9 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{año} = 92 \text{ l/s}$

Volumen de infiltraciones: $V_i = S(H_c - H_p) / (C_L/C_{ap} - 1) = 46800 \text{ m}^3/\text{año} = 1,5 \text{ l/s}$

Redondeamos en la figura 2 las infiltraciones a 1,0 l/s para no considerar decimales poco significativos. Puesto que no se ha encontrado vertientes fluyentes, toda la alimentación se hace por descarga de napa en la orilla del salar.

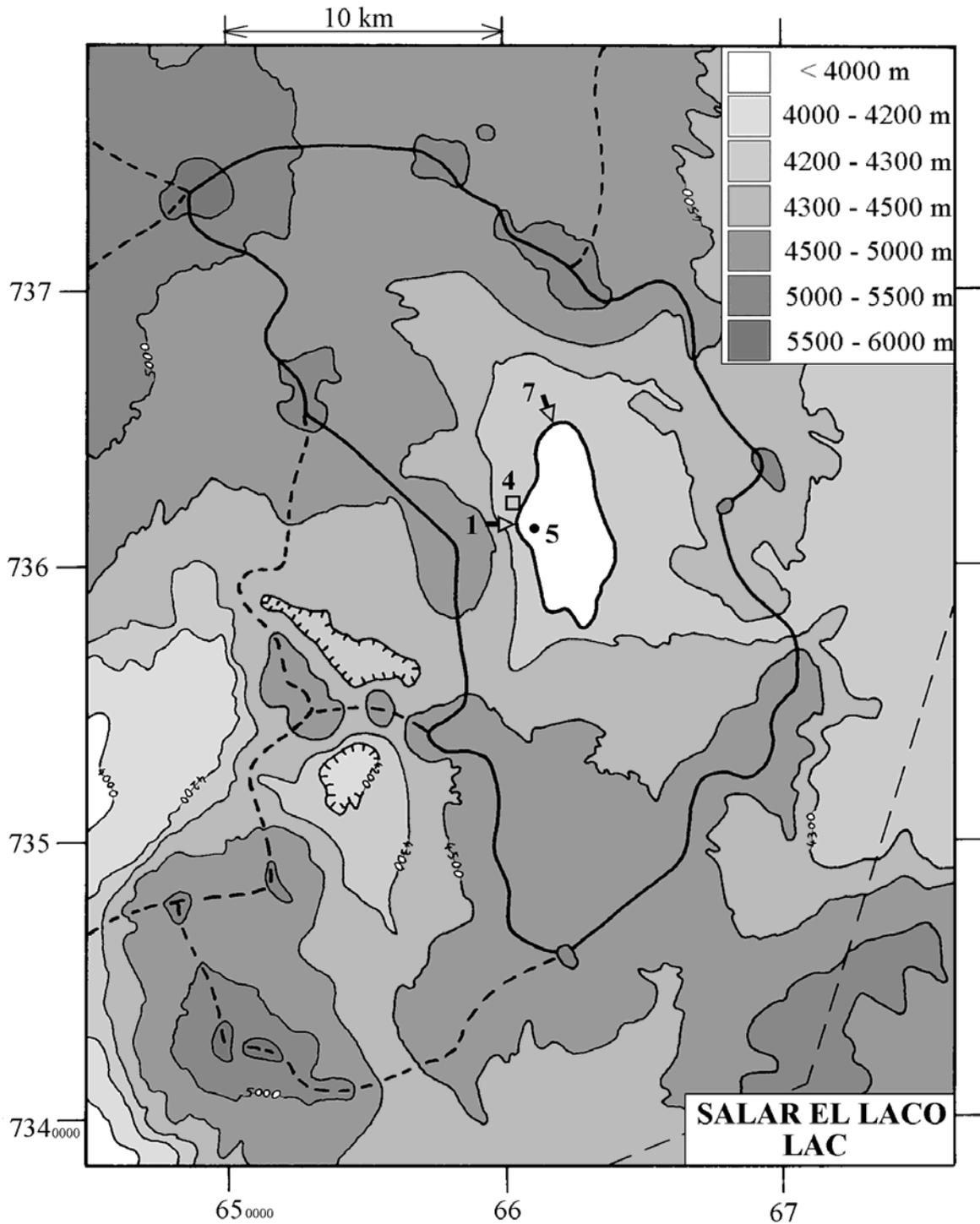
Conclusiones

El salar del Laco está alimentado por descarga de napas de aguas diluidas que siguen al evaporarse la vía neutra sulfatada sin discrepancia con la litología de la cuenca. El salar pertenece al grupo sulfatado cuyas salmueras están enriquecidas en sulfato en desmedro del calcio. Las aguas diluidas son de buena calidad. La cuenca de drenaje podría contener reservas interesantes de aguas diluidas.

Referencias y estudios anteriores

Alonso, H. y Vargas, L. 1988. Hidroquímica de lagunas del Altiplano, Segunda Región. V Congreso Geológico Chileno, Santiago, 8-12 Agosto de 1988, Actas, tomo II, D35-D43.

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



**SALAR EL LACO
LAC**

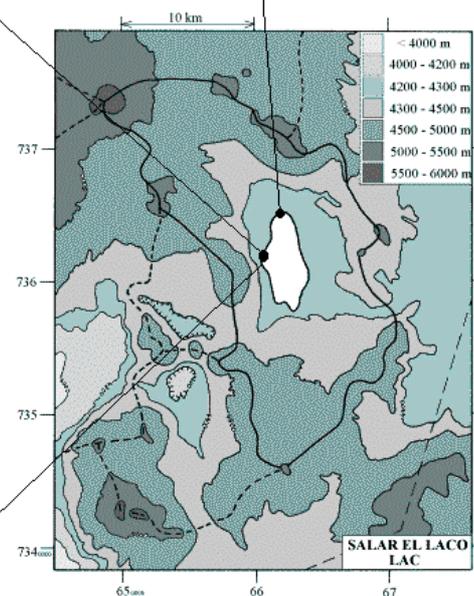
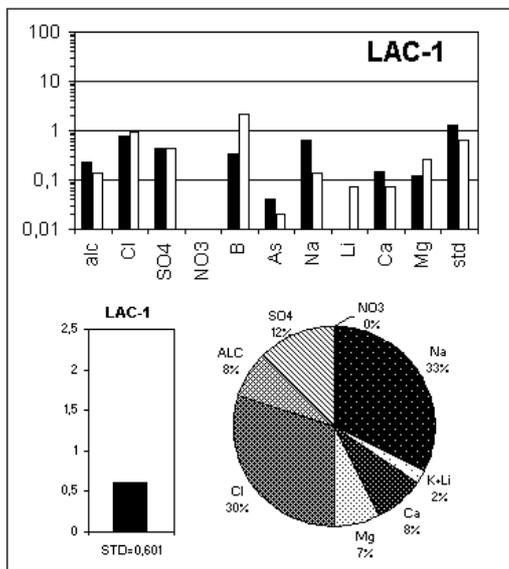
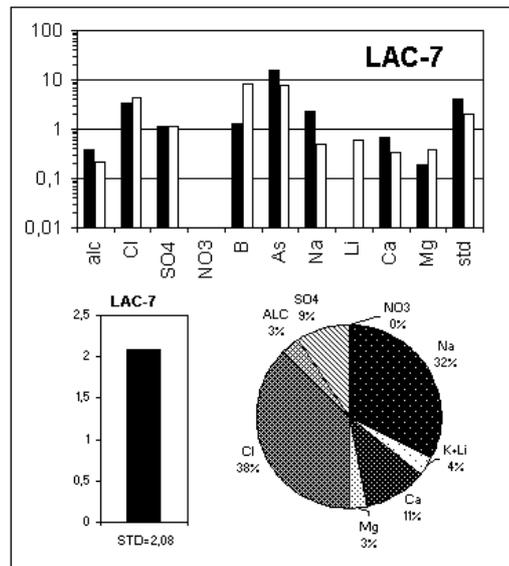
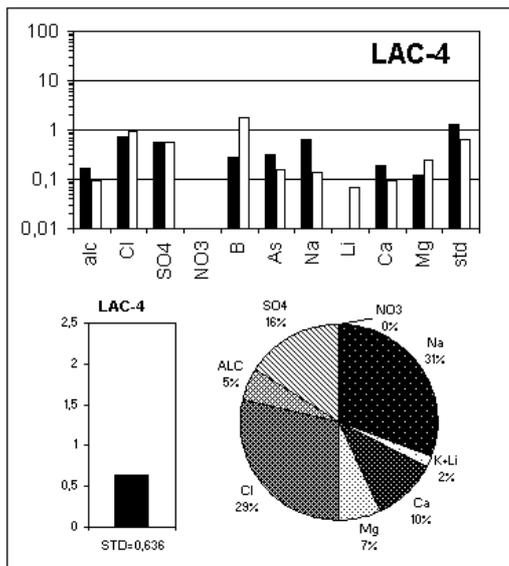
NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
LAC-1	13/10/93	12 ^H 30	660300	7361675	4251	Manantial difuso
LAC-4	13/10/93	13 ^H 00	660575	7362025	4250	Napa (cateo)
LAC-5	13/10/93	13 ^H 15	660950	7361425	4250	Laguna
LAC-7	13/10/93	13 ^H 50	661200	7364750	4252	Manantial difuso

NUMERO	CEL	T	DS	PH	ALC	F	CL	Br	I	SO4	NO3	PO4	B	SI	AS	NH4	NA	K	LI	CA	MG
LAC-1	962	12	1,001	7,35	1,35	1,05	193	0,146	0,0046	106	0,1	nd	1,68	27,9	0,002	0,31	129	14,1	0,180	29,9	15,5
LAC-4	966	8	1,001	9,19	0,96	0,93	185	0,120	0,0058	138	nd	nd	1,36	28,3	0,016	0,07	125	13,3	0,167	37,7	15,3
LAC-5	32800	16,5	1,019	7,92	4,16	4,45	11500	3,57	0,231	3790	0,06	0,2	40,1	17,2	2,48	0,16	6350	571	9,16	1150	598
LAC-7	3240	18,5	1,002	8,34	2,14	0,97	859	0,468	0,0275	276	0,1	nd	6,25	38,6	0,786	0,07	462	79,0	1,49	140	23,4

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. %
LAC-1	601,0	81,7	0,12	6,2	8,799	9,039	2,7
LAC-4	635,8	40,4	4,1	0,05	8,938	9,110	1,9
LAC-5	24433	216	8,4	3,1	398,3	408,5	2,5
LAC-7	2076	116	3,7	0,75	31,23	32,16	2,9

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

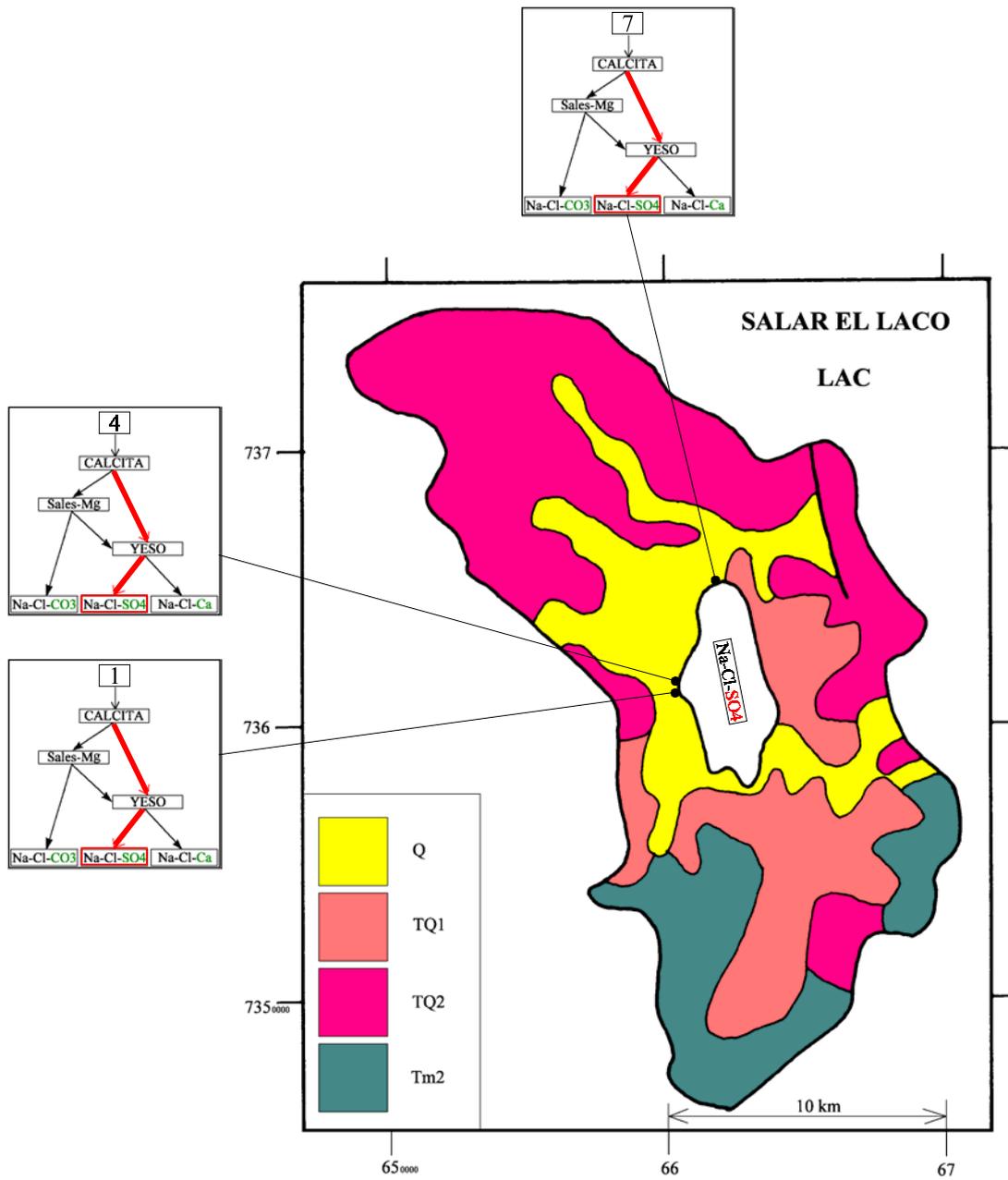
LAC

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.

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



LAGUNA TUYAJTO

Introducción

La laguna Tuyajto se encuentra en el sur del Altiplano de la II Región y constituye el nivel de base de una cuenca que colinda al oeste con la cuenca del salar Aguas Calientes 3. Sus principales características morfológicas y climatológicas son:

- altura: 4010 m
- superficie de la cuenca: 245 km²
- superficie de la laguna: 2,9 km²
- precipitaciones: 180 mm/año
- evaporación potencial: 1500 mm/año
- temperatura media: 1°C

La única alimentación visible es un río en bofedal con varias ramas que drenan el sector oriental de la cuenca de drenaje. Hemos extraído solamente dos muestras: el río y la laguna. Las interpretaciones son entonces muy preliminares.

Composición de las aguas

El agua del río tiene una salinidad elevada de 6,6 g/l STD. La laguna es una salmuera de 131 g/l STD. Los tipos químicos son (Fig. 1):

- río : Na-(Ca)-(Mg) / Cl-(SO₄)
- laguna Na-(Mg) / Cl-(SO₄)

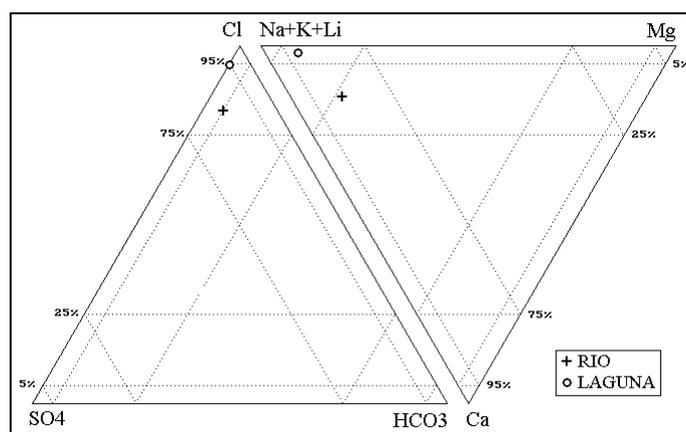


Fig.1. Composición de las aguas de la laguna Tuyajto

Para tener un indicio del origen de la alta salinidad del río, comparamos las concentraciones en miliequivalentes de cationes y aniones que forman las principales sales evaporíticas o tipos de salmueras que generalmente salinizan las aguas diluidas. Se ha obtenido :

- Na = 34,7 % Cl = 41,6 % (halita)
- Na+Ca = 41,7 % Cl = 41,6 % (salmueras Na-Ca / Cl)
- Na+Mg = 40,9 Cl = 41,6 % (salmueras Na-Mg / Cl)
- Ca = 7,0 % SO4 = 6,6 % (yeso)

Se nota que la mejor concordancia equimolar corresponde a una salinización por salmueras Na-Mg-Ca / Cl. Sin embargo, no se puede sacar conclusiones definitivas con un solo punto.

Evolución de aguas

El agua del río sigue la vía evolutiva neutra sulfatada lo que puede corresponder tanto a rocas sedimentarias como a rocas volcánicas con azufre. De todas maneras la alta salinidad del río indica claramente que su composición no proviene de la alteración de rocas volcánicas de la cuenca de drenaje. Lo que se puede notar es la buena concordancia entre la vía evolutiva del agua del río y la composición de la laguna Na-(Mg) / Cl-(SO₄).

La tabla 1 presenta la composición calculada del agua del río evaporada por simulación computacional hasta la salinidad de la laguna. La columna "desviación" da el coeficiente del chi-cuadrado adaptado que mide el grado de semejanza entre la solución evaporada y la solución real.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
<u>TUY-4</u>	7,42	7,00	75300	5530	95,8	32,5	44400	2210	33,7	930	2140	
TUY-1E	7,88	2,63	72300	9200	171	19,3	40600	2600	50,5	1670	3740	0,164

Tabla 1 : Comparación del agua evaporada del río con la laguna Tuyajto.
ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

La alcalinidad del agua calculada TUY-1E no incluye los boratos que entran efectivamente en la alcalinidad de la laguna. Observamos que la concentración de los componentes menores en la laguna, excepto la sílice, es netamente inferior a su concentración en el agua evaporada por computación. Las razones de las concentraciones para SO₄, B, K, Li, Ca y Mg son parecidas : entre 1,5 y 1,8. Esta discrepancia puede también interpretarse como un exceso de Na y Cl en la laguna. Eso sugiere fuertemente que la laguna ha sido enriquecida en cloruro de sodio reciclado. Sales eflorescentes cristalizan alrededor de la laguna por evaporación de napas subterráneas a través de los sedimentos cuaternarios. En época de lluvia estas sales constituidas esencialmente de halita (NaCl) son lixiviadas y aportadas a la laguna.

Calidad de aguas

En vista de su alta salinidad el agua del río no presenta ningún interés domestico o agrícola. Si su alta salinidad es efectivamente producto de una salinización por antiguas salmueras, la posibilidad de encontrar aguas muy diluidas un poco más arriba en la cuenca de drenaje no es muy alentadora.

Balance hídrico

La altura de evaporación de la laguna debe ser reducida en un 10 % debido a su alta salinidad. Se utiliza el cloruro como elemento conservativo. Los parámetros considerados son :

- $H_e = 1,35 \text{ m/año}$ (1,5 - 0,15)
- $H_p = 0,18 \text{ m/año}$
- $S = 2,9 \text{ km}^2$
- $C_{ap} = 3161 \text{ mg/l}$
- $C_L = 75\,300 \text{ mg/l}$

Volumen de aporte : $V_{ap} = S(H_e - H_p) / (1 - C_{ap} / C_L) = 3\,540\,000 \text{ m}^3/\text{año} = 112 \text{ l/s}$

Volumen de infiltraciones : $V_i = S(H_e - H_p) / (1 - C_L / C_{ap}) = 150\,000 \text{ m}^3/\text{año} \sim 5 \text{ l/s}$

No se observó un caudal tan elevado de 112 l/s. Es probable que la laguna sea alimentada principalmente por una napa subterránea de composición similar a la del río, el cual sería simplemente un afloramiento de esta napa.

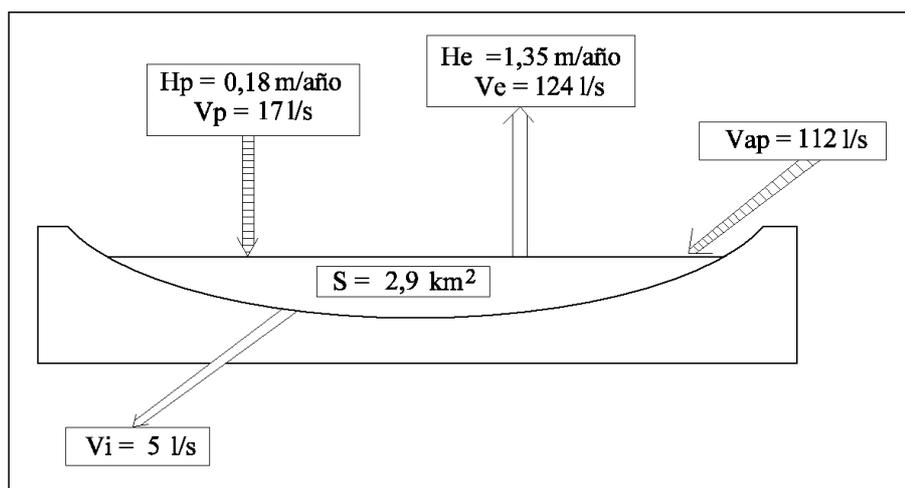
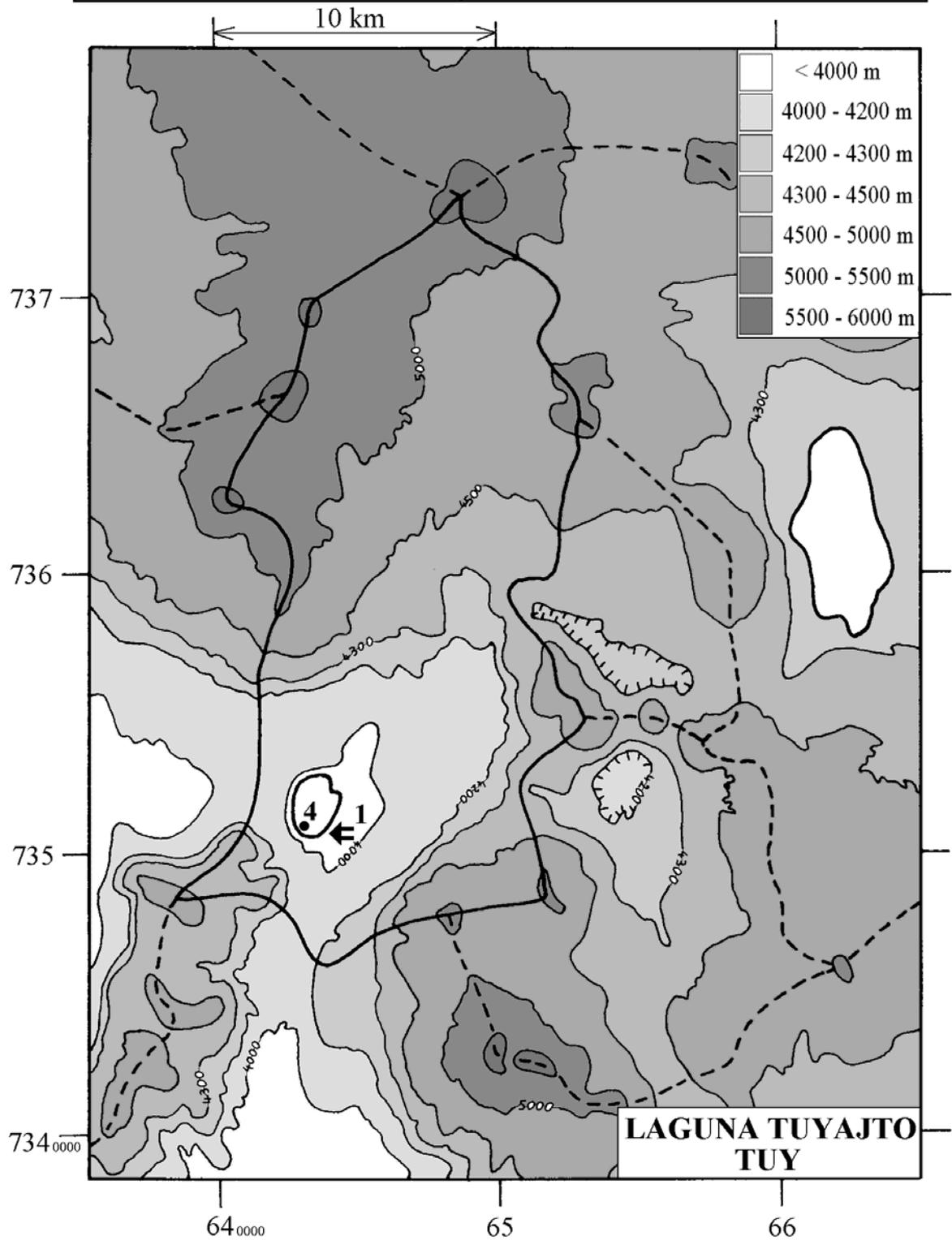


Fig.1 : Balance hídrico de la laguna Tuyajto

Conclusiones

Tenemos muy pocos datos para sacar conclusiones firmes. La cuenca de la laguna Tuyajto no parece presentar potencialidades alentadoras para recursos de agua, por lo menos cerca de la laguna donde las napas no son muy profundas. La única agua de aporte que hemos encontrado está salinizada, probablemente por antiguas salmueras de tipo Na-Mg-Ca / Cl de origen desconocido.

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



**LAGUNA TUYAJTO
TUY**

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
TUY-1	13/10/93	10 ^H 30	644250	7350525	3993	Río
TUY-4	13/10/93	11 ^H 00	643500	7350825	3990	Laguna

NUMERO	CEL	T	DS	PH	ALC	F	CL	Br	I	SO4	NO3	PO4	B	SI	AS	NH4	NA	K	LI	CA	MG
TUY-1	10070	1	1,005	7,27	5,59	0,76	3160	0,775	0,041	679	0,87	nd	7,33	41,4	0,482	0,23	1710	111	2,17	300	160
TUY-4	142500	3,5	1,088	7,42	7,00	1,6	75300	13,0	0,225	5530	0,87	0,7	95,8	32,5	4,91	na	44400	2210	33,7	930	2100

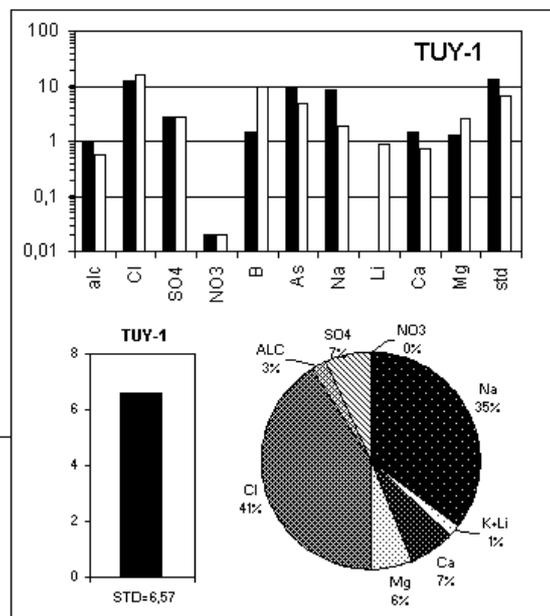
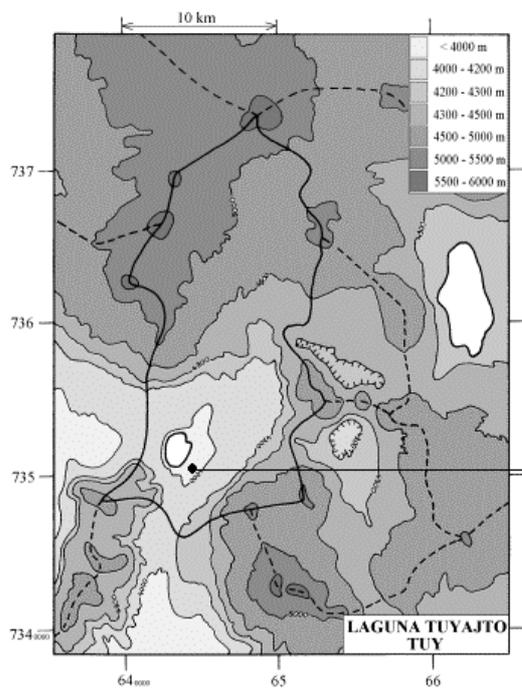
T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l.

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

NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF.%
TUY-1	6572	339	0,90	36	105,5	108,7	3,0
TUY-4	131204	388	7,56	20	2214	2242	1,3

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

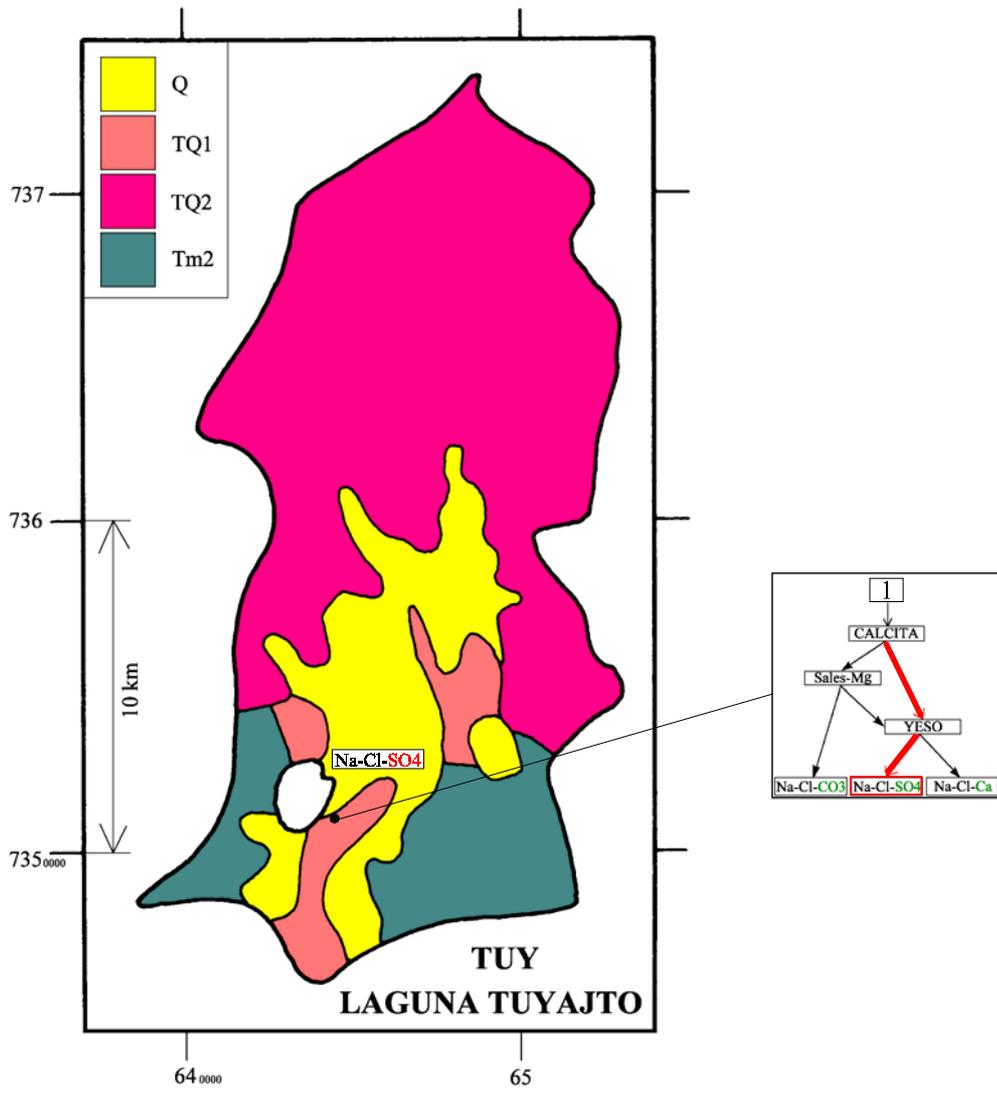
TUY

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.

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



SALAR DE AGUAS CALIENTES 3

Introducción

En el presente trabajo se denomina como salar de Aguas Calientes 3 al cuerpo salino, con una estrangulación central, que en mapas del IGM y del Sernageomín se designan separadamente como salar de Aguas Calientes la parte norte y salar de Talar la parte sur del estrechamiento. Es un salar de tipo playa con lagunas poco profundas de extensión variable.

- altura: 3950 m
- superficie de la cuenca: 476 km²
- superficie del salar: 46 km²
- superficie de las lagunas: 2-3 km²
- precipitaciones: 150 mm/año
- evaporación potencial: 1500 mm/año
- temperatura media: 1°C

En cada sub-salar se sacó muestras de una vertiente fluyente, de dos vertientes difusas y de una laguna.

Composición de los aportes y lagunas

Las composiciones de aguas del salar de Aguas Calientes 3 están presentadas en la figura 1 y en la tabla 1.

<u>APORTES</u>	<u>SALINIDAD</u> mg/l	<u>TIPO QUÍMICO</u>		<u>VÍA EVOLUTIVA</u>
		Cationes	Aniones	
AC3-7	2425	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl- (SO ₄)	SO ₄ (N)
AC3-14	2809	Na- (Mg) - (Ca)	/ Cl- (SO ₄) - (HCO ₃)	SO ₄ (N)
AC3-12	3988	Ca-Na- (Mg)	/ SO ₄ -Cl	SO ₄ (N)
AC3-1	5207	Na- (Mg) - (Ca)	/ Cl- (SO ₄)	SO ₄ (N)
AC3-10	8577	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl- (SO ₄)	Ca
AC3-13	10071	Na- (Mg) - (Ca)	/ Cl-SO ₄	SO ₄ (N)
<u>LAGUNAS</u>				
AC3-15	3792	Na- (Mg) - (Ca)	/ Cl- (SO ₄)	SO ₄
AC3-4	25032	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl- (SO ₄)	Ca

Tabla 1 : Salinidades, tipos químicos y vías evolutivas de aguas del salar de Aguas Calientes 3. SO₄ (N) = vía neutra sulfatada; Ca = vía cálcica.

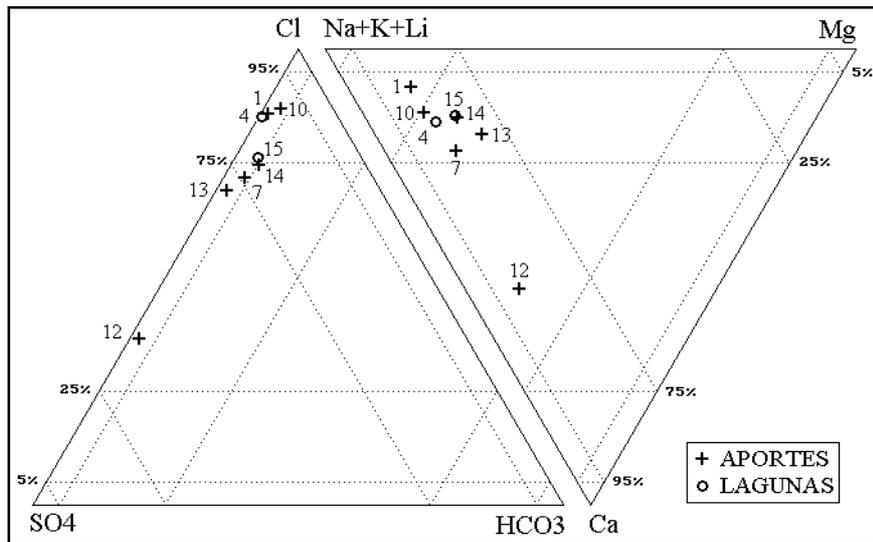


Fig.1 : Composición de las aguas de aporte y salmueras del salar de Aguas Calientes 3.

Observando el diagrama de aniones, se distingue tres tipos de aguas de aporte por su contenido en sulfato:

- AC3-1 y 10 de tipo Na-(Ca)-(Mg) / Cl-(SO₄)
- AC3-7, 13, 14 de tipo Na-(Ca)-(Mg) / Cl-SO₄
- AC3-12 de tipo Ca-Na / SO₄-Cl bien distinta de las demás.

Todos los aportes tienen una salinidad elevada que no corresponde a aguas de alteración de rocas volcánicas. Las menos concentradas son las dos vertientes fluyentes (2 - 3 g/l STD). Las vertientes difusas son más saladas (4 g/l hasta 10 g/l STD). El origen de la alta salinidad puede sugerirse de la figura 2.

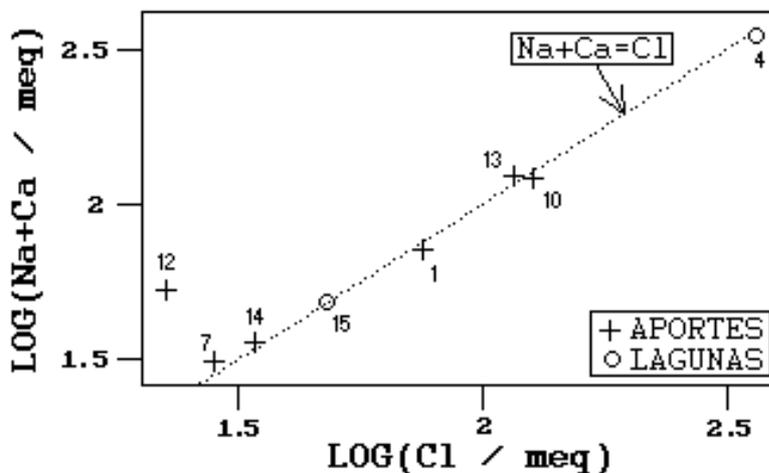


Fig.2 : Relación entre Na+Ca y Cl en las aguas de Aguas Calientes 3.

Con excepción de la vertiente (12), los puntos de todas las vertientes y lagunas se encuentran muy cerca de la recta de equimolaridad $Na+Ca = Cl$, lo que indica que la alta salinidad de los

aportes se debe a un mezcla de salmueras de tipo Na-Ca / Cl con napas diluidas de la cuenca de drenaje.

Hay un problema con el origen de las altas concentraciones en sulfato de las aguas de aporte. Se nota en la figura 3 una cierta correlación equimolar entre Ca y SO₄, lo que sugiere una redisolución del yeso (CaSO₄.2H₂O). Se observa también que la recta de regresión es paralela y muy cerca de la recta de equimolaridad Ca = SO₄. Además el coeficiente de correlación es elevado (0,95). Sin embargo, no se puede considerar conjuntamente un aporte de salmuera de tipo Na-Ca / Cl y una redisolución de CaSO₄. La concentración en Ca debería ser netamente superior a la de SO₄, puesto que Ca proviene de dos fuentes y SO₄ de una solamente. La buena correlación entre Ca y SO₄ podría tener otro origen que la redisolución del yeso. El problema queda pendiente.

El agua de la vertiente (12) presenta concentraciones equimolares en Na y Cl, lo que sugiere una redisolución de halita (NaCl). Las concentraciones más altas de las vertientes difusas puede provenir de una mezcla con la cuña salina o de la pre-evaporación de las napas antes de descargarse en las orillas del salar.

Composición de las lagunas

Las dos muestras de lagunas tienen las siguientes salinidades y composiciones :

- laguna (4) es de tipo Na-(Ca)-(Mg) / Cl-(SO₄) con salinidad de 25 g/l
- laguna (15) de tipo Na-(Ca)-(Mg) / Cl-SO₄ con salinidad de 3,8 g/l

Laguna (15) es salobre y menos concentrada que todas las vertientes difusas. Las dos lagunas no parecen tener composiciones porcentuales muy diferentes : un poco más sulfato en (15) que en (4). Sin embargo, esta pequeña diferencia es fundamental : laguna (4) contiene más Ca que SO₄, al contrario de laguna (15) que tiene más SO₄ que Ca. Al seguir evaporandose estas soluciones, se obtiene salmueras drásticamente distintas :

- salmuera de tipo Na-Ca / Cl para AC3-4
- salmuera de tipo Na / Cl-SO₄ para AC3-15

Desarrollaremos este punto en el paragrafo sobre las vías evolutivas.

Vías evolutivas y relación con la geología

Todas las aguas de aporte siguen la vía evolutiva neutra sulfatada, excepto AC3-10 que sigue la vía cálcica. Presentamos dos trayectos evaporatorios típicos en la figura 3.

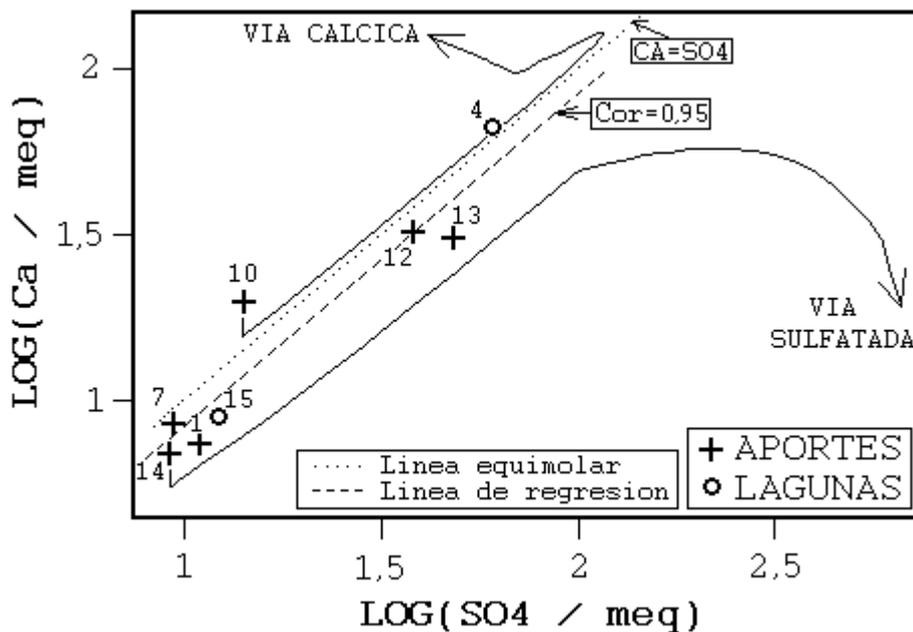


Fig.3 : Relación entre Ca y SO₄ en las aguas de Aguas Calientes 3.

Las altas salinidades de los aportes inducen a buscar terrenos sedimentarios con sales evaporíticas, los que no existen en la superficie de la cuenca. La vía evolutiva neutra sulfatada puede corresponder igualmente a terrenos sedimentarios o volcánicos con azufre. La vía cálcica discrepa con la geología volcánica de la cuenca. Otra discrepancia es la composición de la laguna norte (4) de tipo Na-Ca / Cl, mientras que sus aportes más cercanos (1 y 7) siguen la vía evolutiva sulfatada. Eso sugiere que la principal alimentación de la laguna norte proviene de la vertiente (10) más distante, pero que sigue la vía cálcica.

Evolución cuantitativa de aguas

Veamos ahora la evolución cuantitativa de las aguas de aporte cuando se evaporan. La tabla 1 presenta la composición calculada de las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta la salinidad de las aguas (4) y (15) de lagunas. Para la laguna salobre (15), se considera solamente los aportes más diluidos. Las aguas de las lagunas son muy sobresaturadas en calcita. Por eso hemos recalculado la composición de estas soluciones una vez llevadas al equilibrio después de precipitar la calcita. 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 (AC3-xxE) y la solución real equilibrada (AC3-xx.EQ).

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
AC3-4.EQ	8,18	0,942	4410	679	9,60	28,6	2370	153	2,78	312	202	
AC3-10E	8,16	0,875	4450	685	9,69	28,8	2390	154	2,80	313	204	0,00007
AC3-1E	8,25	1,13	4230	854	15,3	32,4	2400	241	3,22	213	202	0,065
AC3-7E	8,07	0,779	3570	1650	18,7	32,4	1950	225	2,00	522	231	0,174
AC3-14E	8,19	1,13	3780	1390	31,5	32,5	2120	159	7,54	296	301	0,267
AC3-12E	8,03	0,683	2730	2660	12,7	32,5	1660	190	1,86	682	261	0,267
AC3-15.EQ	8,30	1,17	1670	589	13,2	29,4	931	68	3,19	147	128	
AC3-14E	8,29	1,12	1690	619	14,0	33,1	944	71	3,36	144	134	0,003
AC3-7E	8,17	0,834	1590	738	8,38	33,0	870	101	0,89	243	103	0,197

Tabla 1 : Comparación de las aguas de aporte evaporadas con las de lagunas AC3-4 y AC3-15 del salar de Aguas Calientes 3. ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

Tenemos una concordancia excepcional entre las aguas de las lagunas y algunos de sus aportes. La laguna norte recibe aparentemente toda su agua de la vertiente difusa (10). Las vertientes (1) y (7), más cerca de la laguna, no parecen tener influencia sobre su composición. La concordancia es tan buena que podemos preguntarnos si la relación no es inversa y cabe la pregunta: ¿ Acaso lo que tomamos por una vertiente difusa (AC3-10) no sería una salida de agua desde salar ? (tal caso ocurre en Coposa). Hay un argumento en contra de esta hipótesis. La laguna tiene una composición de tipo cálcico. El principal aporte a la laguna debe entonces seguir la vía calcica al evaporarse. AC3-10 es la única agua que sigue tal vía ; las dos otras vertientes (1 y 7) siguen la vía neutra sulfatada por lo que no pueden constituir aportes mayores a la laguna.

También aparece un problema en la laguna sur. Su alimentación proviene obviamente de la vertiente fluyente (14). Aquí no hay ninguna duda sobre el movimiento de las aguas. Pero existe una vertiente difusa más cerca a la laguna (AC3-13) cuya salinidad es 3 veces más elevada. No sabemos cual es la relación entre esta vertiente y la laguna.

Calidad de agua

No hemos encontrado ningún agua de calidad aceptable para uso potable o agrícola, ya que todas sobrepasan ampliamente las normas respectivas. Como hemos visto que la alta salinidad de los aportes se debe en gran parte a la redisolución de antiguas salmueras o evaporitas, la posibilidad de encontrar aguas muy diluidas un poco más arriba en la cuenca de drenaje no es muy alentadora.

Balace hídrico

La buena identificación de los aportes de cada laguna debería permitir establecer los balances hídricos de las dos lagunas estudiadas. Se utiliza el cloruro como elemento conservativo. Los parámetros considerados son :

- Laguna norte :

- $H_e = 1,5$ m/año
- $H_p = 0,15$ m/año
- $S = 1,4$ km²
- $C_{ap} = 4470$ mg/l (AC3-10)
- $C_L = 12800$ mg/l (AC3-4)

- Laguna sur

- $H_e = 1,5$ m/año
- $H_p = 0,15$ m/año
- $S = 0,8$ km²
- $C_{ap} = 1210$ mg/l (AC3-14)
- $C_L = 1700$ mg/l (AC3-15)

Laguna norte :

Volumen de aporte : $V_{ap} = S(H_e - H_p)/(1 - C_{ap}/C_L) = 2\,900\,000$ m³/año = 92 l/s

Volumen de infiltraciones : $V_i = S(H_e - H_p)/(1 - C_L/C_{ap}) = 1\,000\,000$ m³/año = 32 l/s

Laguna sur :

Volumen de aporte : $V_{ap} = S(H_e - H_p)/(1 - C_{ap}/C_L) = 3\,750\,000$ m³/año = 119 l/s

Volumen de infiltraciones : $V_i = S(H_e - H_p)/(1 - C_L/C_{ap}) = 2\,700\,000$ m³/año = 85 l/s

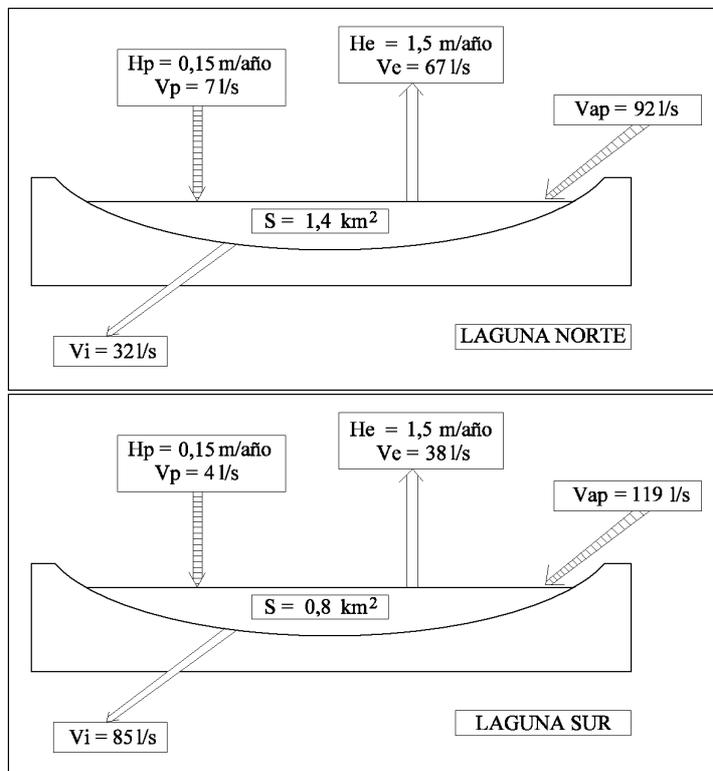


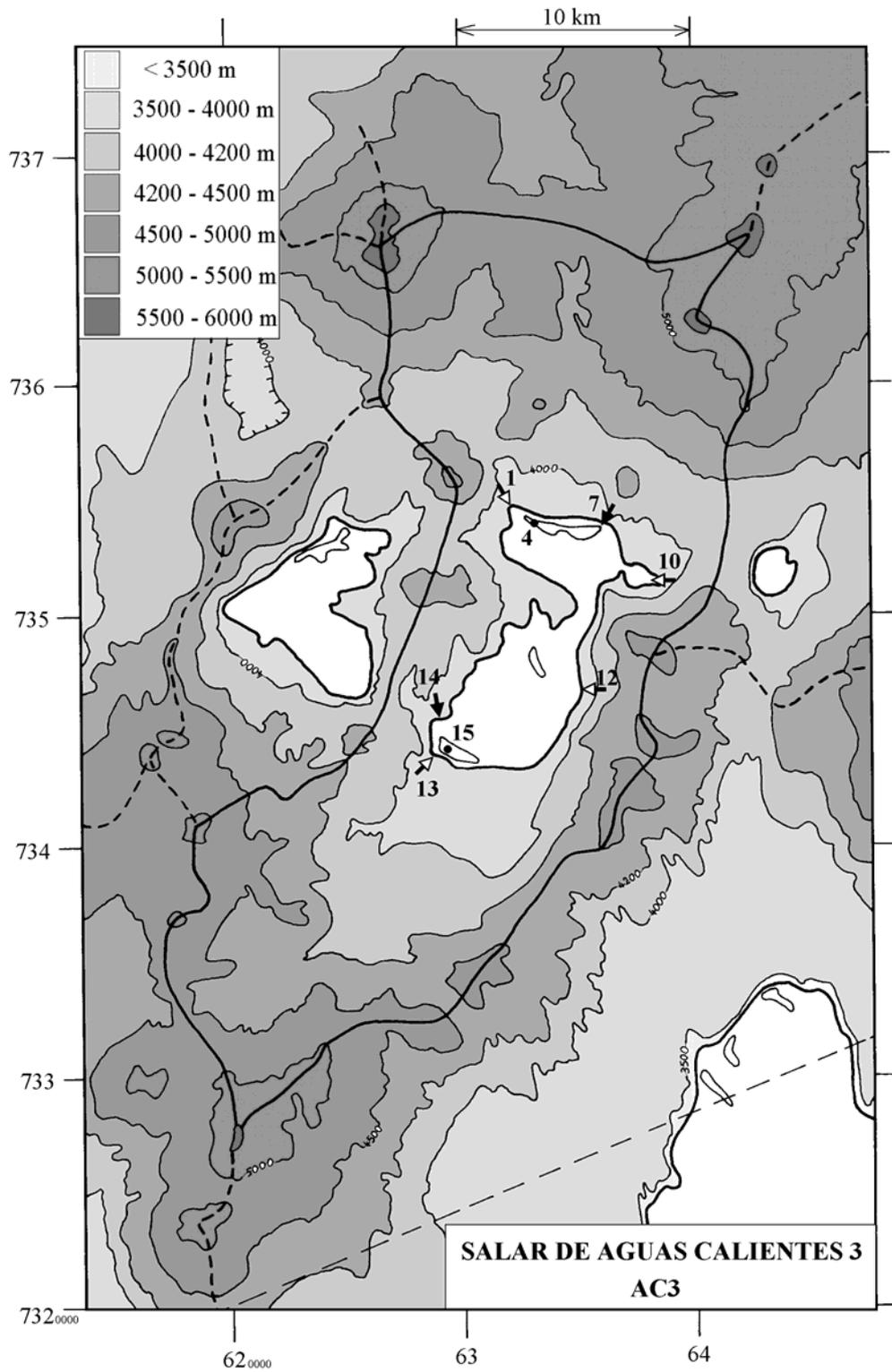
Fig.4 : Balance hídrico de dos lagunas del salar de Aguas Calientes 3

Caudales de aportes de 92 l/s para la vertiente difusa AC3-10 y 119 l/s para la vertiente fluyente AC3-14 no fueron observados en terreno. Es posible que las superficies de las lagunas utilizadas en los cálculos no correspondan al equilibrio, sino a su máxima extensión después de la época de lluvia. Las tasas de infiltración son muy elevadas, en particular en la laguna sur. Para comprobar todos estos valores sería necesario una investigación más detallada.

Conclusiones

El salar de Aguas Calientes 3 presenta varios problemas. El origen de la alta salinidad no es totalmente clara. Se observa una salinización por salmueras cálcicas de tipo Na-Ca / Cl, como en los salares de Ascotán, Carcote y Aguas Calientes 1; pero se sospecha también una redisolución de yeso. Sin embargo, si estas dos fuentes fuesen los principales aportes en Na, Ca, Cl y SO₄, no se observaría las relaciones equimolares entre Na+Ca y Cl de una parte, y Ca y SO₄ de otra parte. Existen probablemente varias napas con diferentes composiciones que se mezclan en el salar. Existen en las lagunas los dos tipos de soluciones evaporadas, cálcicas al norte y sulfatadas al sur. Otro problema es la casi perfecta igualdad, muy excepcional, entre la composición de las lagunas y uno de sus aportes, a pesar de que otros, de composición distinta, también alimentan las lagunas. Finalmente, los balances hídricos de las dos lagunas no parecen muy realistas. Se recomienda el estudio de este salar para alumnos que desearían adquirir una buena experiencia en este tema. En lo que se refiere a calidad de agua, no hay muchas posibilidades de encontrar aguas diludas en cantidades aprovechables en la cuenca de Aguas Calientes 3.

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



**SALAR DE AGUAS CALIENTES 3
AC3**

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
AC3-1	12/10/93	10 ^H 30	632350	7354925	3952	Manantial difuso
AC3-4	12/10/93	11 ^H 00	632875	7354250	3950	Laguna
AC3-7	12/10/93	11 ^H 45	636450	7353650	3951	Manantial corriente
AC3-10	12/10/93	12 ^H 30	638700	7351525	3960	Manantial difuso
AC3-12	12/10/93	13 ^H 15	635175	7346525	3952	Manantial difuso
AC3-13	12/10/93	14 ^H 30	628875	7343950	3952	Manantial difuso
AC3-14	12/10/93	15 ^H 00	628750	7345950	3955	Manantial corriente
AC3-15	12/10/93	18 ^H 30	629500	7344250	3950	Laguna

NUMERO	CEL	T	DS	PH	ALC	F	CL	Br	I	SO4	NO3	PO4	B	SI	AS	NH4	NA	K	LI	CA	MG
AC3-1	9600	9,5	1,004	7,73	1,40	0,91	2660	1,14	0,058	530	1,2	nd	9,49	26,0	0,040	0,23	1470	150	2,00	146	125
AC3-4	34400	5,5	1,019	7,89	2,95	2,66	12800	3,72	0,121	2910	0,50	0,2	29,5	45,9	2,44	0,49	6560	489	8,19	1340	651
AC3-7	3810	26,5	1,002	7,34	1,63	0,63	994	0,839	0,039	453	1,7	nd	5,15	48,2	0,078	0,04	524	61,8	0,548	172	63,4
AC3-10	13680	0	1,006	8,12	5,10	0,95	4470	1,02	0,025	679	nd	nd	9,60	28,6	1,16	0,18	2320	152	2,78	395	202
AC3-12	4920	13,5	1,003	8,00	1,18	2,32	792	0,337	0,073	1820	1,1	nd	3,68	36,1	0,506	0,32	483	55,1	0,541	642	75,8
AC3-13	13900	16	1,008	8,25	3,77	1,82	4120	3,2	0,127	2320	0,19	0,1	30,9	22,8	3,09	0,45	2150	171	8,33	610	399
AC3-14	4540	16	1,003	7,08	2,54	0,57	1210	1,09	0,043	440	2,7	0,2	9,98	40,6	0,698	0,16	662	50,4	2,39	138	95,3
AC3-15	6160	7	1,003	9,10	2,72	0,74	1700	1,46	0,059	588	0,06	0,1	13,2	37,5	0,861	0,31	911	68,0	3,19	178	128

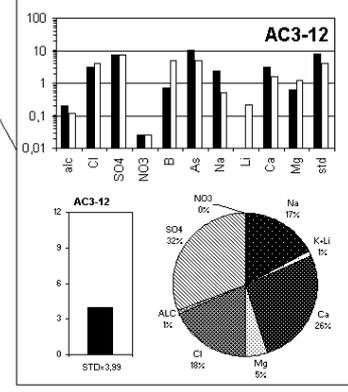
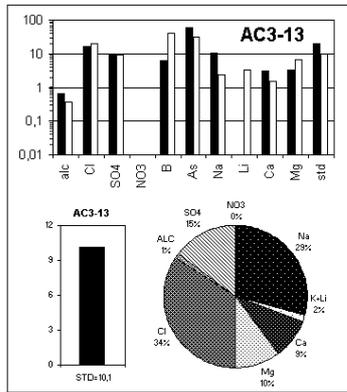
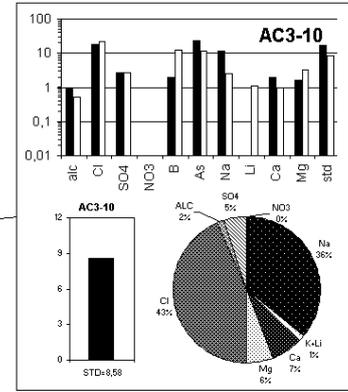
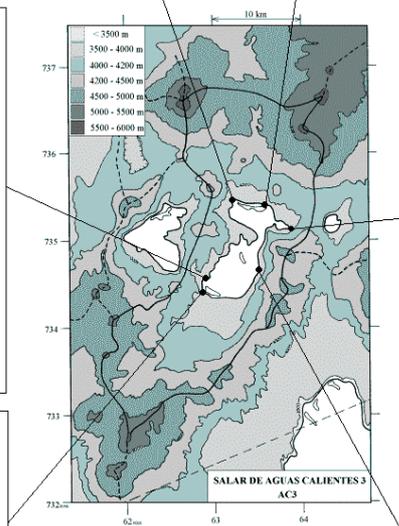
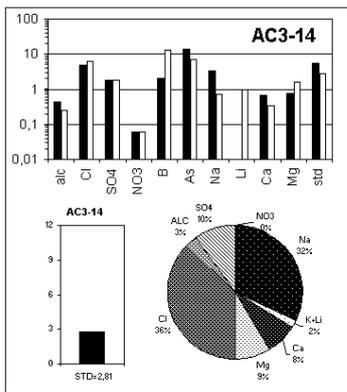
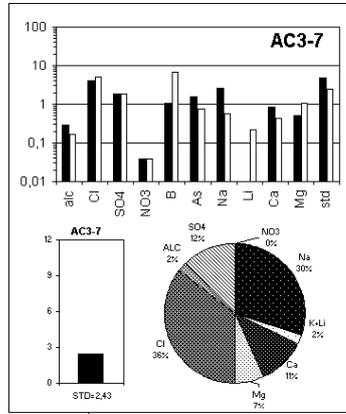
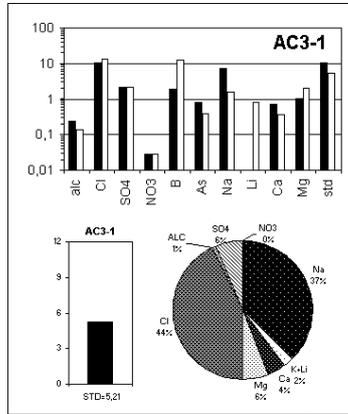
T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l.

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

NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF. %
AC3-1	5207	82,4	0,60	2,4	85,51	87,52	2,3
AC3-4	25032	158	4,62	3,2	419,1	424,8	1,3
AC3-7	2425	97,6	0,48	5,7	38,24	39,14	2,3
AC3-10	8577	295	6,18	4,4	141,6	145,3	2,6
AC3-12	3988	65,9	1,74	1,0	60,75	61,62	1,4
AC3-13	10071	182	10,9	1,3	162,3	168,3	3,6
AC3-14	2809	154	0,30	18	45,14	45,89	1,6
AC3-15	3792	93,9	16,6	0,1	61,22	63,04	2,9

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

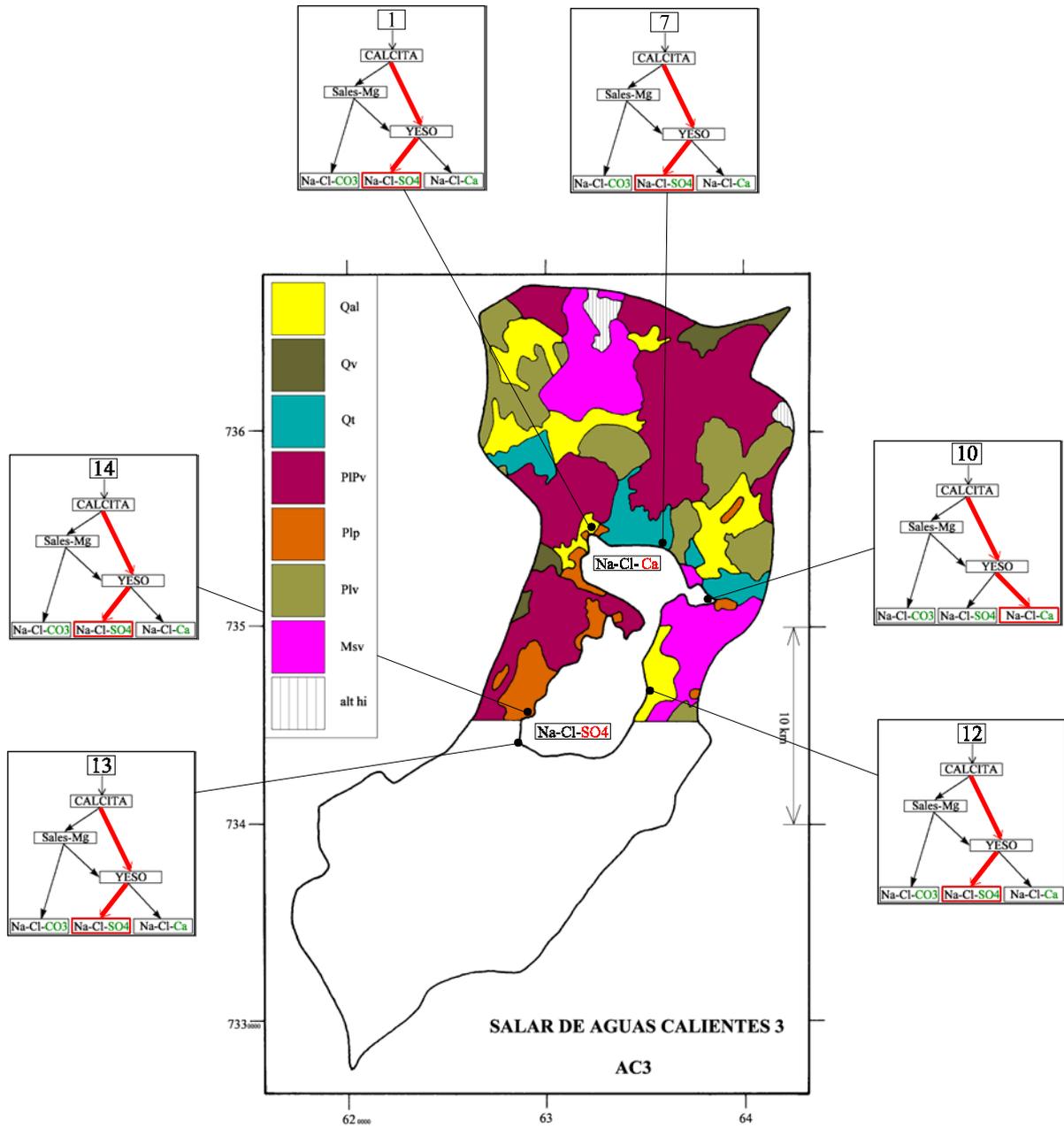
S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l); DIF% = diferencia en %



MAPA GEOLOGICO
Y
VIAS EVOLUTIVAS

AC3

- Qal** : *Cuaternario*. Depósitos aluviales: gravas, arenas y limos.
- Qv** : *Cuaternario*. Estrato-volcanes IV. Dacitas y andesitas de piroxeno, andesitas de hornblenda y/o biotita, basaltos y andesitas basálticas subordinadas.
- Qt** : *Cuaternario*. Ignimbrita Tuyajto. Tobas de cristales y vidrio.
- PIPv** : *Plioceno - Pleistoceno*. Andesitas de piroxeno, andesitas de hornblenda y/o de biotita y dacitas, basaltos y andesitas basálticas subordinados.
- Plp** : *Plioceno*. Ignimbrita Patao. Toba dacítica de vidrio y escasos pómez y cristales.
- Plv** : *Plioceno*. Estrato-volcanes II. Andesitas de piroxeno y andesitas de hornblenda y/o biotita. Dacitas subordinadas.
- Msv** : *Mioceno sup.* Andesitas de piroxeno, subordinadamente dacitas, andesitas de hornblenda y/o biotita, basaltos y andesitas basálticas.
- alt hi** : alteración hidrotermal.



SALAR DE CAPUR

Introducción

El salar de Capur se encuentra al sur del Altiplano de la II Región hacia el oeste del salar Aguas Calientes 3. Su cuenca colinda con la del salar de Atacama. A pesar de estar cercana a importantes rutas de comunicación, es un salar muy poco conocido por su difícil acceso, tanto para llegar a él como para rodearlo. Sus principales características morfométricas y climatológicas son:

- altura: 3950 m
- superficie de la cuenca: 137 km²
- superficie del salar: 27 km²
- superficie de las lagunas 0,9 km²
- precipitaciones: 150 mm/año
- evaporación potencial: 1500 mm/año
- temperatura media: 1°C

Es un salar de tipo playa con lagunas superficiales que no parecen variar mucho de extensión de un año al otro. Cuando lo visitamos, las lagunas tenían exactamente la misma forma y superficie que figuraban en el mapa topográfico IGM 1/50 000. Por dificultad de acceso, hemos podido solamente estudiar el sector norte, donde se encuentra el principal sistema lagunar y por consecuencia, también los principales aportes. Sin embargo, existen otras lagunas al sur.

Composición de las aguas

Las composiciones de aguas del salar de Capur están presentadas en la figura 1 y en la tabla 1. A lo largo de la orilla norte del salar surgen numerosas vertientes fluyentes de débil caudal (0,5-1 l/s) y con leve influencia termal ($t \sim 20^\circ\text{C}$). Hemos comprobado que todas tenían similares parámetros físico-químicos como temperatura, conductividad y pH. Por eso nos hemos limitado a muestrear dos vertientes alejadas entre sí unos 500 m (CPR-2 y 4); Después, hemos sacado un perfil de salmueras de concentración creciente en las lagunas.

<u>APORTES</u>	<u>SALINIDAD</u> mg/l	<u>TIPO QUÍMICO</u>		<u>VIA EVOLUTIVA</u>
		Cationes	Aniones	
CPR-4	6593	Na- (Mg) - (Ca)	/ Cl- (SO4)	Ca
CPR-2	6812	Na- (Mg) - (Ca)	/ Cl- (SO4)	Ca
<u>LAGUNAS</u>				
CPR-1	12320	Na- (Mg) - (Ca)	/ Cl- (SO4)	Ca
CPR-3	20553	Na- (Mg) - (Ca)	/ Cl- (SO4)	Ca
CPR-5	50991	Na- (Mg) - (Ca)	/ Cl	Ca
CPR-6	70256	Na- (Mg) - (Ca)	/ Cl	Ca
CPR-7	221806	Na- (Mg)	/ Cl	Ca

Fig.1. Composición de las aguas de aporte y de las lagunas del salar de Capur.

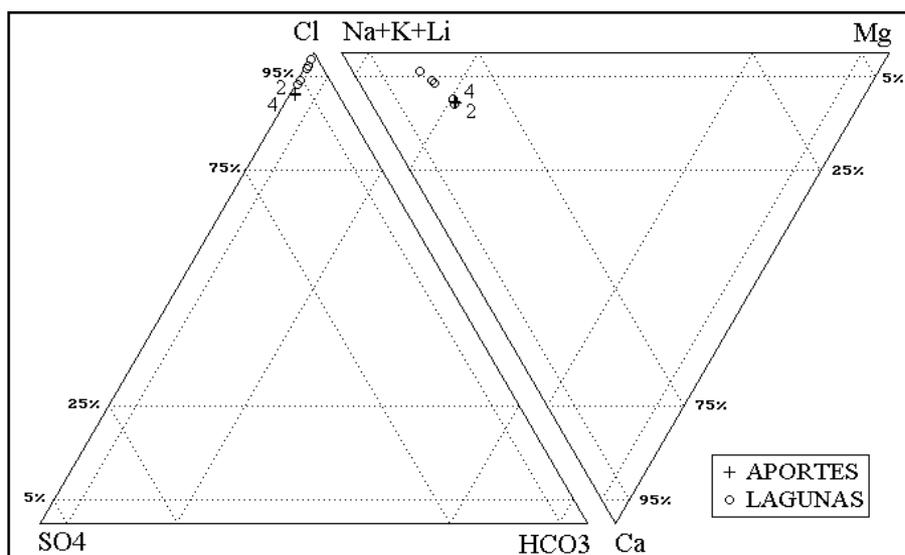


Tabla 1 : Salinidades, tipos químicos y vías evolutivas de aguas del salar de Capur.
Ca = vía cálcica.

Representamos en la figura 1 la composición química de todos los aportes y lagunas del salar de Capur. Las aguas de vertientes son saladas (6,5-7 g/l STD), de tipo Na-(Mg)-(Ca) / Cl. El sistema lagunar muestra una concentración salina creciente de las aguas hacia el sur (de 12 hasta 222 g/l STD). Las aguas menos saladas (1 y 3) son de tipo Na-(Mg)-(Ca) / Cl, mientras que las salmueras más concentradas tienen menor porcentaje de calcio y son de tipo Na-(Mg) / Cl. Se plantea ahora la pregunta del origen de la alta salinidad de los aportes. Siendo fluventes, no se trata de cuña salina o de pre-evaporación de napa. Hemos buscado las mejores relaciones equimolares entre cationes y aniones que podrían indicar cuáles sales evaporíticas o salmueras han salinizado las napas de la cuenca de Capur. No hemos encontrado relaciones significativas entre Na y Cl, ni entre Ca y SO₄, ni entre Na y Cl+SO₄, ni entre Na+Ca y Cl. La única significativa es entre Na+Mg+Ca y Cl, como se puede ver en la figura 2.

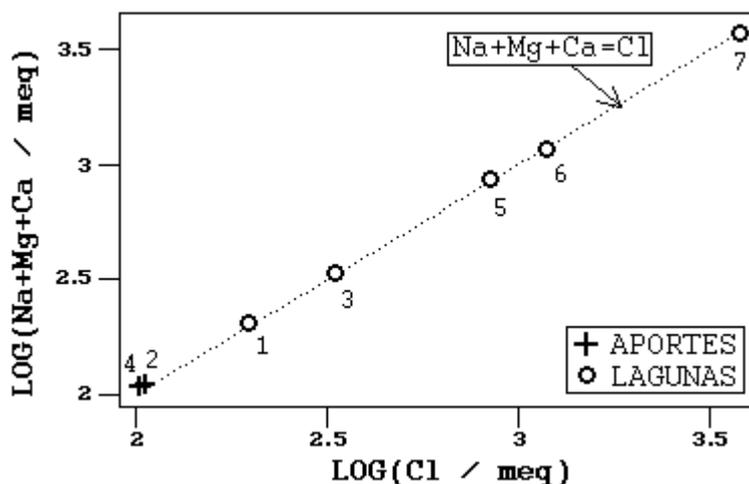


Fig.2 : Relación entre Na+Mg+Ca y Cl en las aguas del salar de Capur.

Eso sugiere una salinización de las napas diluidas por salmueras del mismo tipo Na-Mg-Ca / Cl y de origen desconocido. Es poco probable que se trate de sales, puesto que los cloruros de magnesio y calcio son extemadamente solubles y no precipitan en las condiciones climáticas que imperan en los Andes. La composición de las aguas de aporte del norte de Capur no proviene de la simple alteración de las rocas volcánicas de la cuenca de drenaje.

Vías evolutivas

Ya hemos visto que la composición de las aguas de aporte no tiene relación con la geología superficial. Igualmente, la vía evolutiva cálcica que sigue estas aguas al evaporarse no tiene relación con la litología. Por otra parte, hay buena concordancia entre la vía evolutiva cálcica y la composición de las lagunas.

Evolución cuantitativa de aguas

La tabla 1 presenta la composición calculada de todas las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta las salinidades de las dos salmueras CPR-3 (menos concentrada) y CPR-7 (más concentrada). 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 (CPR-xE) y la solución real. Se nota una buena correlación entre los dos aportes evaporados y la salmuera menos concentrada. La desviación aumenta entre los aportes más evaporados y la salmuera más concentrada, pero queda todavía baja. Hay menos SO₄, B, K, Li, Ca y Mg en la salmuera real que en la calculada, lo que sugiere procesos geoquímicos no previstos en el modelo, como reducción de sulfato en sulfuros y neoformaciones arcillosas.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
<u>CPR-3</u>	8,11	1,40	11900	914	26,7	26,4	5770	500	7,70	694	663	
<u>CPR-2E</u>	8,04	0,930	11400	1300	33,4	30,5	5640	533	7,64	719	661	0,020
<u>CPR-4E</u>	8,04	0,939	11400	1310	33,1	14,0	5660	522	7,49	701	668	0,056
<u>CPR-7</u>	7,36	5,84	134000	2140	225	29,4	72000	4300	68,2	3100	5760	
<u>CPR-2E</u>	7,54	4,74	133000	3640	388	10,3	65500	6200	88,8	3470	7680	0,178
<u>CPR-4E</u>	7,55	4,73	133000	3870	384	10,3	65700	6060	87,0	3260	7760	0,180

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

Calidad de aguas

Considerando la alta salinidad de los aportes, es evidente que las aguas de aporte del sector norte de Capur no presentan capacidad de uso potable o agrícola. Como hemos visto que la alta salinidad de los aporte se debe a la salinización por antiguas salmueras, la posibilidad de encontrar aguas muy diluidas un poco más arriba en el norte la cuenca de drenaje es muy baja.

Balance hídrico

Solamente se puede establecer el orden de magnitud de los parámetros del balance hídrico de la laguna norte. Su superficie es de $0,55 \text{ km}^2$.

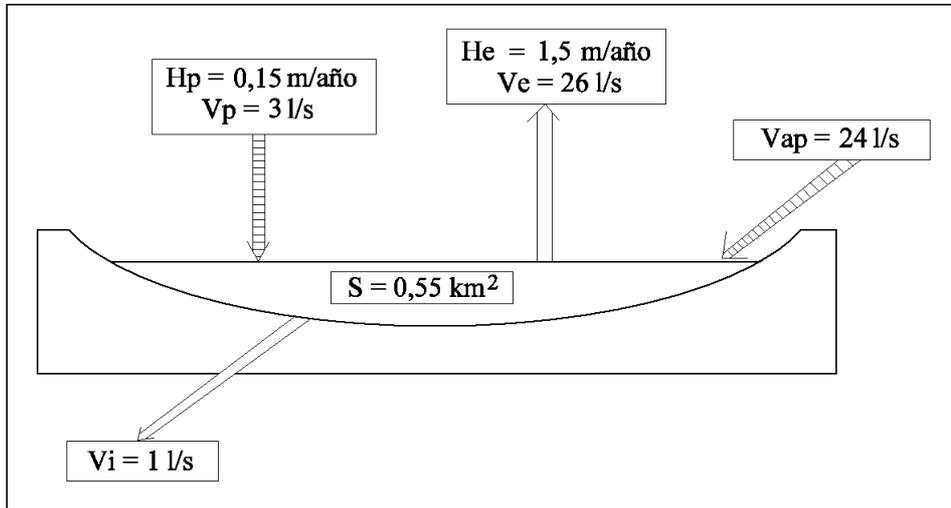


Fig.3 : Balance hídrico de la laguna Capur Norte

En la estimación de las infiltraciones, no hay problema en la composición de los aportes, pero si lo hay para estimar la composición de la laguna. Hemos visto que sus aguas se concentran en un factor de 10 hacia el sur. Lo único que se puede hacer, es suponer que las aguas se infiltran en los sedimentos del fondo y que la tasa de infiltración es la misma en toda la laguna.

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

- $H_e = 1,5 \text{ m/año}$
- $H_p = 0,15 \text{ m/año}$
- $S = 0,55 \text{ km}^2$
- $C_{ap} = 3700 \text{ mg/l}$ (promedio entre CPR-2 y 4)
- $C_L = 73 \text{ 000 mg/l}$ (promedio entre CPR-3 y 7)

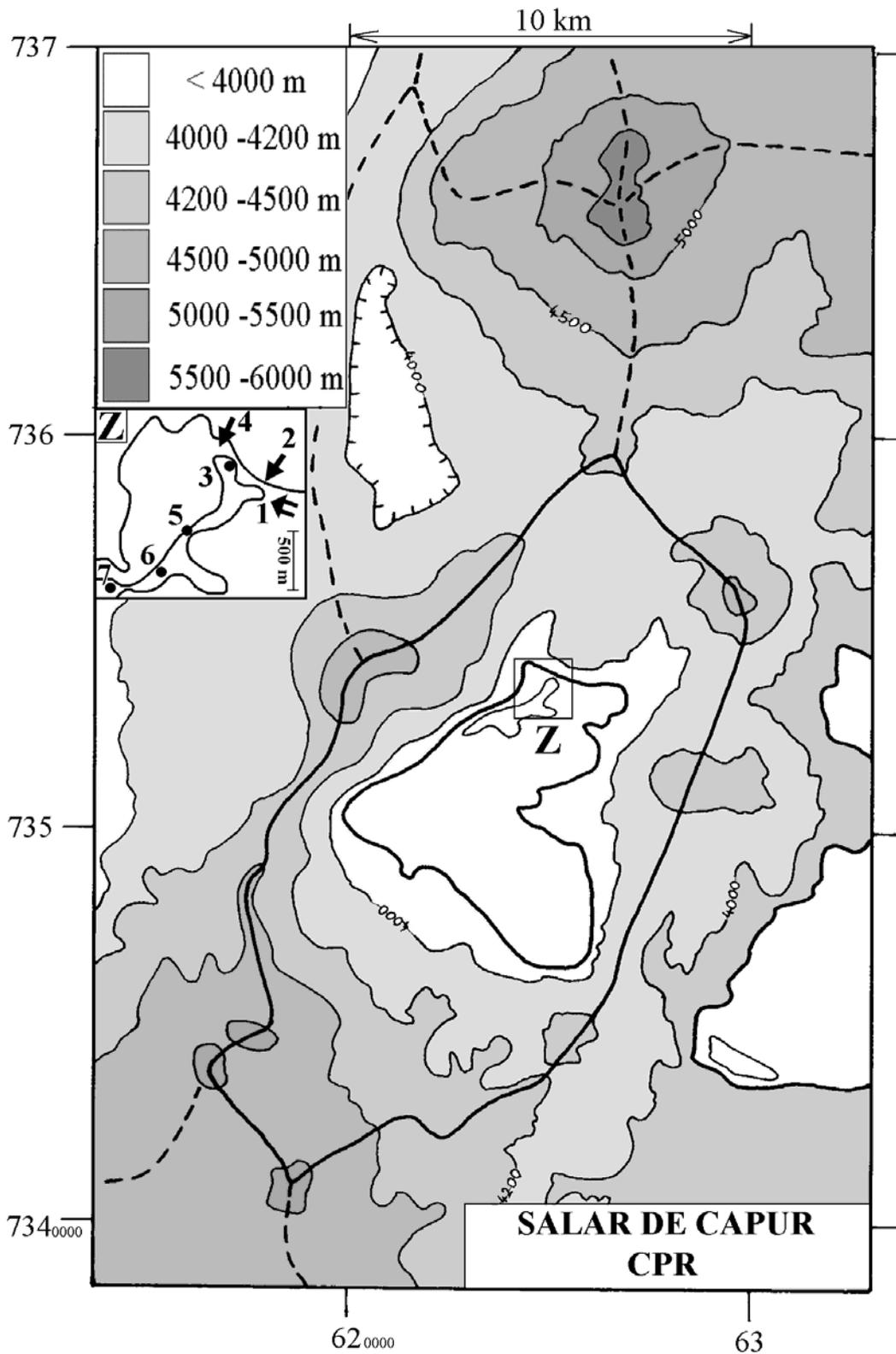
Volumen de aporte : $V_{ap} = S(H_e - H_p)/(1 - C_{ap}/C_L) = 780 \text{ 000 m}^3/\text{año} = 24 \text{ l/s}$

Volumen de infiltraciones : $V_i = S(H_e - H_p)/(1 - C_L/C_{ap}) = 39 \text{ 000 m}^3/\text{año} = 1 \text{ l/s}$

Conclusiones

El salar de Capur recibe por su orilla norte aguas de aporte saladas de tipo Na-(Mg)-(Ca) / Cl cuya composición proviene de salinización de aguas diluidas por salmueras de origen desconocido. La cuenca no presenta buenas potencialidades para recursos de agua. Por una parte, el caudal entrante por toda la orilla norte es débil (24 l/s) ; y por otra, puesto que la alta salinidad de los aportes se debe a la redisolución de antiguas salmueras, la posibilidad de encontrar aguas muy diluidas un poco más arriba en la cuenca de drenaje, no es muy alentadora.

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



**SALAR DE CAPUR
CPR**

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS ESTE	UTM NORTE	ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
CPR-1	19/04/97	13 ^H 30	625489	7353635	3950	Río interior salar
CPR-2	19/04/97	13 ^H 40	625454	7353661	3955	Manantial corriente
CPR-3	19/04/97	14 ^H 00	625138	7353932	3950	Laguna
CPR-4	19/04/97	14 ^H 15	624985	7353987	3955	Manantial corriente
CPR-5	19/04/97	14 ^H 50	624750	7353387	3950	Laguna
CPR-6	19/04/97	15 ^H 00	624478	7353067	3950	Laguna
CPR-7	19/04/97	15 ^H 20	624250	7352920	3950	Laguna

NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
CPR-1	20400	14,4	5,9	1,010	8,57	0,973	6990	1,97	0,040	633	1,92	18,5	29,4	0,0330	3430	293	4,44	461	396
CPR-2	11750	18,1	5,1	1,005	7,61	1,04	3760	1,34	0,021	427	3,35	11,0	29,1	0,0334	1870	176	2,52	252	218
CPR-3	32700	10,3	5,9	1,015	8,11	1,40	11900	3,23	0,035	914	1,98	26,7	26,4	0,0330	5770	500	7,70	694	663
CPR-4	11300	22,8	3,9	1,005	7,57	1,07	3620	1,30	0,024	421	3,78	10,6	32,5	0,0380	1840	167	2,40	240	214
CPR-5	75200	11,6	6,4	1,038	7,97	2,25	30100	6,08	0,050	1270	0,992	60,5	27,7	0,0700	15600	1120	17,3	1170	1500
CPR-6	98700	10,5	5,1	1,051	7,98	2,66	42200	8,23	0,061	1440	0,868	82,4	29,4	0,0921	21500	1410	23,1	1400	2000
CPR-7	213000	13,4	1,3	1,147	7,36	5,84	134000	22,6	0,135	2140	1,24	225	29,4	0,211	72000	4300	68,2	3100	5760

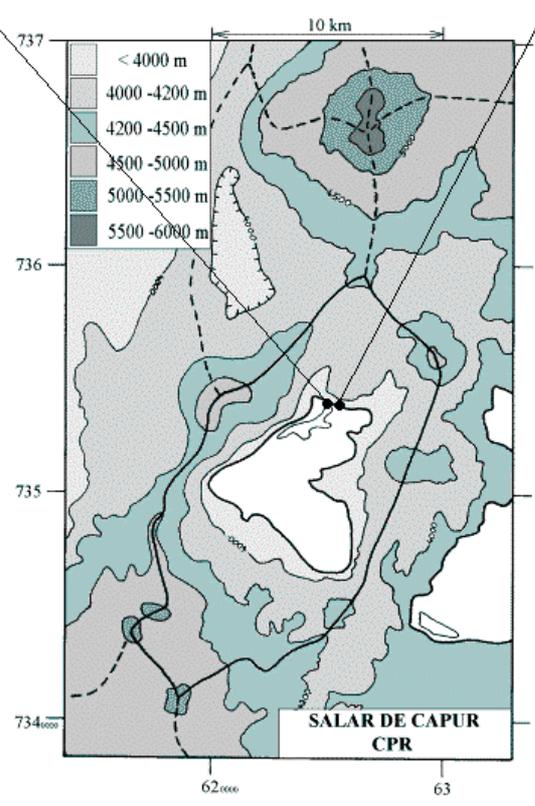
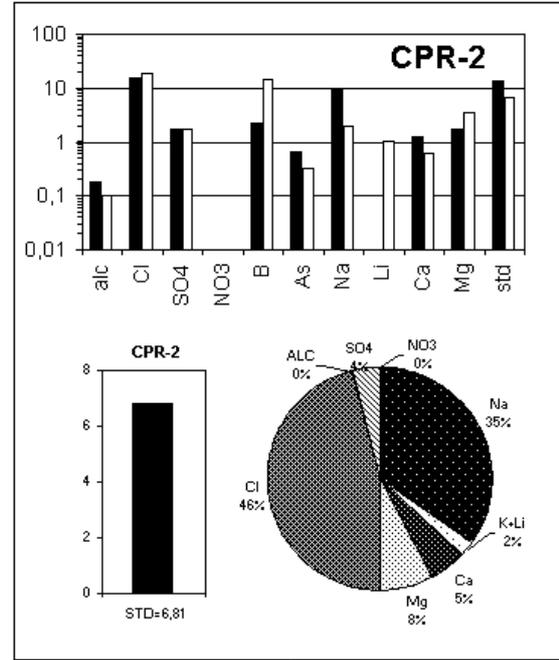
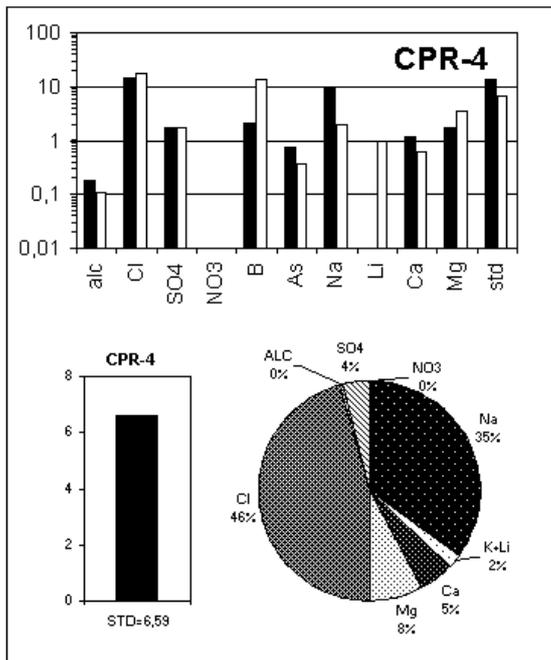
T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l.

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

NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF. %
CPR-1	12320	24,2	2,82	0,08	212,7	211,2	0,8
CPR-2	6812	59,7	0,60	1,9	116,5	115,9	0,5
CPR-3	20553	61,6	2,88	0,66	354,1	354,4	0,1
CPR-4	6593	61,6	0,66	2,0	114,3	111,9	2,2
CPR-5	50991	85,4	4,98	1,1	891,8	875,7	1,8
CPR-6	70256	83,6	6,18	1,1	1207	1223	1,3
CPR-7	221806	-	-	-	3878	3820	1,5

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

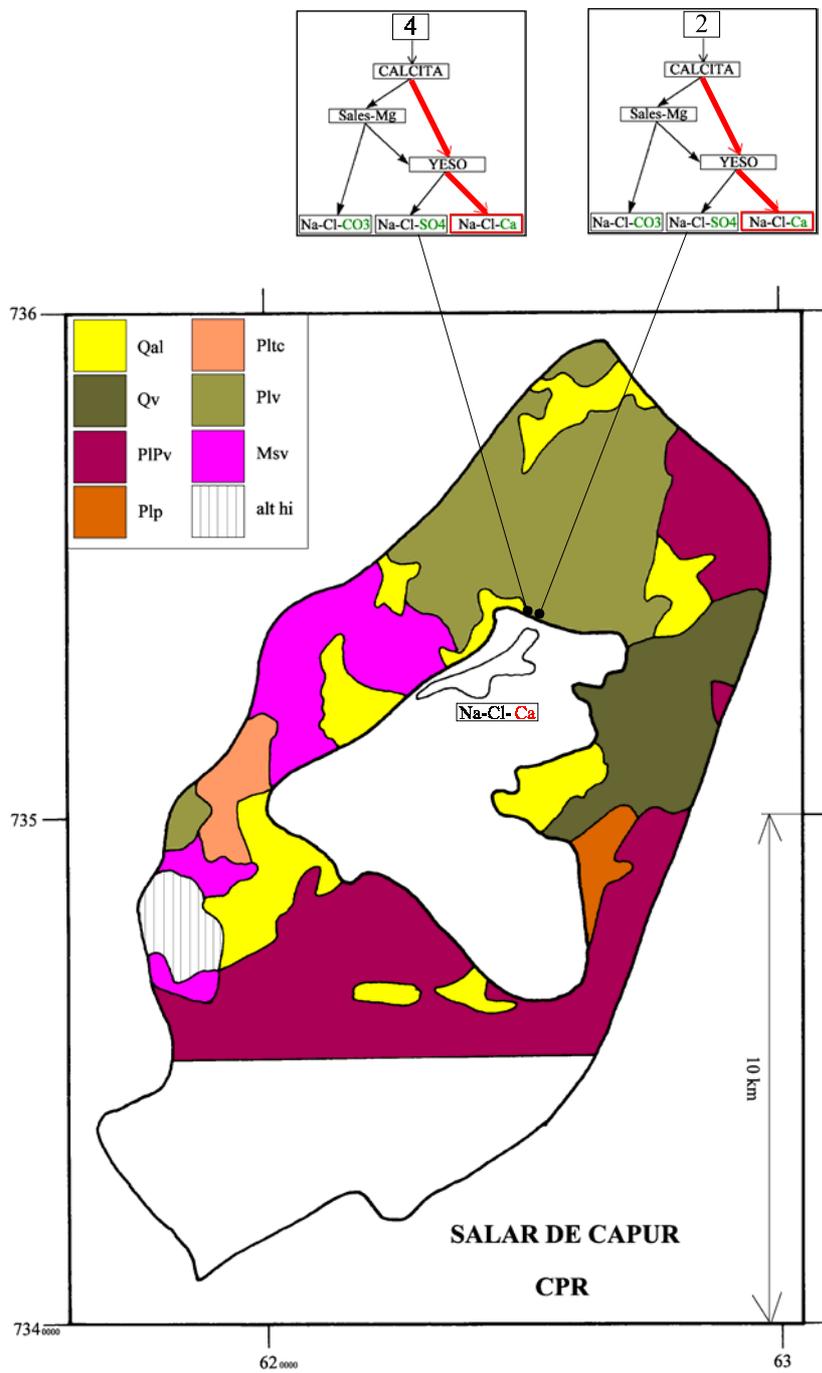
S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l); DIF.% = diferencia en %



MAPA GEOLOGICO Y VIAS EVOLUTIVAS

CPR

- Qal** : *Cuaternario*. Depósitos aluviales: gravas, arenas y limos.
- Qv** : *Cuaternario*. Estrato-volcanes IV. Dacitas y andesitas de piroxeno, andesitas de hornblenda y/o biotita, basaltos y andesitas basálticas subordinadas.
- PIPv** : *Plioceno - Pleistoceno*. Andesitas de piroxeno, andesitas de hornblenda y/o de biotita y dacitas, basaltos y andesitas basálticas subordinados.
- Plp** : *Plioceno*. Ignimbrita Patao. Toba dacítica de vidrio y escasos pómez y cristales.
- Pltc** : *Plioceno*. Ignimbrita Tucucaro. Toba dacítica de vidrio y escasos pómez y cristales.
- Plv** : *Plioceno*. Estrato-volcanes II. Andesitas de piroxeno y andesitas de hornblenda y/o biotita. Dacitas subordinadas.
- Msv** : *Mioceno sup.* Andesitas de piroxeno, subordinamente dacitas, andesitas de hornblenda y/o biotita, basaltos y andesitas basálticas.
- alt hi** : alteración hidrotermal.



SALAR DE IMILAC

Introducción

El salar de Imilac se encuentra en la Segunda Región, adyacente al borde oriental de la Cordillera de Domeyko, entre los salares de Atacama y Punta Negra. La forma del salar y su cuenca de drenaje no están muy bien definidas. En los mapas topográficos y geológicos, el salar aparece dividido en dos partes: una en forma de rombo, al oeste, y la otra de forma muy alargada e irregular, al este. Hemos estudiado solamente la parte occidental, puesto que es la única donde hemos encontrado agua. Es también la costra mejor delimitada en el fondo de una depresión topográficamente cerrada. Su cuenca de drenaje pertenece a la Cordillera de Domeyko. Es el único salar entre los que hemos estudiado que no tiene relación con la alta Cordillera de los Andes. La parte alargada, al este, se parece mucho a las costras de sales del Valle Central. En algunos estudios, se considera el salar de Imilac como un satélite del salar de Punta Negra. En realidad, al observar el mapa topográfico, se nota que Imilac es una sub-cuenca de Atacama. Las principales características morfométricas y climatológicas del salar son:

- altura: 2949 m
- superficie de la cuenca: 189 km²
- superficie del salar: 9,8 km²
- superficie de las lagunas: 0,16 km²
- precipitaciones: 40 mm/año
- evaporación potencial: 2000 mm/año
- temperatura media: 10°C

Es una costra de sulfato de calcio (yeso) con abundantes limos salinos. Hay dos tipos de lagunas:

- "ojos" de unos 10 m de diámetro y 3 m de profundidad, al norte (IMI-5 y 6)
- lagunas someras al sur (IMI-2 y 7)

Hemos extraído cuatro aguas de aporte: dos aguas de napa en pozos entubados (1 y 4), una de un dren (3) y una vertiente difusa (8). El pozo (1) es artesiano pues el agua sale naturalmente del tubo. El nivel piezométrico está entre 1 y 2 metros por encima del suelo y no conocemos su nivel freático. Se sacaron dos muestras de la vertiente difusa (8): una superficial y la otra en una pequeña calicata (8D).

Composición de aguas y salmueras

Las composiciones de aguas del salar de Imilac están presentadas en la figura 1 y en la tabla 1. Se puede distinguir tres grupos de agua:

- la napa artesiana (1) y la lagunita (2) tienen aguas diluidas muy sulfatadas y de misma composición porcentual
- el agua del dren (3) es salada con concentraciones parecidas en Cl y SO₄.

- la vertiente difusa y salada (8) y la tres lagunas (5, 6, 7) son de tipo Na / Cl con cantidades menores de Ca y SO₄. Las lagunas son del mega-grupo cálcico con más calcio que sulfato.

El agua del pozo (4) esta contaminada. Su elevado pH y su bajo contenido en Ca y Mg indican una interacción con concreto o algún tipo de cemento. Su concentración en arsénico (0,1 microgramo por litro) es entre 1000 y 5000 veces inferior a su concentración en las demás aguas, lo que resulta probablemente de una reacción con el hierro de la tubería.

<u>APORTES</u>	<u>SALINIDAD</u> mg/l	<u>TIPO QUÍMICO</u>		<u>VIA EVOLUTIVA</u>
		Cationes	Aniones	
IMI-1	565	Na- (Ca)	SO ₄ -Cl- (HCO ₃)	SO ₄ (N)
IMI-4	1865	Na	Cl- (HCO ₃)	CO ₃
IMI-3	6193	Na-Ca	Cl-SO ₄	SO ₄ (N)
IMI-8	10084	Na- (Ca)	Cl- (SO ₄)	Ca
IMI-8D	12268	Na- (Ca)	Cl- (SO ₄)	Ca
<u>LAGUNAS</u>				
IMI-2	643	Na-Ca	SO ₄ -Cl- (HCO ₃)	SO ₄
IMI-7	33362	Na- (Ca)	Cl- (SO ₄)	Ca
IMI-6	48710	Na- (Ca)	Cl- (SO ₄)	Ca
IMI-5	89929	Na- (Ca)	Cl- (SO ₄)	Ca

Tabla 1 : Salinidades, tipos químicos y vías evolutivas de aguas del salar de Imilac.
SO₄ (N) = vía neutra sulfatada; CO₃ = vía carbonatada; Ca = vía cálcica.

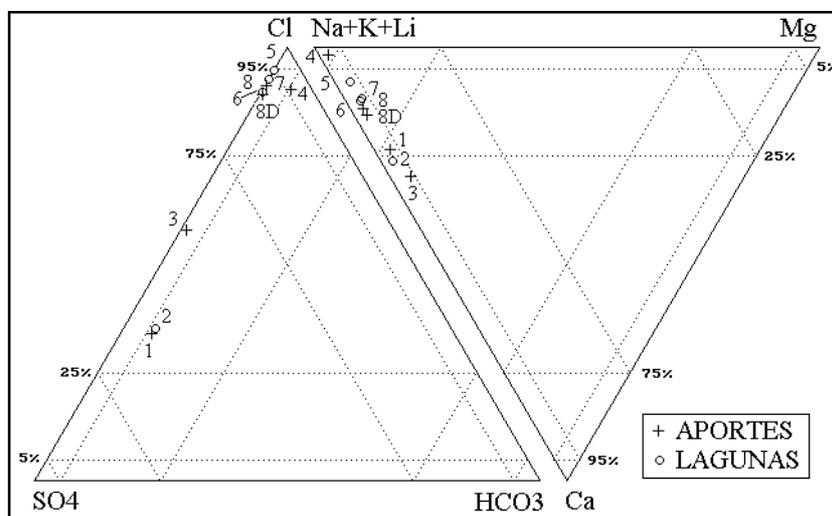


Fig.1: Composición de aguas y salmueras del salar de Imilac

La vertiente difusa 8/8D tiene la misma composición porcentual que las salmueras (6 y 7) del salar, lo que podría corresponder a una contaminación de aguas diluidas por la cuña salina. Por otra parte, Imilac presenta concentraciones muy altas en nitrato (1000 - 2000 mg/l) y en yodo (hasta 8 mg/l). Dentro de los salares estudiados, solamente Pintados tiene más nitrato. Esta

característica relaciona a Imilac más con los salares del Valle Central que con los de la Cordillera de los Andes.

Origen de los componentes disueltos

De los cuatro aportes extraídos, dos presentan una composición dudosa: la napa (4) esta obviamente contaminada por los materiales del pozo y la vertiente difusa (8/8D) probablemente también por la misma salmuera del salar. Quedan solamente dos aportes por examinar: la napa (1) y el dren (3) (ver diagramas circulares). El agua diluida de la napa artesiana (1) presenta concentraciones porcentuales parecidas en Na y SO₄. La suma Na+SO₄ corresponde al 65 % de la salinidad del agua (en mg/l), lo que podría sugerir una salinización del agua de napa por sulfato de sodio del agua de napa. Sin embargo, el alto contenido en sulfato podría también provenir de la oxidación de azufre. Es obvio que la napa (1) no se limita a la cuenca topográficamente cerrada que rodea el salar ya que se encuentra exactamente en la continuación de la Quebrada Guanaqueros en el extremo sur-oeste de la cuenca de Atacama. En los volcanes que cierran la quebrada al este, hay importantes yacimientos de azufre.

El agua salada del dren (3) presenta relaciones aproximadamente equimolares entre Na y Cl, de una parte, y Ca y SO₄, de otra parte. Los cuatro componentes corresponden al 96% de la salinidad total, lo cual refleja la redisolución de halita (NaCl) y yeso (CaSO₄.2H₂O) de antiguas evaporitas. En lo que se refiere al yeso, no hay que buscarlo muy lejos, puesto que el salar esta rodeado por una formación sedimentaria (Pampa de Mulas) con lindos y abundantes cristales de yeso. El exceso de SO₄ (20%) sobre el calcio (15%) podría tener el mismo origen que en la napa artesiana (1), o sea, la oxidación de azufre. Más aun, el agua salada del dren 3 podría provenir, en parte, de la salinización de la napa (1) por antiguas sales evaporíticas.

Vías evolutivas y relación con la geología

Se observa cuatro vías evolutivas en Imilac. Dos no son fiables: la vía carbonatada de la napa contaminada 4 y la vía cálcica de la vertiente difusa 8/8D mezclada con la salmuera cálcica del salar. Los dos aportes que quedan (1 y 3) pertenecen a la misma vía evolutiva neutra sulfatada. Eso tiende a confirmar lo visto anteriormente: los aportes del este del salar han probablemente lixiviado terrenos volcánicos con azufre afuera de la cuenca topográfica. La cuenca hidrogeológica de Imilac abarca probablemente la Quebrada Guanaqueros al sur de la cuenca de Atacama.

La composición cálcica de las salmueras del salar no proviene de la evaporación de los aportes orientales. Refleja más bien la litología en parte sedimentaria de la Cordillera de Domeyko. En el presente, lo esencial de los aportes proviene de la Cordillera al este del salar. Las sales y salmueras de Imilac se han depositadas en una época más húmeda cuando el salar recibía aportes desde la Cordillera de Domeyko.

Evolución cuantitativa de aguas

Veamos ahora la evolución cuantitativa de las aguas de aporte cuando se evaporan. La tabla 2 presenta la composición calculada de las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta la salinidad de las diversas lagunas. No hemos incluido el agua contaminada IMI-4. 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 (IMI-xE) y las lagunas (IMI-x).

<u>NUMERO</u>	<u>PH</u>	<u>ALC</u>	<u>CL</u>	<u>SO4</u>	<u>B</u>	<u>SI</u>	<u>NA</u>	<u>K</u>	<u>LI</u>	<u>CA</u>	<u>MG</u>	<u>DESV.</u>
<u>IMI-2</u>	8,66	0,580	115	259	1,97	4,34	151	12,1	0,18	50,9	2,92	
IMI-1E	8,12	0,575	109	270	1,92	5,16	148	12,9	0,15	44,7	3,73	0,015
<u>IMI-5</u>	7,47	1,27	50100	3780	36,5	5,18	30400	782	17,0	2370	590	
IMI-8E	7,71	0,813	50500	3370	63,3	25,8	29700	768	15,3	3210	505	0,220
IMI-3E	8,01	2,24	41600	13200	126	23,7	29700	1500	20,5	949	1080	0,563
IMI-1E	8,23	6,78	20000	36100	352	31,6	27200	2370	27,5	579	685	1,080
<u>IMI-6</u>	7,20	1,66	25300	3910	24,5	14,8	15500	481	9,99	1940	321	
IMI-8E	7,80	0,624	26300	3050	33,0	28,3	15500	400	7,99	2210	263	0,069
IMI-3E	8,02	1,33	21900	7970	66,2	12,5	15600	790	10,8	927	565	0,242
IMI-1E	8,22	3,63	10700	19800	188	34,7	14500	1260	14,7	537	365	0,774
<u>IMI-7</u>	7,97	1,31	18000	1920	17,1	9,91	10800	320	5,30	1380	200	
IMI-8E	7,86	0,584	17800	2300	22,4	19,2	10500	271	5,41	1600	178	0,057
IMI-3E	8,01	1,03	14600	5950	44,1	8,30	10400	526	7,18	888	376	0,280
IMI-1E	8,20	2,53	7180	13700	126	35,8	9770	850	9,88	518	246	0,868

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

El agua de la laguna diluida IMI-2 proviene de la misma napa que IMI-1. Su muy baja salinidad indica que se infiltra rápidamente en los sedimentos del salar. El aporte evaporado que más se asemeja a la composición de las lagunas es la vertiente difusa (8). Eso es normal si se trata de una cuña salina. Los aportes evaporados (1 y 3), al contrario, no concuerdan con las salmueras; los coeficientes de desviación son elevados (0,242 a 1,08). Eso confirma bien que las salmueras del salar no provienen de la evaporación de los aportes orientales.

Calidad de aguas

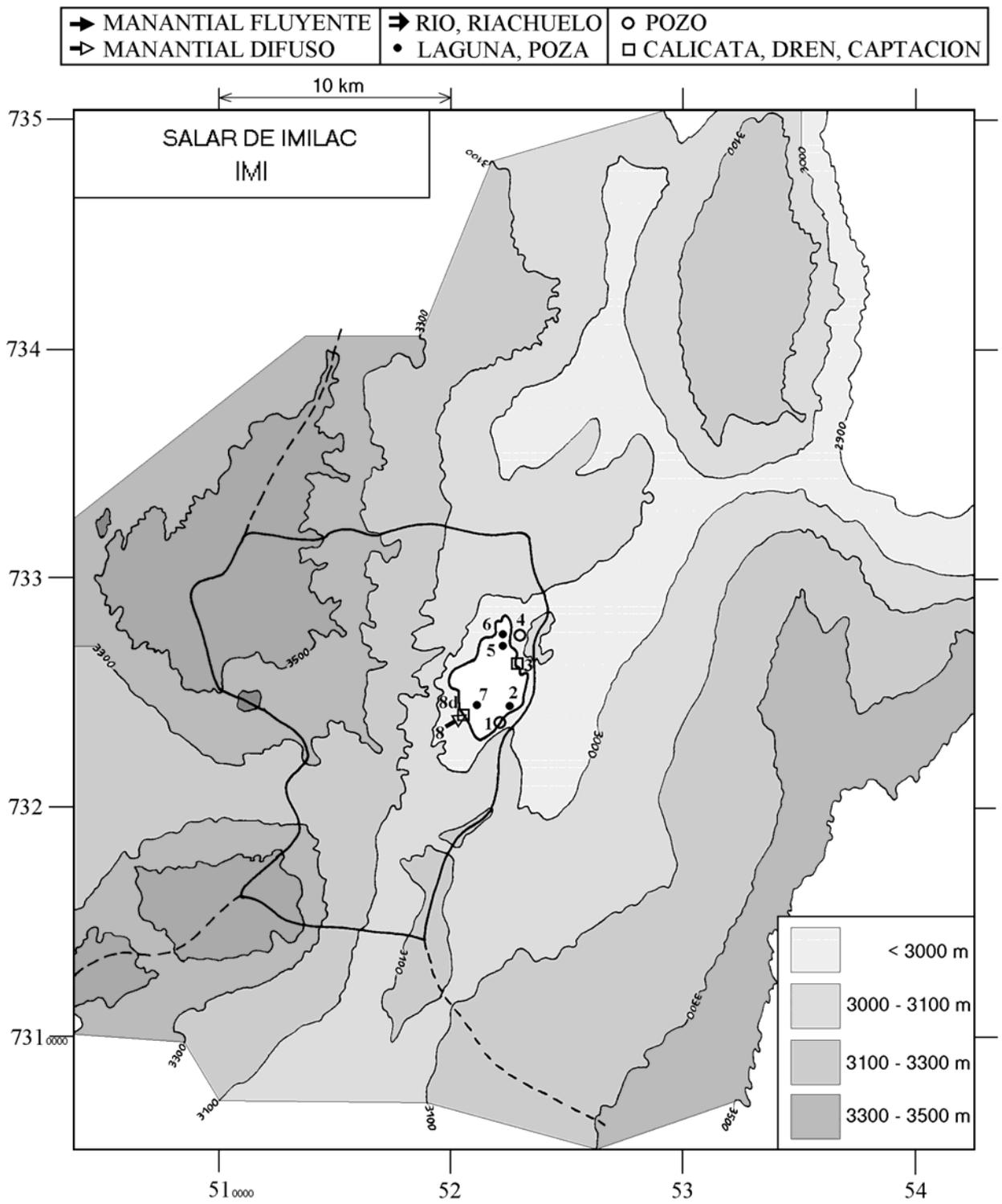
El agua de la napa artesiana (1) es la única que presenta una salinidad aceptable para el consumo humano y el riego. Sin embargo, contiene 10 veces más arsénico que el máximo permitido por la norma de potabilidad.

Conclusiones

El salar de Imilac se asemeja más a los salares fósiles del Valle Central que a los salares de la Cordillera de los Andes. Ni su cuenca, ni el salar mismo tienen límites bien definidos. Sus sales y salmueras cálcicas no resultan de la evaporación de los principales aportes sulfatados actuales que provienen de la alta Cordillera al este del salar. Las sales se depositaron en épocas más húmedas cuando la Cordillera de Domeyko recibía más precipitaciones. El salar está alimentado al este por una napa de agua diluida, localmente artesiana, que podría constituir un recurso interesante a pesar de su elevado contenido en arsénico.

Referencias y estudios anteriores

Mongard, C. 1984. Hidrogeología del salar de Punta Negra (e Imilac). Tesis de Grado para optar al Título de Geóloga, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología, 232p.



SALAR DE IMILAC
IMI

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
IMI-1	28/05/94	10 ^H 15	521950	7323610	2949	Napa (pozo)
IMI-2	28/05/94	10 ^H 50	522350	7324135	2949	Laguna
IMI-3	28/05/94	11 ^H 50	523025	7326010	2949	Napa (dren)
IMI-4	28/05/94	12 ^H 35	522875	7327450	2960	Napa (pozo ES-11)
IMI-5	28/05/94	13 ^H 00	522350	7326990	2949	Laguna
IMI-6	28/05/94	14 ^H 15	522270	7327505	2949	Laguna
IMI-7	28/05/94	15 ^H 20	521090	7324350	2949	Laguna
IMI-8	28/05/94	18 ^H 10	520625	7324250	2949	Manantial difuso
IMI-8D	28/05/94	18 ^H 10	520625	7324250	2949	Napa (cateo)

SALAR DE IMILAC
IMI

NUMERO	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
IMI-1	10,5	na	1,000	8,46	0,506	95,9	0,162	0,207	233	3,14	1,69	4,54	0,47	132	11,3	0,132	39,3	3,28
IMI-2	4	8,3	1,000	8,66	0,580	115	0,168	0,166	259	0,577	1,97	4,34	0,35	151	12,1	0,180	50,9	2,92
IMI-3	6	8,6	1,005	7,51	1,15	1970	0,625	0,740	1900	51,1	6,10	1,15	0,31	1460	72,7	0,992	593	52,0
IMI-4	13,5	na	1,000	9,44	1,74	1000	0,288	0,330	60,0	0,285	1,70	0,165	0,0001	665	18,8	0,562	11,0	7,05
IMI-5	11	7,0	1,063	7,47	1,27	50100	0,669	8,08	3780	1840	36,5	5,18	0,51	30400	782	17,0	2370	590
IMI-6	8	5,7	1,036	7,20	1,66	25300	0,713	4,34	3910	1070	24,5	14,8	0,48	15500	481	9,99	1940	321
IMI-7	11	6,5	1,027	7,97	1,31	18000	0,919	3,44	1920	613	17,1	9,91	0,41	10800	320	5,30	1380	200
IMI-8	10,5	5,0	1,008	7,20	0,408	5330	0,459	1,32	696	156	6,77	5,80	0,11	3220	82,1	1,64	489	53,9
IMI-8D	8,5	4,2	1,010	6,98	1,09	6430	0,553	1,51	1010	128	8,06	6,52	0,13	3800	93,8	1,88	642	66,1

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

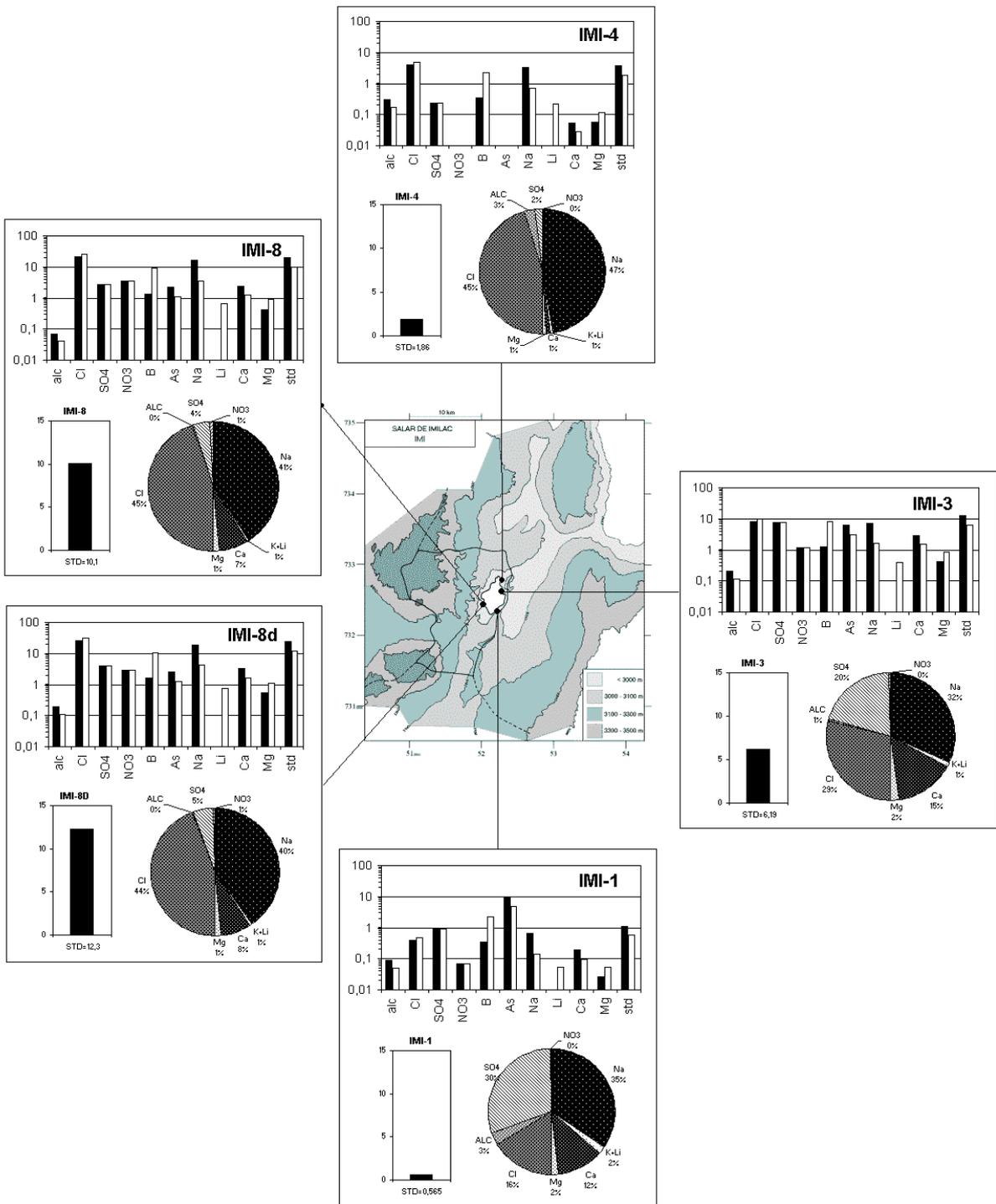
CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF. %
IMI-1	564,6	28,4	0,54	0,18	8,299	8,118	2,2
IMI-2	642,7	31,7	0,84	0,15	9,676	9,231	4,7
IMI-3	6193	68,3	0,42	3,7	99,48	97,08	2,4
IMI-4	1865	72,6	13	0,04	30,59	31,20	2,0
IMI-5	89929	64,7	1,3	2,6	1509	1520	0,7
IMI-6	48710	97,0	0,66	8,4	808,9	813,4	0,6
IMI-7	33362	65,9	2,3	0,92	562,4	558,2	0,8
IMI-8	10084	24,3	0,06	2,2	171,2	167,4	2,2
IMI-8D	12268	65,9	0,12	11	205,1	205,2	0,02

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

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

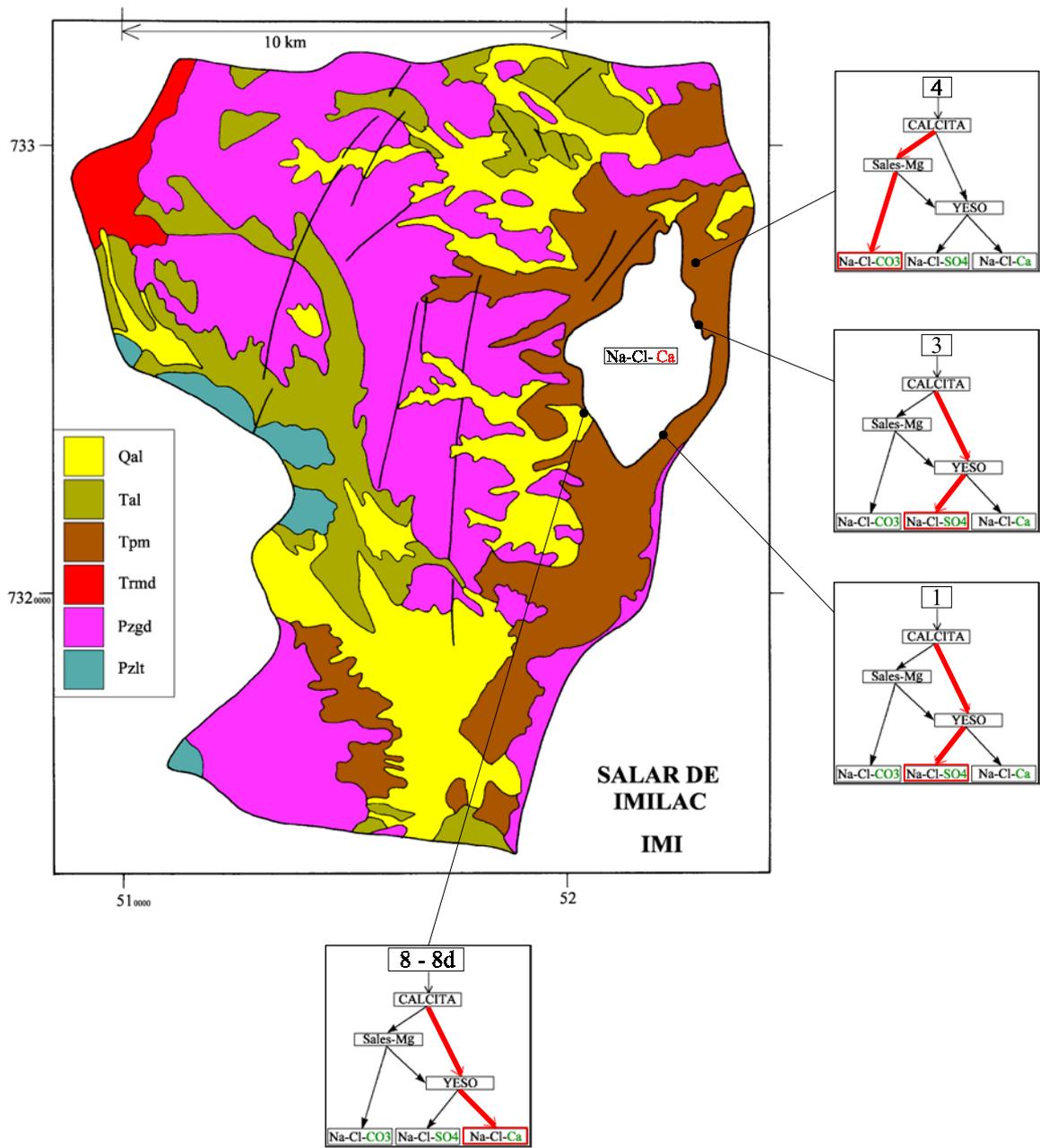
S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l); DIF.% = diferencia en %



MAPA GEOLOGICO Y VIAS EVOLUTIVAS

IMI

- Qal** : *Cuaternario*. Depósitos aluviales y coluviales modernos: gravas, arenas y limos.
- Tal** : *Mioceno sup. - Plioceno*. Depósitos aluviales y coluviales antiguos: gravas, arenas y limos con intercalaciones de ceniza volcánica. En zona de falla estan localmente cementadas por carbonatos y presentan niveles de travertinos. Facies de limos con abundante yeso.
- Tpm** : *Oligoceno sup. - Mioceno inf.* Gravas, conglomerados y areniscas con intercalaciones de ceniza volcánica e ignimbritas, localmente cementadas por carbonatos y con niveles de travertinos. Presentan facies salinas con limos yesíferos y capas de yeso.
- Trmd** : *Trias sup. Granitoides*. Monzonitas, granodioritas, tonalitas surcadas por filones riolíticos.
- Pzgd** : *Carbonífero sup. - Pérmico*. Granitoides. Granodioritas, dioritas, granitos y gabros.
- Pzlt** : *Carbonífero sup - Pérmico*. Volcanitas y sedimentitas volcanoclásticas indiferenciadas con escasas intercalaciones de calizas.



SALAR DE PUNTA NEGRA

Introducción

El salar de Punta Negra se encuentra en la II Región, en una depresión tectónica entre la Cordillera de Domeyko y la Cordillera de los Andes, al sur del salar de Atacama. Su cuenca se caracteriza por grandes variaciones morfológicas, climatológicas y geológicas. El imponente volcán Llullaillaico, que cierra la cuenca al este, culmina a 6800 m de altura, es decir 4000 m más arriba que el salar. Las precipitaciones, casi nulas en la Cordillera de Domeyko, ascienden a 250 mm/año en la Cordillera de los Andes. En cuanto a la geología de la cuenca, es una mezcla compleja de terrenos sedimentarios, de formaciones volcánicas y de rocas plutónicas. El salar es una costra de sal (yeso y halita) con pocas y pequeñas lagunas someras. Sus principales características morfométricas y climatológicas son:

- altura de salar: 2945 m
- superficie de la cuenca: 4263 km²
- superficie del salar: 250 km²
- superficie de las lagunas 0,1 - 0,2 km²
- precipitaciones: 50 mm/año (salar) - 250 mm/año (cuenca oriental)
- evaporación potencial: 2000 mm/año (salar)
- temperatura media: 10°C (salar)

El descubrimiento del yacimiento de cobre de Minera Escondida incentivo numerosos estudios sobre la hidrogeología de la cuenca. La empresa minera explota las napas del sector oriental de la cuenca. Además de los estudios hidrogeológicos, cabe señalar que Minera Escondida, en su programa de gestión ambiental, monitorea los parámetros físicos, químicos y biológicos de las lagunas del salar.

Composición de las aguas

Se puede distinguir claramente cuatro grupos de agua según su posición en la cuenca :

- el anillo exterior : son aportes en sectores elevados de la cuenca, tales como vertientes fluyentes, ríos y una napa.
- el anillo interior : son napas cerca, pero no pegadas, a la orilla del salar.
- aguas de orilla : son napas o vertientes difusas pegadas a la orilla.
- las lagunas dentro del salar.

La tabla 1 resume las características químicas de las aguas de cada grupo. La figura 1 presenta las composiciones de los componentes mayores en diagramas triangulares. Aparece enseguida una característica bien peculiar : la alta salinidad de la mayor parte de los aportes del anillo exterior,

es decir de las aguas ubicadas más arriba en la cuenca. Las aguas del anillo interior, mucho más cercanas al salar, no tienen mayor salinidad, como podría esperarse. Las aguas de la orilla, pegadas al salar, tienen una salinidad elevada probablemente a causa de una cuña salina o de la pre-evaporación de las napas al llegar a las orillas.

	SALINIDAD (mg/l)	TIPO QUÍMICO		VIA EVOLUTIVA
		CATIONES	ANIONES	
<u>ANILLO EXTERIOR</u>				
PUN-22	196	Na-Ca- (Mg)	/ HCO ₃ -SO ₄ - (Cl)	CO ₃
PUN-23	272	Ca-Na- (Mg)	/ HCO ₃ -SO ₄ - (Cl)	SO ₄ (N)
PUN-12	816	Na-Ca- (Mg)	/ SO ₄ - (Cl) - (HCO ₃)	SO ₄ (N)
PUN-13	1206	Na-Ca- (Mg)	/ SO ₄ -Cl- (HCO ₃)	SO ₄ (N)
PUN-15	2945	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl- (SO ₄)	SO ₄ (N)
PUN-17	3197	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl- (SO ₄)	Ca
PUN-14	5400	Na- (Ca) - (Mg)	/ SO ₄ -Cl- (HCO ₃)	SO ₄ (N)
<u>ANILLO INTERIOR</u>				
PUN-24	480	Na- (Ca)	/ Cl- (SO ₄)	Ca
PUN-19	549	Na- (Ca)	/ Cl- (HCO ₃) - (SO ₄)	CO ₃
PUN-21	603	Na-Ca	/ Cl- (SO ₄) - (HCO ₃)	Ca
PUN-20	636	Na	/ Cl-HCO ₃ - (SO ₄)	CO ₃
PUN-18	2818	Na- (Ca)	/ Cl- (SO ₄)	Ca
PUN-16	3325	Na-Ca- (Mg)	/ Cl- (SO ₄)	Ca
PUN-11	3735	Na- (Mg) - (Ca)	/ Cl- (SO ₄) - (HCO ₃)	SO ₄ (A)
<u>ORILLA</u>				
PUN-8	6877	Na	/ Cl	Ca
PUN-4	10432	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl	Ca
PUN-10	14160	Na-Ca	/ Cl	Ca
<u>LAGUNAS</u>				
PUN-7	9451	Na	/ Cl	Ca
PUN-3	10532	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl- (SO ₄)	Ca
PUN-2	12750	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl- (SO ₄)	Ca
PUN-5	17815	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl	Ca
PUN-1	20245	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl- (SO ₄)	Ca
PUN-9	41958	Na- (Ca)	/ Cl	Ca
PUN-6	233344	Na	/ Cl	Ca

Tabla 1 : Salinidades, tipos químicos y vías evolutivas de las aguas de Punta Negra
CO₃ = vía carbonatada ; SO₄ (A) = vía alcalina sulfatada
SO₄ (N) = vía neutra sulfatada ; Ca = vía calcica.

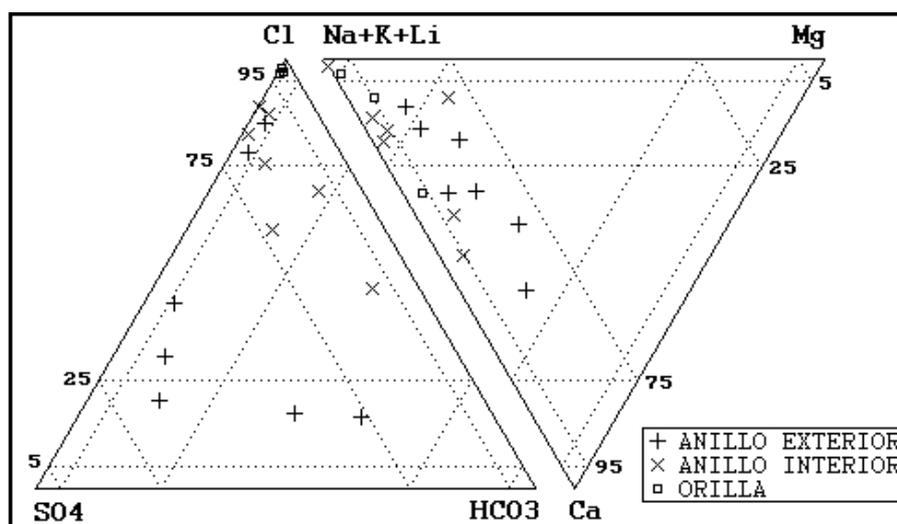


Fig.1 : Composición de las aguas de aporte del salar de Punta Negra

Origen de las sales disueltas

Las aguas *diluidas* de los dos anillos (22, 23, 19, 21, 24) no plantean mayor problema en cuanto al origen de sus componentes disueltos por alteración de rocas. La vertiente (22), que surge en las faldas del volcán Lullaillaico, con Na y HCO_3 como componentes principales, es una típica agua de alteración de roca volcánica. El agua del río (23) tiene Ca como catión principal, lo que refleja los terrenos mayormente sedimentarios que lixivian. La composición de las aguas de napa (19, 21 y 24), con Na y Cl dominantes, corresponde a terrenos sedimentarios predominantes alrededor del salar.

Se plantea un problema de contaminación para el agua de napa (20). Su pH muy elevado (9,70) asociado a un contenido anormalmente bajo de Mg (0,06 mg/l) indica casi seguramente una contaminación por los cementos del pozo. El calcio es probablemente también afectado porque un aumento de pH induce la transformación del bicarbonato en carbonato, lo que provoca la precipitación de carbonato de calcio. La vecina agua de napa (19) tiene también un pH un poco elevado (9,01), pero no presenta reducción apreciable de su contenido de magnesio. Podría entonces presentar una muy leve contaminación de la misma índole.

El problema principal es el origen de la alta salinidad de gran parte de las aguas de aporte. Si para las tres aguas salobres del anillo interior (11, 16 y 18) se podría abogar el efecto de la cuña salina del salar, eso no puede ser para las aguas salobres del anillo exterior. Tales salinidades en aguas de aportes se deben casi siempre a la disolución de antiguas evaporitas o salmueras. Hemos buscado correlaciones equimolares entre cationes y aniones que indiquen sales evaporíticas redisueltas. Las presentamos en la figura 2. El agua de vertiente 14 del anillo exterior es la más concentrada (5,4 g/l) de todas las aguas de aporte de los dos anillos. Su composición debería reflejar más nitidamente las influencias de las sales o salmueras redisueltas. Por eso indentificamos esta agua en cada diagrama.

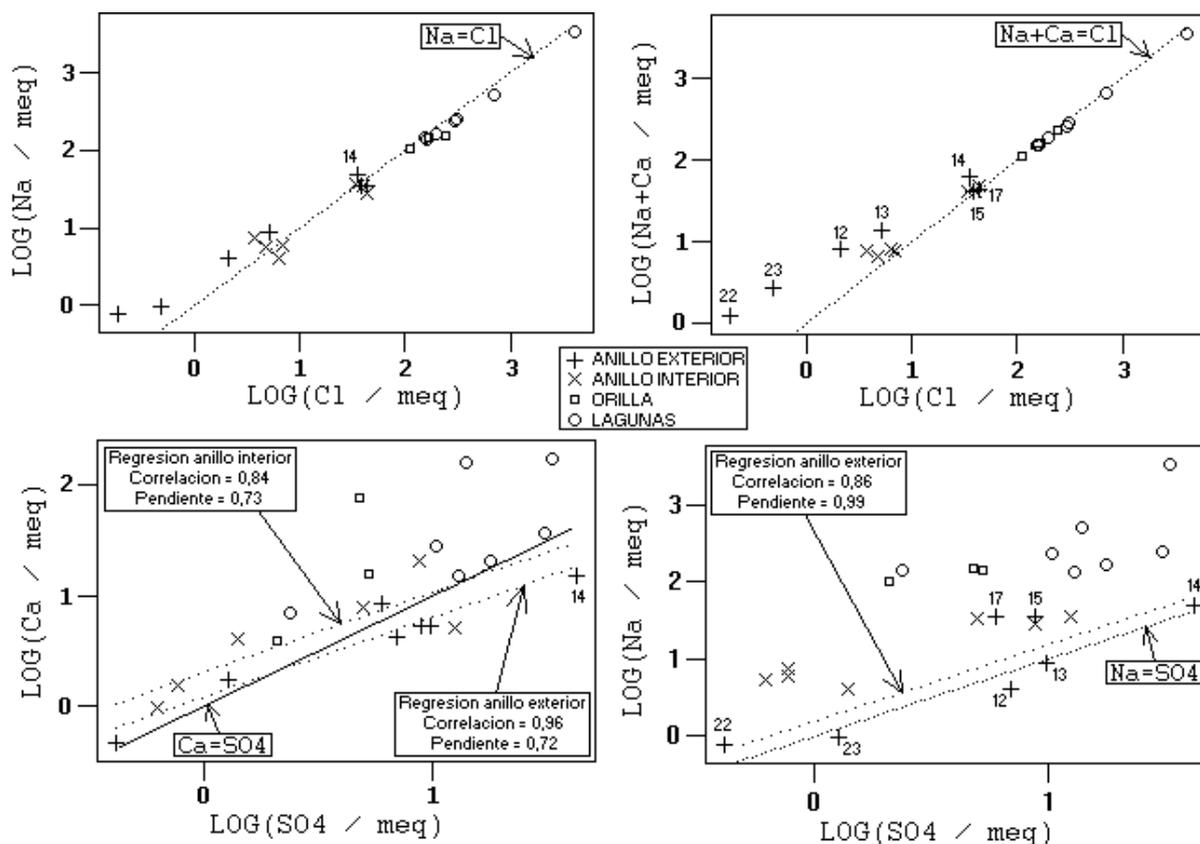


Fig.2 : Correlaciones entre los principales cationes y aniones en las aguas de Punta Negra.

En el diagrama Na / Cl los puntos representativos de las aguas de aporte de los dos anillos tienden a acercarse a la recta equimolar Na = Cl al aumentar la concentración. Eso indica un aporte de Na y Cl en concentraciones similares. Sin embargo, los puntos presentan alguna dispersión de cada lado de la recta indicando que el cloruro de sodio no es el único componente responsable del aumento de salinidad de los aportes.

En el diagrama Na+Ca / Cl, aparece una diferencia entre las aguas de los dos anillos. Las del anillo interior son más cerca de la recta equimolar Na+Ca = Cl que las del anillo exterior, con dos excepciones : (15 y 17) que son las dos aguas de menor cota del anillo exterior. Eso sugiere que las aguas del anillo interior, y estas dos más bajas del anillo exterior, han redissuelto apreciables cantidades de salmueras de tipo Na-Ca / Cl. Los puntos de las aguas del anillo exterior se acercan también progresivamente a la recta equimolar, pero sin llegar a ella. Por ejemplo, las concentraciones en Na+Ca y Cl de PUN-14 divergen en 56 % y sus logaritmos en 15 %. Es probable que haya también alguna influencia de salmueras calco-sódicas en el aumento de las salinidades de las aguas de aporte del anillo exterior, pero esta contribución no debe ser preponderante. Estas aguas han redissuelto más cloruro de sodio que cloruro de calcio.

La correlación entre SO₄ y Ca no sugiere la redisolución de sulfato de calcio o yeso. Hemos figurado las rectas de regresión para cada anillo. Sus pendientes, del orden de 0,72, son netamente diferentes de la pendiente de 1 de la recta equimolar Ca = SO₄. El agua (14), la más concentrada de los aportes, es también la más alejada de la recta equimolar.

La correlación Na versus SO₄ presenta algo interesante. Los puntos de las aguas del anillo exterior se acercan a la recta equimolar Na = SO₄. La recta de regresión de esos puntos es

paralela y cerca de la recta equimolar. Su pendiente es 0,99 y el coeficiente de correlación de 0,86. El desplazamiento de la recta de regresión por encima de la recta equimolar se debe a la influencia de las aguas más bajas del anillo exterior (15 y 17). Ya hemos visto que estas aguas son más parecidas a las del anillo inferior. Si nos fijamos en el agua (14), vemos que su punto se encuentra cerca de la recta equimolar. Todo eso parece indicar una contribución de sulfato de sodio en las aguas salobres del anillo exterior.

En resumen, las aguas salobres más altas del anillo exterior deben su salinidad principalmente a la redisolución de cloruro y sulfato de sodio, mientras que las aguas salobres del anillo interior, y las más bajas del anillo exterior, han redisolto mayormente cloruro de sodio y calcio. Estos componentes provienen de antiguas evaporitas o salmueras asociadas. Hay que recalcar que los dos tipos de sales o salmueras corresponden precisamente a las vías evolutivas sulfatadas y cálcicas y a los dos mega-grupos de salmueras y sales de los salares chilenos.

Queda el problema del origen de la alta salinidad de las aguas de orilla (4, 8 y 10). En los diagramas de correlación de la figura 2, esas aguas parecen asociadas a las aguas de lagunas. En la figura 3 presentamos las relaciones entre la salinidad y las concentraciones porcentuales (o relativas a la salinidad) de Li y B para todas las aguas. Se puede observar dos cosas. Primero, las aguas de aporte de los dos anillos tienen concentraciones porcentuales crecientes en Li y B cuando aumenta la salinidad, con buenos coeficientes de correlación. Por otra parte, las aguas de lagunas y orillas son parecidas entre si, pero se diferencian netamente de las aguas de aporte. Eso sugiere fuertemente que las aguas de vertientes difusas de la orilla son en realidad cuñas salinas de la napa del salar. El aumento del porcentaje de Li y B en las aguas de aporte asociado al origen de la elevación de salinidad por disolución de antiguas salmueras o evaporitas, parece indicar que son más salmueras que sales las que contaminan las napas diluidas de la cuenca. En efecto, estos componentes tienden a concentrarse en las salmueras residuales, sin precipitar en las sales evaporíticas comunes.

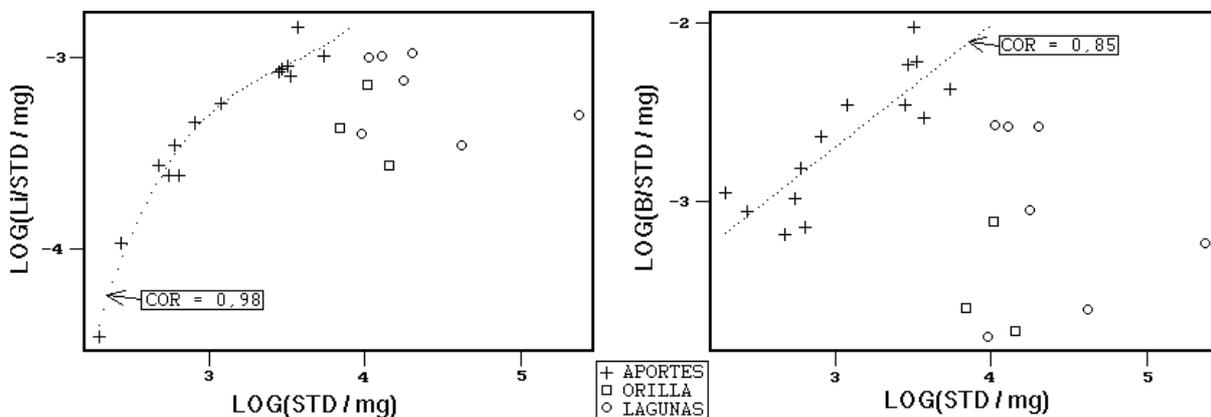


Fig.3 : Concentraciones porcentuales de Li y B relativas a la salinidad en aguas del salar de Punta Negra

Vías evolutivas y relación con la geología

Las vías evolutivas están indicadas en la tabla 1 y en el mapa geológico. Las aguas del anillo exterior evolucionan mayormente según la vía neutra sulfatada reflejando así la salinización de las napas de este sector por salmueras o sales de sulfato de sodio. El agua muy diluida 22 sigue la

vía carbonatada en buen acuerdo con la litología volcánica de esta parte de la cuenca. En caso de un origen de los componentes disueltos por alteración de rocas, la vía neutra sulfatada refleja la presencia de rocas sedimentarias, como el caso del agua diluida PUN-23, o de rocas volcánicas con azufre. En el caso de Punta Negra, esta vía evolutiva se debe a antiguas evaporitas que han sido redisueltas. Las aguas del anillo interior tienden a seguir la vía cálcica lo que refleja la salinización de las napas por salmueras cloruradas cálcicas.

Pero aparecen algunas excepciones. Las aguas diluidas PUN-19 y PUN-20 que siguen la vía carbonatada, estarían contaminadas por el cemento del pozo, por lo que no se puede interpretar sus vías evolutivas. Sin embargo podemos notar que son aguas diluidas, como lo son casi siempre las aguas de aporte que siguen la vía carbonatada, y que se encuentran cuenca abajo de PUN-22, un agua de alteración que sigue la misma vía. Es posible que la contaminación debida a los pozos no haya cambiado la vía evolutiva.

El agua de napa (11) es el único aporte que tenemos al oeste de la cuenca. Es también el único que sigue la vía evolutiva alcalina sulfatada. Eso podría deberse a alguna influencia de las rocas plutónicas (KTg) que caracterizan la geología del nor-oeste de la cuenca. Aguas de alteración de rocas plutónicas tienden a seguir preferencialmente las vías carbonatadas o sulfatadas, dependiendo de las mineralizaciones o impurezas que contienen.

Se puede observar en la tabla 1 que las vías evolutivas traducen de manera simple y mucho mejor los varios tipos de aguas y el origen de sus componentes que los criterios habituales.

Evolución cuantitativa de aguas

Veamos ahora la evolución cuantitativa de las aguas de aporte cuando se evaporan. La tabla 2 presenta la composición calculada de todas las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta la salinidad de la laguna PUN-1. Las demás aguas de lagunas presentan características similares. 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 (PUN-xxE) y PUN-1.

El agua de aporte evaporada que más se acerca a la composición de la laguna (1) es la napa (18) con un coeficiente de desviación bajo. Es interesante notar que la segunda agua más parecida es el río (17) ubicado exactamente cuenca arriba de (18), pero con un coeficiente de desvío no tan bueno. Globalmente, las aguas evaporadas del anillo interior, y las más bajas del anillo exterior, se acercan netamente más de las aguas de lagunas que las del anillo exterior. Las aguas superficiales del salar de Punta Negra provienen de la evaporación de aguas de napas cercanas al salar de tipo químico cálcico. Las aguas sulfatadas cuenca arriba no tienen influencia sobre la composición de las lagunas. La pregunta es si las aguas sulfatadas podrían cambiar su composición química al contacto de antiguas salmueras cálcicas y “transformarse” en aguas salobres cálcicas al acercarse del salar. Si un tal proceso es factible para aguas muy diluidas, es mucho más complicado para aguas salobres. Para cambiar la vía evolutiva de un agua ya salada, hay que aportar considerables cantidades de nuevos componentes para alterar la composición química del agua salada inicial. Es probable, entonces, que las aguas de los sectores elevados al este de la cuenca no contribuyan significativamente a la alimentación del salar.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
PUN-1	8,17	2,50	11000	1490	52,6	30,5	5840	641	21,0	726	267	
PUN-18E	7,80	0,714	10500	1710	69,4	35,3	5520	742	16,7	1130	171	0,058
PUN-17E	7,97	1,93	10000	1840	194	35,4	4970	813	18,3	921	452	0,181
PUN-21E	7,77	0,548	10600	1550	41,7	35,7	4170	674	9,44	2350	245	0,190
PUN-16E	7,78	1,09	10500	1670	131	35,7	4110	585	17,3	2160	347	0,199
PUN-15E	8,09	1,77	9330	2990	120	17,5	5800	364	17,8	550	427	0,200
PUN-4E	8,03	0,762	11800	494	15,7	35,1	6450	493	14,7	592	227	0,247
PUN-11E	8,37	2,57	8370	4060	73,2	32,4	5490	1030	36,4	161	542	0,363
PUN-14E	8,14	1,85	5370	7640	97,9	36,3	4810	442	23,0	554	744	0,382
PUN-24E	7,91	0,549	10700	1630	13,7	27,0	6030	411	5,77	1150	90,4	0,407
PUN-13E	8,17	1,99	4420	8680	99,6	36,7	4720	452	16,7	516	762	0,439
PUN-12E	8,20	1,94	3210	10100	79,2	36,8	4060	533	16,0	482	1090	0,547
PUN-23E	8,18	1,49	3260	9490	44,5	36,8	4130	731	5,45	495	977	0,633
PUN-8E	8,27	1,21	11800	301	5,13	35,4	7240	418	8,85	187	71,5	0,811
PUN-10E	7,76	0,330	12100	330	3,76	16,5	5030	272	5,55	2190	169	0,825
PUN-19E	9,38	23,3	9090	1610	30,2	45,0	6880	807	7,08	1,47	4,34	0,928
PUN-20E	9,91	140	5130	1490	18,2	69,5	7150	322	6,13	0,345	0,923	1,170
PUN-22E	9,74	77,5	2000	6040	66,3	59,5	5790	1210	2,13	0,569	1,49	1,480

Tabla 1 : Comparación de las aguas de aporte evaporadas con el agua de laguna PUN-1 del salar de Punta Negra. ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

Calidad de agua

Hay dos aguas de excelente calidad para cualquier uso : PUN-22 (manantial Tocomar) y 23 (Río Frío). Las dos se encuentran muy arriba en la cuenca. Las aguas de napa al sur del salar (19, 20, 24) también cumplen con las normas chilenas de potabilidad y de riego, pero con algunos componentes al límite (salinidad, As). Muy arriba en la cuenca, PUN-12 (Zorras 1) y PUN-13 (Zorritas) sobrepasan levemente los límites en As o boro de esas normas y podrían ser aprovechada para uso potable con restricciones. El agua de napa PUN-21, al norte de la cuenca, cumple con las normas de potabilidad y riego, con excepción del arsénico en leve exceso. Todas las demás aguas son salobres y muy lejos de las normas de potabilidad y riego.

Balance hídrico

No disponemos de suficientes datos para establecer los balances hídricos de cada laguna. Solamente podemos intentar establecer un grueso orden de magnitud de los aportes superficiales al salar despreciando las infiltraciones de las lagunas a dentro del salar. Se obtiene :

$$V_{ap} = S(H_c - H_p) = 390\ 000\ m^3/año = 12\ l/s$$

con - $H_c = 2\ m/año$; $H_p = 0,05\ m/año$; $S = 0,2\ km^2$

Para un salar de este tamaño, un flujo superficial del orden de 12 l/s es muy bajo. No es muy alentador para el aprovechamiento de las napas alrededor del salar pues podría bajar rápidamente su nivel. La tasa de precipitación que cae sobre la cuenca oriental es del orden de 6000 l/s. Las perdidas por infiltración en napas profundas debe ser importante.

Conclusiones

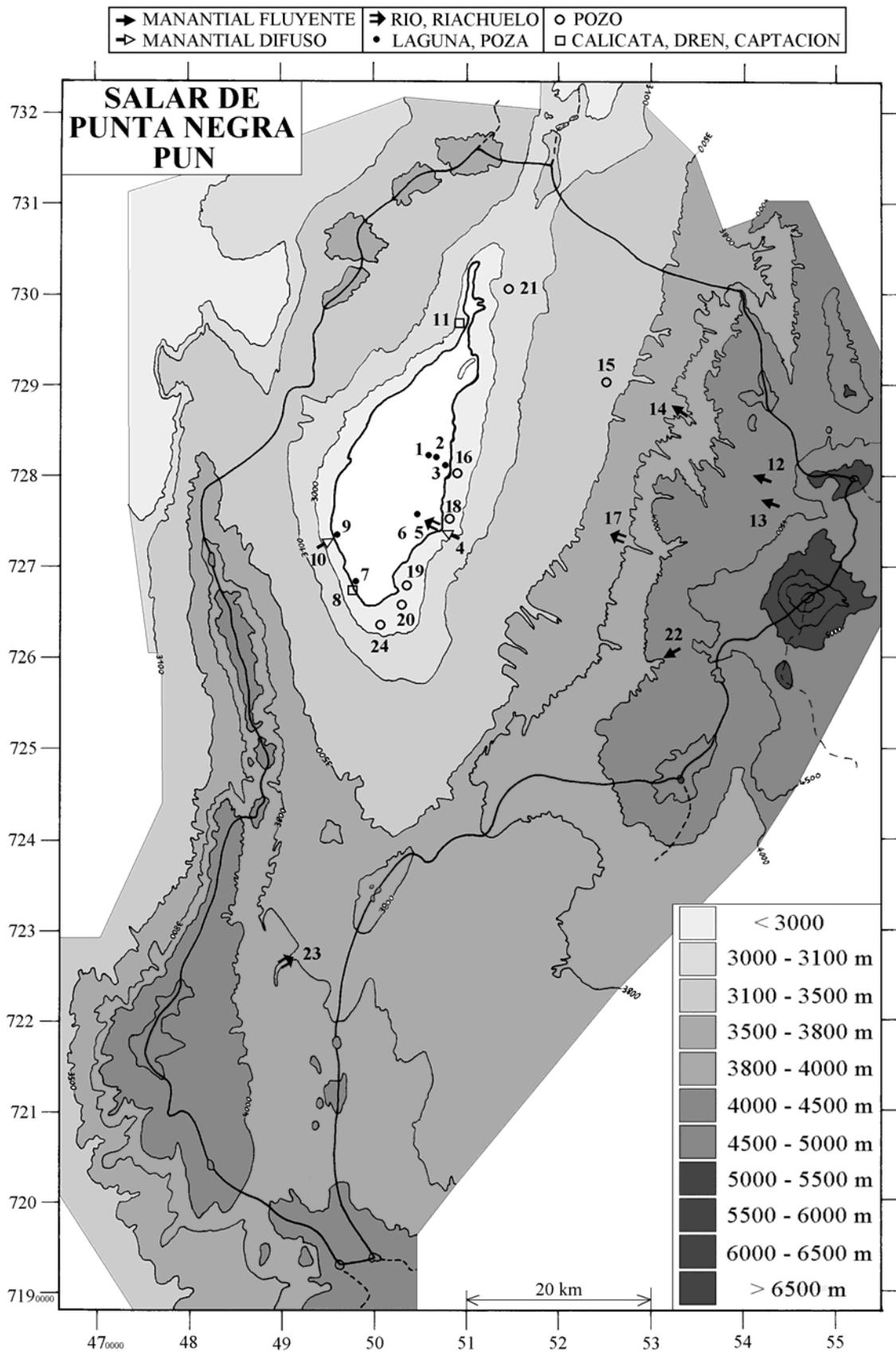
Las aguas de aporte de la cuenca del salar de Punta Negra presentan la particularidad de sufrir una doble salinización por antiguas salmueras o por sales evaporíticas. Las napas más altas en la cuenca disuelven sulfato y cloruro de sodio y evolucionan hacia la vía sulfatada, mientras que las napas más cercanas al salar disuelven cloruro de sodio y de calcio y evolucionan hacia la vía cálcica. Cuando las aguas de aporte no han sido contaminadas por agentes geológicos, tienden a evolucionar hacia la vía carbonatada, reflejando el origen de sus componentes por alteración de rocas volcánicas, o hacia la vía sulfatada cuando drenan terrenos sedimentarios (Río Frío). Las salmueras del salar pertenecen al mega-grupo Na-Ca / Cl, donde la concentración en Ca es superior a la de SO₄. Proviene de la evaporación de las aguas de aportes cálcicas de las napas cerca del salar. El caudal entrante superficialmente de 12 l/s es muy bajo ; corresponde a menos de 1 % de las aguas que caen sobre la cuenca. Se plantea el problema de la pérdida de estas aguas. Puede haber varias napas sobrepuestas en la cuenca. La salinización de las napas diluidas de la cuenca, asociada al escaso caudal superficial entrante al salar, no ofrecen buenas perspectivas para una explotación intensa y prolongada de las napas alrededor del salar.

Referencias y estudios anteriores

Minera Escondida Ltda 1995. Resumen sobre la hidrogeología y recursos hídricos en la cuenca de Punta Negra. Informe inédito, Junio de 1995.

Mongard, C. 1984. Hidrogeología del salar de Punta Negra (e Imilac). Tesis de Grado para optar al Título de Geóloga, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología, 232p.

Orellana J. y Ramirez G. 1972. Hidrología general, salar de Punta Negra. CORFO, Departamento de recursos hidráulicos, 24p.



SALAR DE PUNTA NEGRA
PUN

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
PUN-1	24/05/94	13 ^H 15	506460	7284025	2945	Laguna (Esc: VCL-2 o 2L)
PUN-2	24/05/94	14 ^H 15	507325	7283560	2945	Laguna (Esc: 2C)
PUN-3	24/05/94	14 ^H 50	508325	7282310	2945	Laguna (Esc: 2V)
PUN-4	24/05/94	16 ^H 30	507305	7273960	2950	Manantial difuso (Esc: 3S)
PUN-5	24/05/94	17 ^H 00	506525	7274500	2945	Dren (Esc: 3C)
PUN-6	25/05/94	11 ^H 15	504275	7276815	2945	Laguna (Esc: 3L2)
PUN-7	25/05/94	13 ^H 25	499270	7267345	2945	Laguna (Esc: V3L)
PUN-8	25/05/94	13 ^H 40	499240	7267190	2945	Cateo (Esc: V3S)
PUN-9	25/05/94	16 ^H 00	496925	7272770	2945	Laguna (Esc: VCL-4)
PUN-10	25/05/94	16 ^H 20	496810	7272635	2946	Manantial difuso (Vegas)
PUN-11	25/05/94	18 ^H 00	507925	7293925	2960	Pique San Carlos (Esc: VCL-1)
PUN-12	26/05/94	12 ^H 15	542635	7279800	4190	Manantial corriente (Zorras 1)
PUN-13	26/05/94	13 ^H 25	542100	7277250	4190	Manantial corriente (Zorritas)
PUN-14	26/05/94	15 ^H 50	530300	7290000	3520	Manantial corriente (Zorras 2)
PUN-15	26/05/94	14 ^H 30	524275	7291170	3350	Napa (pozo ES-24)
PUN-16	26/05/94	17 ^H 55	508535	7281165	2952	Napa (pozo SF-2)
PUN-17	30/05/94	12 ^H 45	525740	7273255	3610	Vertedero Llullallaco
PUN-18	30/05/94	13 ^H 45	507445	7274950	2953	Napa (pozo SG2)
PUN-19	30/05/94	15 ^H 50	503175	7267270	2953	Napa (pozo UN-19)
PUN-20	30/05/94	16 ^H 30	502325	7265310	2955	Napa (pozo SH-1)
PUN-21	31/05/94	17 ^H 45	515000	7301000	3040	Napa (pozo producción 12)
PUN-22	31/05/94	12 ^H 20	532800	7259850	4080	Manantial corriente Tocomar
PUN-23	31/05/94	16 ^H 30	491250	7227000	3780	Río Frío
PUN-24	31/05/94	18 ^H 15	500585	7263120	2970	Napa (pozo ES-40)

**SALAR DE PUNTA NEGRA
PUN**

NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
PUN-1	11800	5	11,8	1,016	8,17	2,50	11000	7,34	0,737	1490	7,63	52,6	30,5	0,43	5840	641	21,0	726	267
PUN-2	10500	14	7,4	1,010	8,11	1,66	6920	4,56	0,622	854	8,43	33,3	24,8	0,25	3800	391	13,0	413	158
PUN-3	14000	12	5,2	1,008	7,77	1,27	5750	3,75	0,789	624	14,9	27,9	29,7	0,19	3170	320	10,5	305	158
PUN-4	14000	11	6,5	1,008	7,56	1,01	6040	0,911	0,232	252	12,9	8,04	35,6	0,070	3290	252	7,50	315	116
PUN-5	22500	8,5	9,5	1,013	8,18	1,46	10400	1,65	0,274	499	5,84	15,9	35,3	0,13	5410	489	13,5	561	214
PUN-6	70000	5	2,7	1,157	6,94	4,30	142000	9,43	0,569	1600	11,4	135	18,2	0,70	79400	4140	117	3510	1830
PUN-7	11000	14	5,8	1,007	8,05	0,944	5500	0,302	0,119	115	9,80	1,65	13,9	0,075	3270	274	3,80	140	44,0
PUN-8	8750	7	5,6	1,005	8,17	1,19	3980	0,179	0,0591	101	16,8	1,72	20,2	0,050	2420	140	2,96	78,2	23,9
PUN-9	45000	12	6,6	1,030	7,61	0,714	25100	1,37	0,176	672	76,9	10,3	20,5	0,097	11900	680	14,5	3170	311
PUN-10	16800	12	6,0	1,011	7,88	0,352	8450	0,783	0,113	230	36,3	2,63	11,6	0,032	3540	190	3,88	1540	118
PUN-11	3700	6	8,3	1,000	8,01	9,50	1190	0,903	0,195	600	0,087	10,8	47,6	1,4	840	152	5,38	102	143
PUN-12	810	16,5	5,4	1,000	7,02	1,59	75,3	0,190	0,0929	336	4,47	1,86	37,0	0,16	95,2	12,5	0,375	83,4	25,5
PUN-13	1280	3	7,4	1,000	7,71	1,76	184	0,224	0,0476	470	0,047	4,13	33,9	0,056	202	18,8	0,694	107	31,6
PUN-14	5500	9	8,0	1,005	8,08	5,35	1260	2,48	0,339	2020	0,048	23,0	28,8	0,24	1110	104	5,42	305	175
PUN-15	3900	16	0,4	1,000	8,11	1,74	1350	2,52	0,954	427	0,043	17,1	2,49	0,15	819	52,0	2,54	108	61,0
PUN-16	4300	10	na	1,000	7,23	0,684	1560	2,89	0,514	420	8,56	20,0	31,6	0,090	653	89,1	2,64	409	53,0
PUN-17	na	0	10,0	1,002	8,30	1,68	1540	2,53	0,319	288	0,905	30,4	24,1	0,23	800	127	2,87	172	71,0
PUN-18	na	14	2,5	1,002	6,24	0,100	1440	1,65	0,236	240	2,28	9,72	17,2	0,0004	791	104	2,34	158	23,9
PUN-19	na	14	4,2	1,000	9,01	1,59	172	0,061	0,0392	30,0	9,61	0,562	35,6	0,028	127	15,0	0,132	19,2	2,50
PUN-20	na	13	5,7	1,000	9,70	3,62	132	0,074	0,0386	37,1	6,63	0,454	38,9	0,054	175	8,02	0,153	2,51	0,061
PUN-21	na	21	na	1,000	8,07	0,714	230	0,380	0,0320	67,2	6,82	0,919	27,9	0,082	92,0	14,9	0,208	82,2	5,39
PUN-22	na	14	5,5	1,000	7,45	0,887	6,53	0,023	0,0070	19,7	4,77	0,216	33,3	0,011	18,4	3,95	0,007	9,50	1,70
PUN-23	na	2	6,0	1,000	7,14	1,39	17,4	0,028	0,0121	61,2	4,30	0,238	14,5	0,0067	22,1	3,91	0,029	35,3	5,22
PUN-24	na	16	0,5	1,000	8,75	0,245	244	0,181	0,0594	37,2	1,41	0,313	0,616	0,0001	139	9,38	0,132	30,9	2,07

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

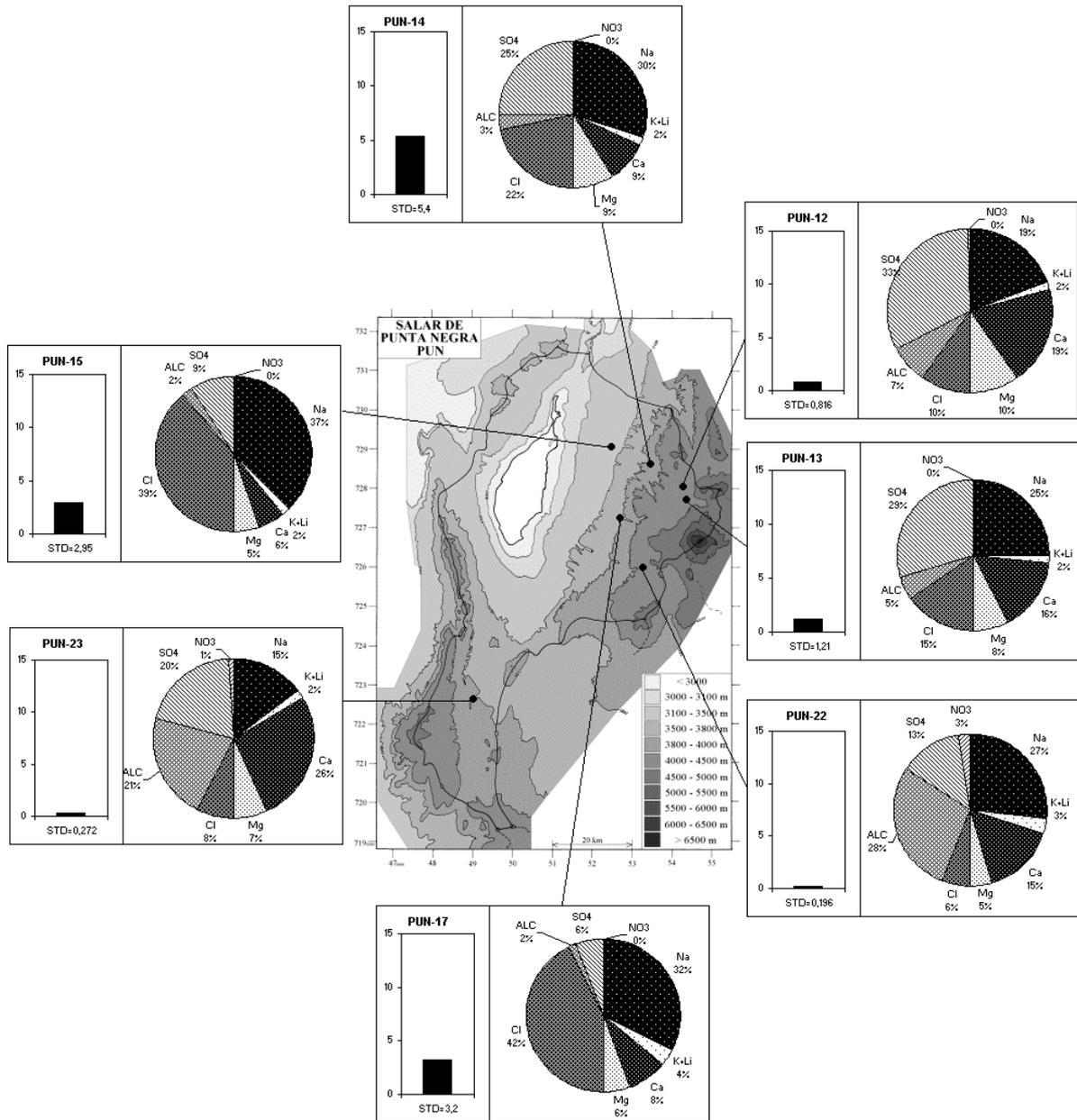
CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

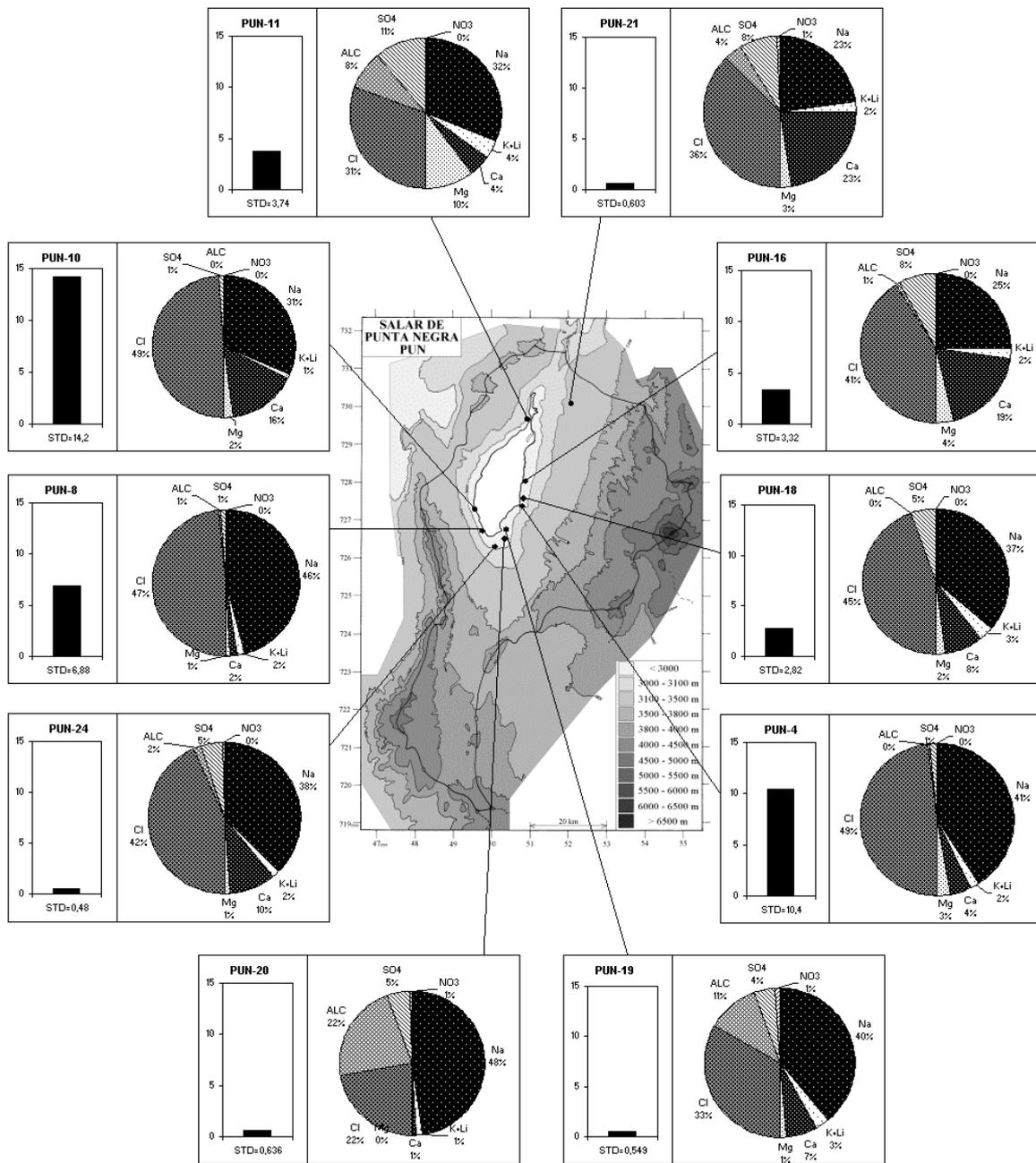
**SALAR DE PUNTA NEGRA
PUN**

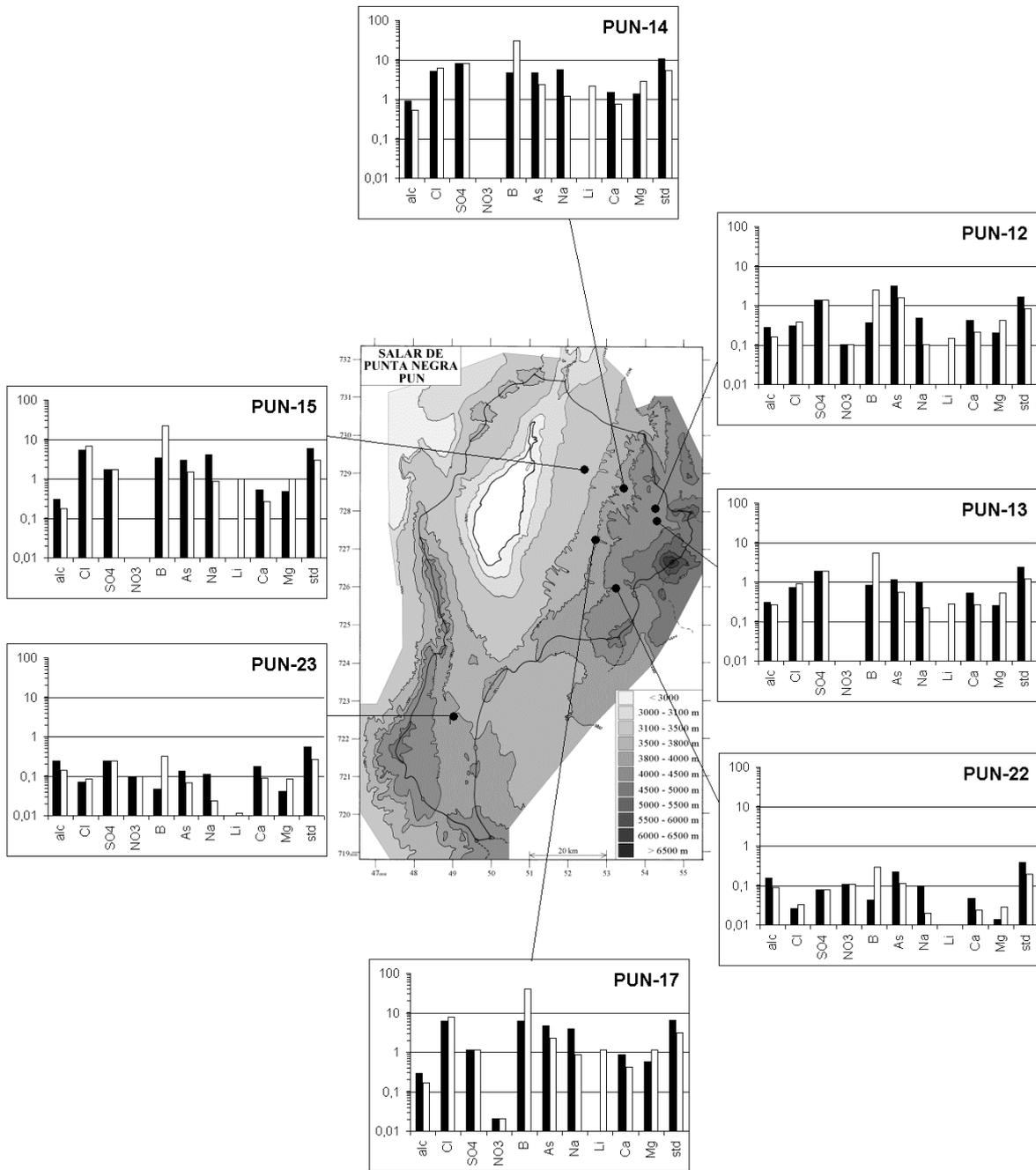
NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF. %
PUN-1	20245	113	3,96	1,2	331,6	342,6	3,3
PUN-2	12750	77,5	2,34	0,79	210,5	214,6	1,9
PUN-3	10532	68,9	0,78	1,6	175,9	176,5	0,4
PUN-4	10432	59,3	0,42	2,3	175,8	176,5	0,4
PUN-5	17815	72,6	2,64	0,70	295,1	306,0	3,6
PUN-6	233344	-	-	-	3899	4048	3,7
PUN-7	9451	54,7	0,84	0,66	160,2	158,5	1,1
PUN-8	6877	69,5	0,96	0,79	114,9	115,6	0,6
PUN-9	41958	37,5	1,14	1,3	719,1	722,0	0,4
PUN-10	14160	18,8	0,66	0,37	245,7	243,7	0,8
PUN-11	3735	561	7,08	9,7	58,07	55,60	4,3
PUN-12	816,4	96,4	0,12	15	10,77	10,78	0,1
PUN-13	1206	106	0,48	4,3	17,32	16,73	3,5
PUN-14	5400	304	6,30	4,0	81,44	82,95	1,8
PUN-15	2945	95,2	1,68	1,1	47,72	48,55	1,7
PUN-16	3325	40,1	0,12	3,9	55,82	53,49	4,3
PUN-17	3197	84,2	1,74	0,92	52,89	51,10	3,5
PUN-18	2818	6,10	0,0	5,3	47,25	45,74	3,2
PUN-19	548,5	78,7	4,80	0,13	7,067	7,211	2,0
PUN-20	636,0	129	30,2	0,04	7,977	8,209	2,9
PUN-21	602,9	40,9	0,60	0,53	8,954	8,704	2,8
PUN-22	195,7	53,7	0,06	3,4	1,516	1,558	2,7
PUN-23	271,5	84,8	0,06	15	3,254	3,224	0,9
PUN-24	480,3	13,2	0,54	0,04	8,009	7,904	1,3

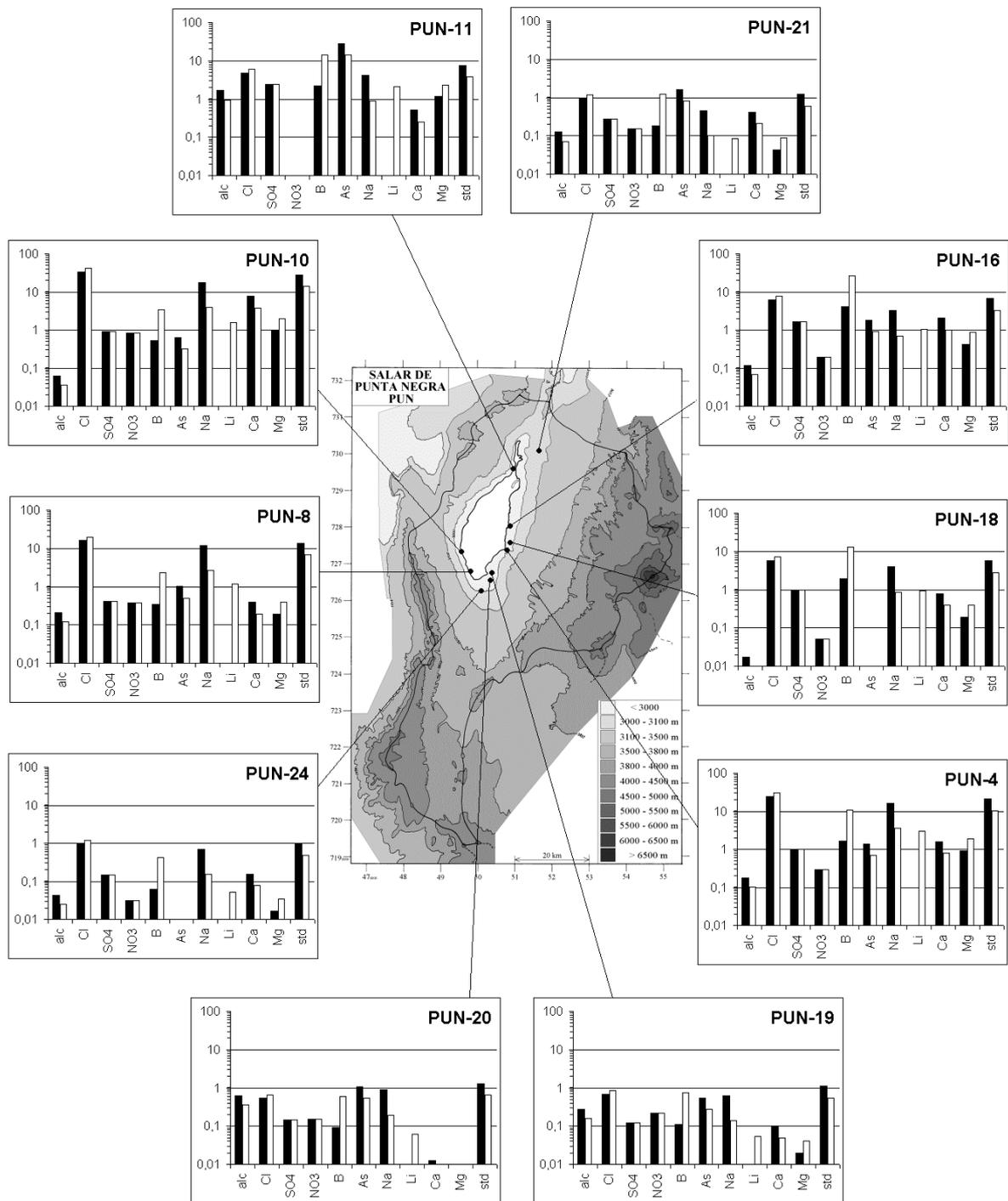
Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.

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





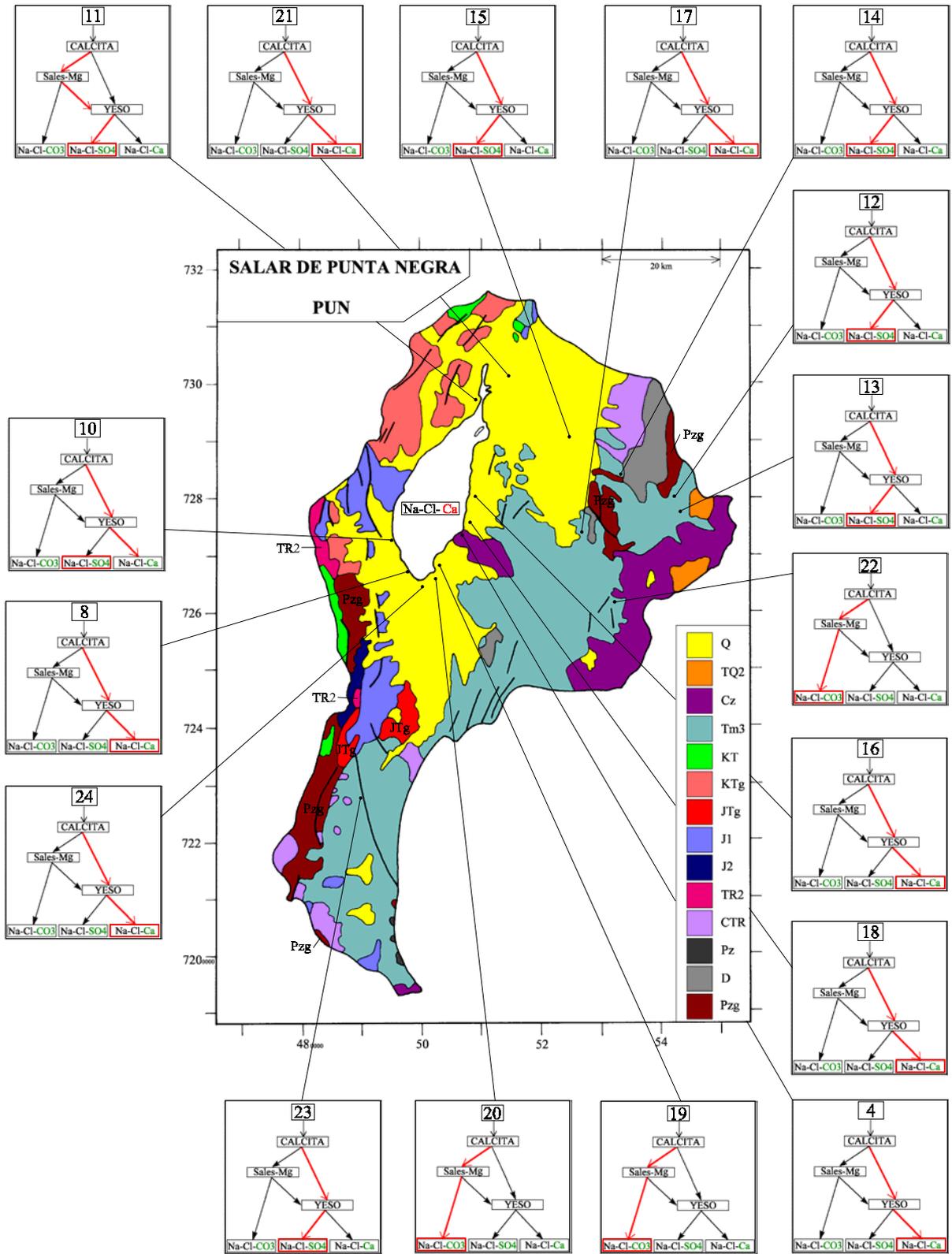




MAPA GEOLOGICO
Y
VIAS EVOLUTIVAS

PUN

- 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.
- Cz** : *Cenozoico*. Rocas volcánicas: dacitas - andesitas.
- Tm3** : *Mioceno*. Gravas de Atacama. Gravas, arenas y limos subordinados, localmente con litificación incipiente e intercalaciones de ignimbritas.
- 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.
- KTg** : *Cretácico sup. - Terciario inf.* Rocas plutónicas e hipabisales.
- Jtg** : *Jurásico sup. - Terciario inf.* Rocas plutónicas e hipabisales.
- J1** : *Jurásico*. Areniscas, areniscas calcáreas, calizas, margas, lutitas, conglomerados y cherts. Desarrollo de facies evaporíticas en el Jurásico sup. de la Cordillera de los Andes.
- 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.
- TR2** : *Triásico medio - Triásico sup.* Rocas sedimentarias y/o volcánicas. Areniscas, conglomerados y lutitas, localmente con flora fósil. Coladas y brechas riolíticas y andesíticas.
- CTR** : *Carbonífero - Triásico (?)*. Tobas, brechas, coladas e ignimbritas principalmente riolíticas y dacíticas, con intercalaciones de sedimentitas clásticas. Cuerpos hipabisales dacíticos y riolíticos asociados.
- Pz** : *Paleozoico (?)*. Metareniscas, pizarras, filitas, esquistos, metabasitas, serpentinitas, gneisses y anfibolitas.
- D** : *Devónico*. Cuarzitas, filitas, pizarras, esquistos, lutitas y conglomerados. Facies marinos y transicionales.
- Pzg** : *Paleozoico*. Rocas plutónicas e hipabisales.



SALAR DE AGUAS CALIENTES 4

Introducción

El salar de Aguas Calientes 4 se encuentra en el sur de la Segunda Región. Su cuenca colinda con las del salar de Punta Negra y del salar de Pajonales. El imponente volcán Lullailaco (6739 m) cierra su cuenca al norte. En el mapa topográfico se nota la existencia de una sub-cuenca de 150 km² al este, como una depresión cerrada ubicada 600 m más arriba que el salar. Se puede discutir la incorporación de esta importante sub-cuenca en la cuenca del salar. Sin embargo, la ausencia de una laguna o de un salar en el fondo de la depresión indica que las aguas que drenan la sub-cuenca no se acumulan en su fondo, sino que se infiltran en las formaciones superficiales probablemente hacia la vecina cuenca del salar 600 m más abajo. Las principales características morfológicas y climatológicas del salar son:

- altura: 3665 m
- superficie de la cuenca: 656 km² (incluida la sub-cuenca oriental de 150 km²)
- superficie del salar: 19,5 km²
- superficie de las lagunas: 1 - 3 km²
- precipitaciones: 180 mm/año
- evaporación potencial: 1630 mm/año
- temperatura media: 2°C

No hemos encontrado vertientes cuenca arriba; todas están pegadas a las orillas este y norte del salar donde alimentan varias lagunas someras conectadas entre sí y de extensión muy variable. Durante nuestra campaña, en marzo de 1996, las lagunas tenían una superficie por lo menos tres veces superior a la figurada en el mapa topográfico del IGM. El salar es de tipo "playa" con una napa de salmuera subterránea a 1 - 2 m de profundidad. Es una boratera donde se ha explotado la ulexita (NaCaB₅O₉·8H₂O), cuyo campamento estaba desocupado a la fecha de nuestra visita.

Composición de aguas y salmueras

Las composiciones de aguas del salar de Aguas Calientes 4 están presentadas en la figura 1 y en la tabla 1. Hemos encontrado 3 vertientes difusas y 2 fluyentes de tipo termal. El aporte más diluido tiene una salinidad de 0,85 g/l y el más concentrado de 2 g/l. Las vertientes (9) y (10) presentan una influencia termal que dio su nombre al salar. Se puede distinguir en los diagramas triangulares dos tipos de aporte:

- las vertientes al este del salar (1 y 9) son globalmente de tipo Na-Ca / SO₄-Cl con leves concentraciones en Mg y HCO₃. Tienen un alto contenido en SO₄ y Ca.
- las vertientes al norte del salar (4, 8, 10) contienen menos SO₄ y Ca; son globalmente de tipo Na-(Ca) / Cl-(SO₄) y un contenido en Mg un poco más elevado que en las aguas de las vertientes orientales.

Estos dos tipos, que se diferencian por sus porcentajes de SO₄ y Ca, aparecen también nitidamente en los diagramas circulares. Cabe recalcar que no aparece ninguna relación entre hidrotermalismo y tipo químico.

<u>APORTES</u>	<u>SALINIDAD</u> mg/l	<u>TIPO QUÍMICO</u>		<u>VÍA EVOLUTIVA</u>
		Cationes	Aniones	
AC4-9	851	Na-Ca-(Mg)	/ SO ₄ -Cl-(HCO ₃)	SO ₄ (N)
AC4-10	1620	Na-(Ca)-(Mg)	/ Cl-SO ₄ -(HCO ₃)	SO ₄ (N)
AC4-1	1808	Na-Ca-(Mg)	/ SO ₄ -Cl	SO ₄ (N)
AC4-4	2068	Na-(Ca)-(Mg)	/ Cl-(SO ₄)	SO ₄ (N)
AC4-8	2074	Na-(Ca)-(Mg)	/ Cl-(SO ₄)	SO ₄ (N)
LAGUNAS				
AC4-3	9350	Na-(Ca)-(Mg)	/ Cl-SO ₄	SO ₄
AC4-5	21170	Na-(Ca)-(Mg)	/ Cl-(SO ₄)	SO ₄
AC4-2	32789	Na-(Mg)-(Ca)	/ Cl-SO ₄	SO ₄
AC4-6	68899	Na-(Mg)-(Ca)	/ Cl-(SO ₄)	SO ₄
AC4-7	341759	Na-(Mg)	/ Cl-(SO ₄)	SO ₄

Tabla 1 : Salinidades, tipos químicos y vías evolutivas de aguas del salar de Aguas Calientes 4. SO₄ (N) = vía neutra sulfatada.

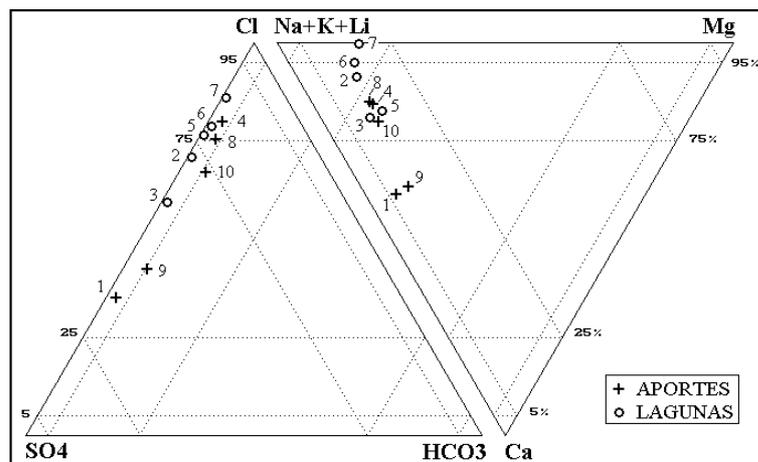


Fig.1: Composición de aguas y salmueras del salar de Aguas Calientes 4.

Todas las aguas de lagunas tienen más sulfato que calcio. Pertenecen todas al mega-grupo Na / Cl-SO₄ con variaciones en los contenidos de Ca y Mg.

Origen de los componentes disueltos

La mejor relación de equimolaridad entre componentes mayores que se haya encontrado es entre Na+Mg y Cl (Fig.2). Las vertientes del norte del salar (4, 8 y 10) tienen sus puntos representativos muy cerca de la recta de equimolaridad Na+Mg = Cl, lo que sugiere una salinización de aguas diluidas por antiguas evaporitas o salmueras de cloruro de sodio y de magnesio. Las vertientes de la orilla este, al contrario, tienen sus puntos netamente por encima de

la recta. Para las dos aguas de aporte (1 y 9), de alto contenido en SO_4 y Ca, no se ha podido encontrar ninguna relación equimolar entre componentes que hubiera permitido sospechar una contribución de antiguas evaporitas. Su composición porcentual es más parecida a la de aguas de alteración de rocas volcánicas con azufre; pero su salinidad relativamente alta es difícil de explicar. Podría tratarse del producto de la lixiviación de rocas por aguas acidificadas por disolución de azufre, la acidez quedando neutralizada por la alteración de los silicatos.

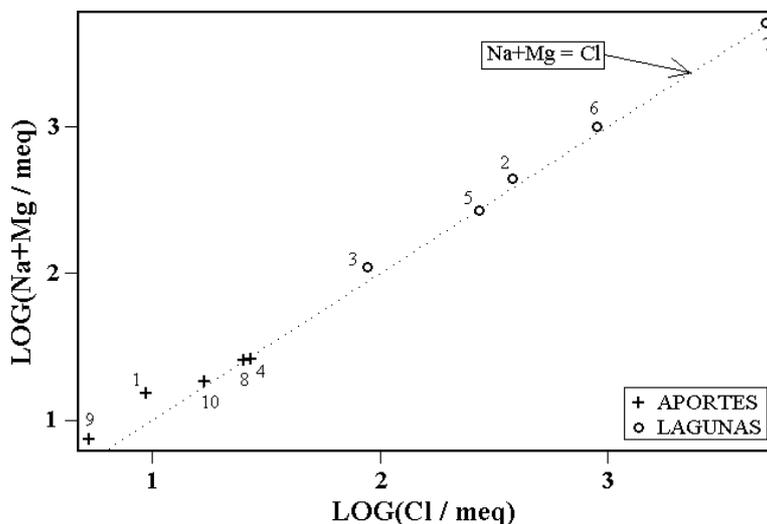


Fig.2 : Relación entre Na+Mg y Cl en aguas del salar de Aguas Calientes 4

Vías evolutivas y relación con la geología

Todas las aguas siguen la vía evolutiva neutra sulfatada. Esa vía es consistente con la geología de la cuenca constituida por formaciones volcánicas con azufre. Existen depósitos de azufre en el volcán Lullallaico y en las serranías del sur-este de la cuenca. Sin embargo, la salinidad elevada de los aportes del norte del salar no refleja la litología de la cuenca, sino la existencia de evaporitas o salmueras residuales de un antiguo salar recubierto por formaciones volcánicas más recientes.

Evolución cuantitativa de aguas

Veamos ahora la evolución cuantitativa de las aguas de aporte cuando se evaporan. La tabla 2 presenta la composición calculada de todas las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta la salinidad de las diversas lagunas. 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 (AC4-xE) y las lagunas (AC4-x.EQ). Todas las composiciones de las lagunas fueron ajustadas al equilibrio con los minerales que las sobresaturan.

Se nota primero los muy bajos coeficientes de desviación (0,003 - 0,018) de los aportes evaporados que mejor se ajustan a las respectivas lagunas. Hay excelente adecuación entre las composiciones de las lagunas y de los aportes evaporados. La laguna oriental (2 y 3) proviene principalmente de la vertiente fluvente (9) en la orilla este. Contribuyen de manera secundaria las vertientes vecinas (1 y 10). La pequeña laguna (5) proviene de la evaporación de la vertiente

difusa (4) que la alimenta. La gran laguna central (6) y la napa subterránea (7) provienen de la vertiente fluyente (10) al norte del salar, con influencia secundaria de la vertiente difusa (8). En resumen, el sistema lagunar de Aguas Calientes 4 esta alimentado por las dos vertientes fluyentes y termales (9 y 10). Las vertientes difusas tienen un papel secundario. La vertiente fluyente (10), al norte del salar, parece tener más influencia, y por tanto más caudal, que la vertiente fluyente (9) que alimenta solamente la pequeña laguna pegada a la orilla este.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV. 0
<u>AC4-3.EQ</u>	8,11	0,986	3110	2800	36,6	29,8	2210	264	7,57	540	194	
AC4-9E	8,07	0,940	2710	3260	39,7	32,5	2040	269	6,70	608	236	0,013
AC4-1E	8,10	0,950	2350	3660	31,4	32,6	2190	287	5,14	550	158	0,037
AC4-10E	8,11	1,15	3720	2070	60,4	32,3	2260	278	10,4	466	231	0,053
AC4-4E	8,13	1,01	4490	1310	32,6	32,2	2450	282	8,33	392	251	0,087
AC4-8E	8,15	1,25	4160	1570	57,7	32,3	2400	304	9,86	360	241	0,091
<u>AC4-2.EQ</u>	8,12	2,38	13300	7030	167	27,4	8790	1140	32,5	750	836	
AC4-9E	8,15	2,66	11300	9130	165	30,0	8480	1120	27,9	640	981	0,018
AC4-10E	8,05	2,71	14100	5820	230	29,6	8610	1060	39,7	890	878	0,022
AC4-8E	8,02	2,37	14900	5050	207	29,5	8630	1090	35,4	1000	865	0,027
AC4-4E	7,97	1,51	16000	4250	116	29,3	8740	1000	29,6	1190	893	0,064
AC4-1E	8,19	2,44	9630	11000	129	30,4	8970	1170	21,0	562	647	0,070
<u>AC4-6.EQ</u>	8,08	6,15	31800	10700	468	23,3	19300	2370	79,2	950	2010	
AC4-10E	8,01	6,07	31600	10600	514	25,4	19300	2360	88,7	967	1960	0,003
AC4-8E	7,98	5,30	33500	8660	465	25,2	19400	2450	79,5	1140	1940	0,009
AC4-9E	8,15	5,86	24900	18400	365	26,4	18700	2480	61,6	667	2170	0,061
AC4-4E	7,94	3,16	36100	6650	262	24,8	19700	2270	66,9	1440	2020	0,076
AC4-1E	8,21	5,16	21100	22600	282	27,1	19700	2580	46,2	595	1420	0,155
<u>AC4-5.EQ</u>	8,01	1,13	9470	3420	71,1	27,0	5150	556	15,7	986	603	
AC4-4E	8,02	1,17	9880	2880	71,6	30,8	5400	621	18,3	841	552	0,012
AC4-8E	8,05	1,65	9160	3450	127	30,9	5290	669	21,7	769	530	0,055
AC4-10E	8,04	1,70	8460	4190	137	31,0	5150	633	23,7	828	525	0,071
AC4-9E	8,12	1,71	6820	6080	99,9	31,3	5130	678	16,9	624	593	0,080
AC4-1E	8,16	1,64	5850	7180	78,1	31,5	5450	713	12,8	551	393	0,136
<u>AC4-7.EQ</u>	5,91	7,51	181000	23000	2700	4,91	93600	16300	525	321	12100	
AC4-10E	6,35	4,18	176000	29800	2290	5,56	98200	13100	493	311	10900	0,018
AC4-8E	6,46	4,19	177000	29100	2000	5,54	99999	12900	420	316	10300	0,030
AC4-9E	6,58	5,51	172000	34800	1850	5,60	89300	17100	424	293	14900	0,044
AC4-1E	6,68	4,97	173000	32900	1670	5,91	92400	21100	377	321	11600	0,058
AC4-4E	6,91	5,70	190000	18100	1170	4,99	103000	11900	351	422	10600	0,107

Tabla 2 : Comparación de las aguas de aporte evaporadas con las lagunas del salar de Aguas Calientes 4. ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

Calidad de aguas

Ningún agua de aporte cumple con las normas chilenas de potabilidad o de riego. La menos mala es la vertiente fluyente (9) que contiene 4 veces más arsénico y 3 veces más boro que los máximos permitidos en las normas respectivas. Podría consumirse esta agua en caso de necesidad absoluta, pero no el agua de la principal vertiente (10) que contiene 10 veces más arsénico que la norma potable y una salinidad casi doble (1,6 g/l) que la vertiente (9): (0,85 g/l).

Balance hídrico

Podemos establecer un orden de magnitud del balance hídrico de la laguna principal del salar asumiendo que su alimentación proviene de la vertiente fluyente 10 y que su superficie promedio es de 2 km². Se utiliza el cloruro como elemento conservativo. Los parámetros considerados son :

- H_e = 1,63 m/año
- H_p = 0,18 m/año
- S = 2 km²
- C_{ap} = 0,6 g/l
- C_L = 31,7 g/l

Volumen de aporte : $V_{ap} = S(H_e - H_p) / (1 - C_{ap} / C_L) = 2\,960\,000 \text{ m}^3/\text{año} = 94 \text{ l/s}$

Volumen de infiltraciones : $V_i = S(H_e - H_p) / (1 - C_L / C_{ap}) = 56\,000 \text{ m}^3/\text{año} \sim 2 \text{ l/s}$

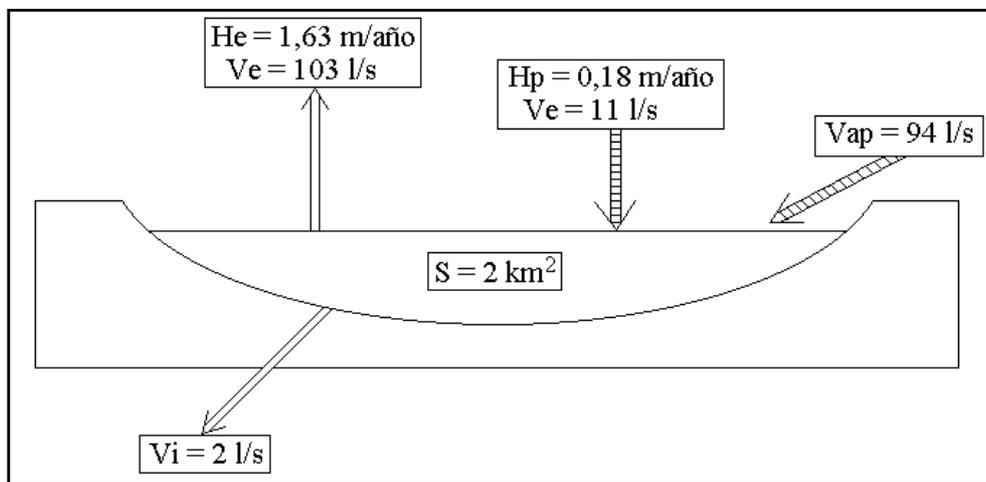
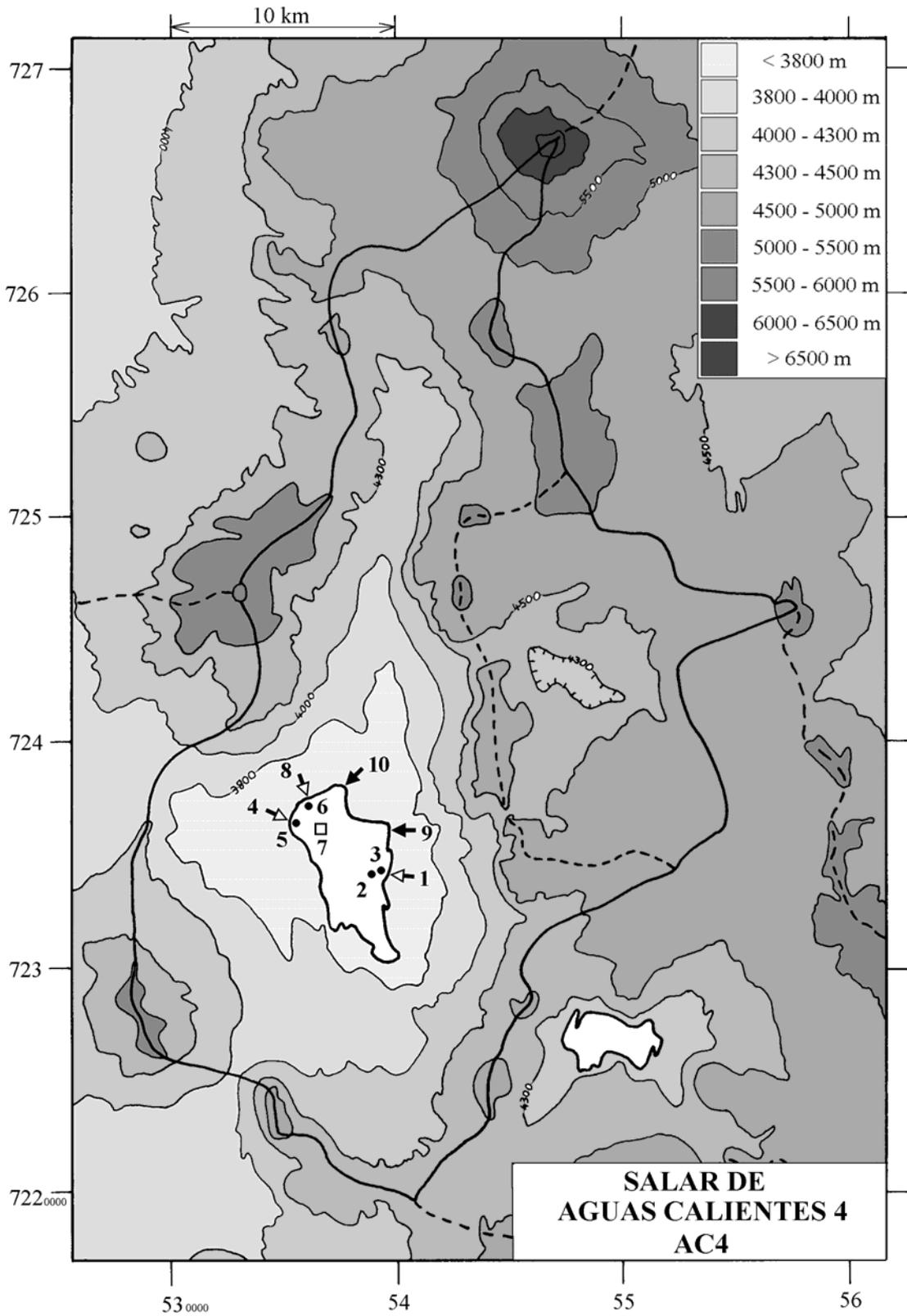


Fig.1 : Balance hídrico de la principal laguna del salar de Aguas Calientes 4.

El orden de magnitud de los aportes superficiales al salar es entonces de unos 90 - 100 l/s.

Conclusiones

El salar de Aguas Calientes 4 recibe dos tipos de aguas de aporte representado cada uno por una vertiente termal fluyente. Por el norte entran aguas salobres que han redissuelto antiguas evaporitas o salmueras de tipo Na-Mg / Cl. Las aguas de aporte del este de la cuenca, también salobres, podrían provenir de la lixiviación de rocas volcánicas por aguas ácidas, neutralizadas por la alteración de silicatos. Ningún agua cumple con las normas chilenas de potabilidad o de riego, aunque los aportes orientales no sobrepasan en mucho los límites permitidos. El caudal superficial entrante, relativamente elevado, de unos 90 - 100 l/s, sugiere la existencia de napas explotables al norte y al este de la cuenca. Sin embargo, es posible que estén también contaminadas por antiguas evaporitas.



**SALAR DE AGUAS CALIENTES 4
AC4**

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
AC4-1	26/03/96	16 ^H 00	539616	7234884	3666	Manantial difuso
AC4-2	26/03/96	15 ^H 35	539429	7234865	3665	Poza de preconcentración
AC4-3	26/03/96	15 ^H 45	539566	7234884	3665	Poza de preconcentración
AC4-4	27/03/96	10 ^H 30	535398	7236784	3666	Manantial difuso
AC4-5	27/03/96	10 ^H 37	535419	7236763	3665	Laguna
AC4-6	27/03/96	11 ^H 00	536159	7237020	3665	Laguna
AC4-7	27/03/96	11 ^H 15	536212	7236611	3665	Napa del salar (calicata)
AC4-8	27/03/96	11 ^H 45	536305	7237498	3666	Manantial difuso (bofedal)
AC4-9	27/03/96	12 ^H 15	539761	7236148	3670	Manantial corriente
AC4-10	27/03/96	12 ^H 40	537930	7237990	3668	Manantial corriente termal

**SALAR DE AGUAS CALIENTES 4
AC4**

NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
AC4-1	2490	9,8	5,6	1,002	8,38	0,655	333	0,403	0,083	812	3,19	4,45	32,5	0,340	306	40,7	0,729	207	22,4
AC4-2	40800	11,4	5,0	1,026	8,31	5,07	13500	15,4	0,558	7250	0,533	166	33,9	9,29	8630	1140	32,5	898	836
AC4-3	12760	11,1	na	1,008	8,85	2,06	3130	3,44	0,310	2800	0,099	36,6	33,3	2,25	2190	264	7,56	561	194
AC4-4	3370	3,9	4,0	1,002	7,63	1,14	962	0,967	0,140	274	5,88	6,81	33,0	0,095	499	59,0	1,74	101	52,5
AC4-5	28500	3,7	4,5	1,017	8,57	3,19	9620	10,3	0,579	3840	1,38	71,0	27,0	1,00	5040	555	15,7	1200	603
AC4-6	80200	5,4	4,0	1,050	8,16	15,7	31700	36,6	1,01	10800	0,415	468	55,2	14,5	19400	2370	79,1	1160	2010
AC4-7	199100	11,5	0,2	1,235	6,82	62,8	175000	192	4,19	36000	1,04	2590	23,9	54,5	95500	15700	504	308	12300
AC4-8	3290	9,5	4,2	1,002	7,34	1,36	895	1,25	0,203	329	3,48	12,1	44,0	0,230	490	63,7	2,07	97,4	50,5
AC4-9	1212	20,9	4,5	1,001	7,75	0,708	185	0,221	0,026	312	3,61	2,71	31,6	0,200	141	18,4	0,458	92,6	16,1
AC4-10	2460	24,3	4,7	1,001	6,83	1,53	600	0,815	0,157	328	3,41	9,60	42,6	0,459	354	44,2	1,66	101	36,7

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

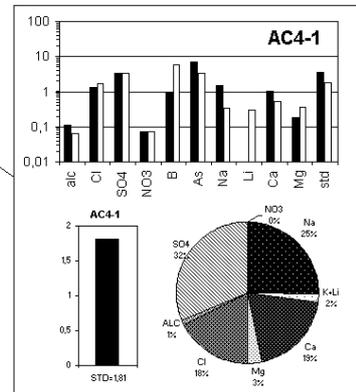
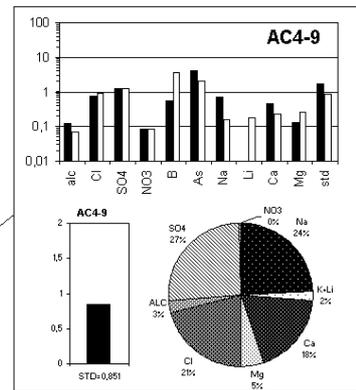
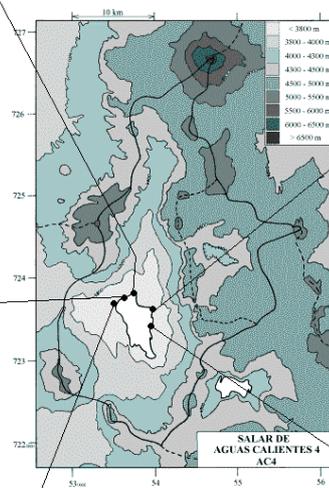
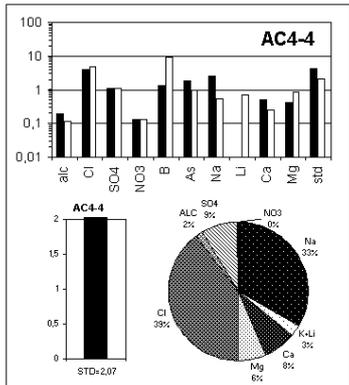
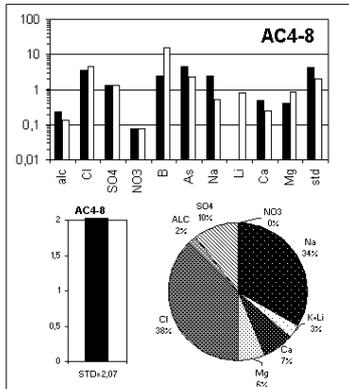
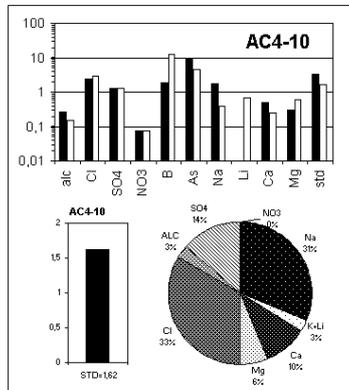
CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF. %	NUMERO	$\delta^{18}O$	δ^2H
AC4-1	1808	33,4	1,02	0,24	26,61	27,02	1,5	AC4-9	-6,49	-59
AC4-2	32790	119	9,00	0,70	522,4	536,1	2,6	Análisis de oxígeno-18 y deuterio		
AC4-3	9350	35,9	5,76	0,08	147,1	148,8	1,1			
AC4-4	2068	68,3	0,24	3,1	32,80	34,04	3,7			
AC4-5	21171	77,5	9,18	0,34	345,1	354,2	2,6			
AC4-6	68899	457	34,7	4,2	1137	1132	0,5			
AC4-7	341759	-	-	-	5651	5743	1,6			
AC4-8	2074	81,7	0,18	6,2	32,25	33,48	3,7			
AC4-9	851,2	41,4	0,30	1,1	12,59	12,49	0,9			
AC4-10	1620	92,7	0,12	18	24,83	25,33	2,0			

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

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

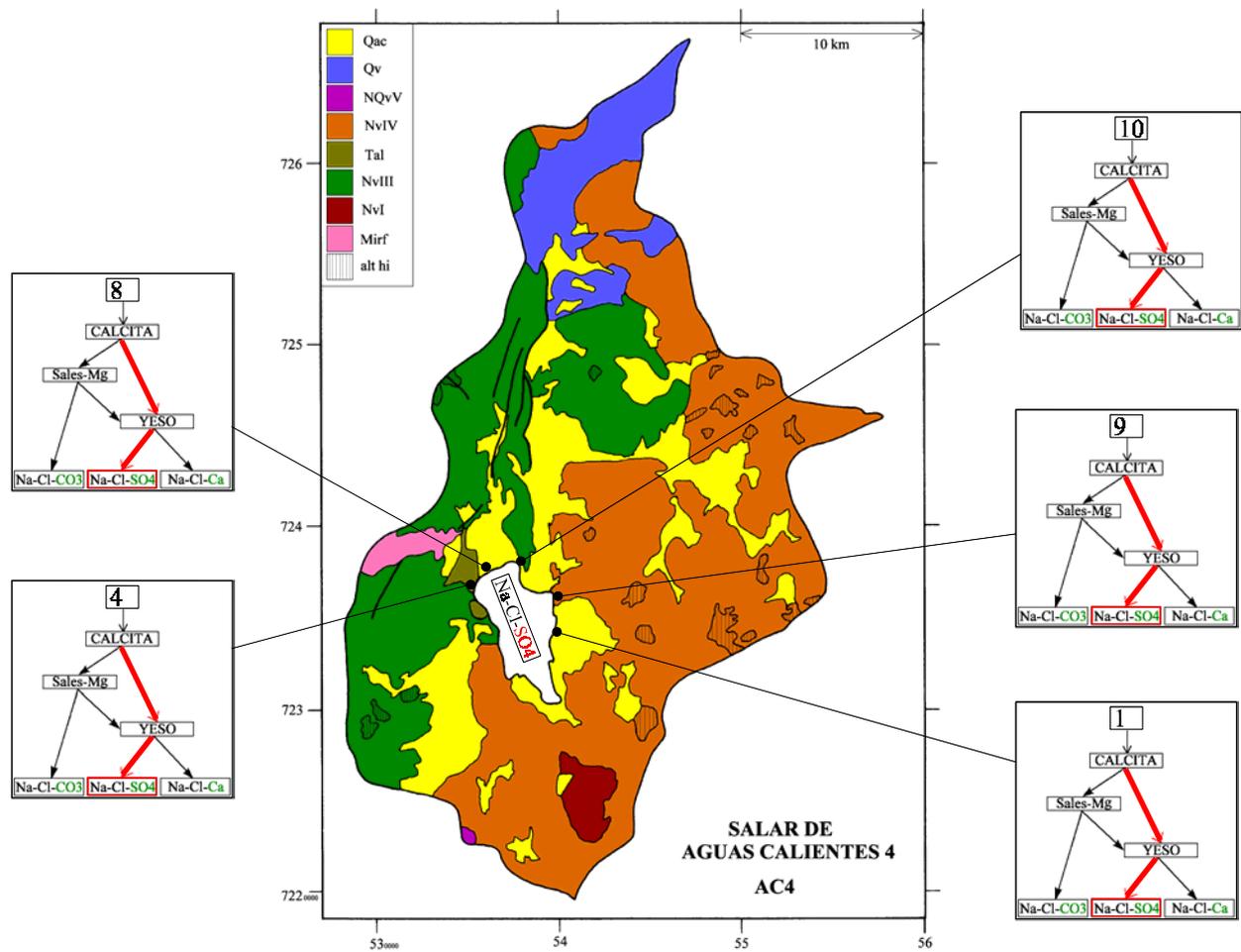
DIF.% = diferencia en %



MAPA GEOLOGICO Y VIAS EVOLUTIVAS

AC4

- Qac** : *Cuaternario*. Depósitos aluviales y coluviales: bloques, gravas y arenas con cenizas, arcillas y sales.
- Qv** : *Cuaternario*. Estrato-volcán Llullaillaco. Dacitas de hornblenda (plg, hb, bi, opx, qz; SiO₂ = 63,4-66,8 %).
- NQvV** : *Plioceno sup. - Pleistoceno inf.* Conjunto volcánico V: Lavas bien preservadas de andesitas y dacitas de piroxeno y biotita, ocasionalmente hornblenda.
- NvIV** : *Mioceno sup. - Plioceno inf.* Conjunto volcánico IV: estrato-volcanes y conos de escoria debilmente erosionados. Andesitas de dos piroxenos y dacitas de piroxeno y biotita. Ocasionalmente andesitas basálticas de olivino y piroxeno.
- Tal** : *Mioceno sup. - Plioceno*. Depósitos aluviales y coluviales antiguos. Gravas con lentes de arena y limo e intercalaciones de ceniza volcánica. En zona de fallas, localmente las gravas ocurren cementadas por carbonatos y con niveles de travertino.
- NvIII** : *Mioceno medio - Mioceno sup.* Conjunto volcánico III: estrato-volcanes mediana a debilmente erosionados. Andesitas de dos piroxenos, andesitas basálticas de olivino y piroxeno. Escasas dacitas de hornblenda y biotita.
- NvI** : *Oligoceno - Mioceno inf.* Conjunto volcánico I: estrato-volcanes rofundamente erosionados. Andesitas de ortopiroxeno y clinopiroxeno con daciandesitas de hornblenda y/o biotita y piroxeno. Ocasionalmente andesitas basálticas de ortopiroxeno y olivino.
- Mirf** : *Mioceno inf.* Ignimbrita Río Frío. Tobas dacíticas ricas en cristales (plg, anf, px, bi).
- alt hi** : alteración hidrotermal.



LAGUNA DE LA AZUFRERA

Introducción

La laguna de la Azufrera (que no hay que confundir con *el salar* de la Azufrera en la Tercera Región) se encuentra en el sur de la Cordillera de los Andes en la Segunda Región, pegada a la frontera con Argentina donde se desarrolla una pequeña parte de su cuenca. Al oeste, es un salar de tipo "playa" con sedimentos salinos recubiertos por la laguna de poca profundidad en este sector. Al este, la laguna es más profunda: es casi un lago. El nombre de la laguna se debe a un importante yacimiento de azufre en el volcán Azufre o Lastarria al sur de la laguna, del cual emanan constantes fumarolas. Las principales características morfométricas y climatológicas de la laguna son:

- altura:	4250 m
- superficie de la cuenca:	393 km ²
- superficie de la playa y laguna:	7,7 km ²
- superficie de la laguna:	3 - 4 km ²
- precipitaciones:	180 mm/año
- evaporación potencial:	1630 mm/año
- temperatura media:	1°C

Hemos muestreado dos aportes, una vertiente fluyente, al sur-este, que entra directamente en la gran laguna y una difusa, al oeste, que alimenta un riachuelo en el sector playa. Hemos podido observar un gran bofedal a la orilla oriental de la laguna, indicando la existencia de una vertiente difusa, pero no hemos podido llegar allí por problemas en el camino.

Composición de aguas y salmueras

Las composiciones de aguas de la laguna de la Azufrera están presentadas en la figura 1 y en la tabla 1. Los dos aportes son salobres (~ 4 g/l) y de composición muy distinta. El punto representativo de la vertiente difusa (4) se encuentra casi al centro del triángulo de cationes, siendo el magnesio el componente mayor. Es una de las aguas con mayor proporción de Mg de todos los salares chilenos que hemos estudiado. Su principal anión es el sulfato.

<u>APORTES</u>	<u>SALINIDAD</u> mg/l	<u>TIPO QUÍMICO</u>		<u>VIA EVOLUTIVA</u>
		Cationes	Aniones	
LAZ-4	3965	Mg-Na-Ca	/ SO ₄ -Cl	SO ₄ (N)
LAZ-1	4257	Na-(Mg)-(Ca)	/ Cl-SO ₄	SO ₄ (N)
<u>SALMUERAS</u>				
LAZ-3	16579	Mg-Na-(Ca)	/ Cl-SO ₄	SO ₄
LAZ-2	158853	Na-(Mg)	/ Cl-SO ₄	SO ₄

Tabla 1 : Salinidades, tipos químicos y vías evolutivas de aguas de la laguna de la Azufrera. SO₄ (N) = vía neutra sulfatada.

El agua de la vertiente fluyente tiene una composición más común: Na / Cl-SO₄ con proporciones menores de Ca y Mg. Se debe notar también la baja alcalinidad (HCO₃) de los aportes. La composición de las soluciones salinas refleja cualitativamente la de su respectivo aporte (4→3 y 1→2), sin ser cuantitativamente igual. Las dos pertenecen al mega-grupo de salmueras sulfatadas.

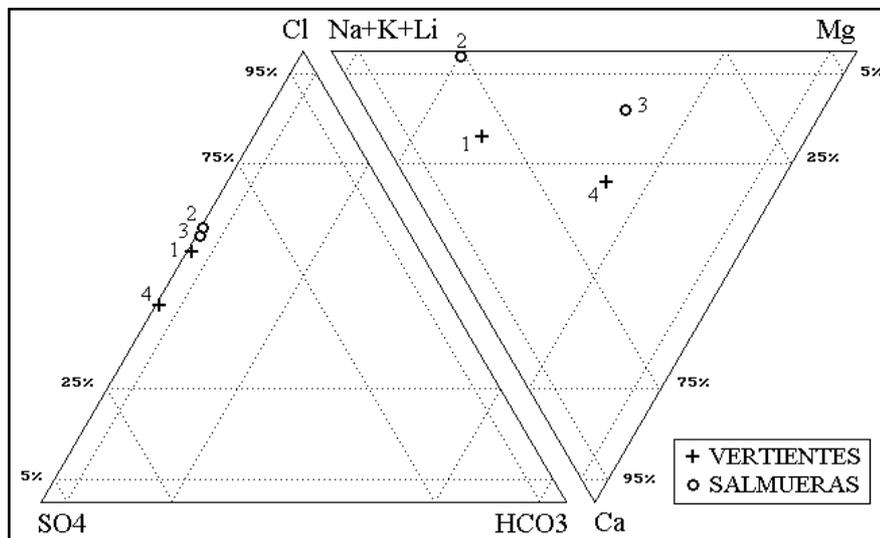


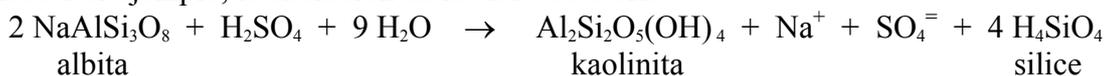
Fig.1: Composición de aguas y salmueras en laguna de la Azufrera.

Origen de los componentes disueltos

Consideremos primero la vertiente difusa (4). El sulfato constituye el 43% de la salinidad total (en mg/l). No se observa ninguna relación equimolar entre los componentes mayores SO₄, Cl, Na, Ca, Mg. La alta salinidad del aporte (4 g/l) no se debe entonces a la redisolución de antiguas evaporitas, lo que se traduciría por relaciones equimolares entre algunos componentes mayores. Por otra parte, la vertiente se encuentra lejos de la laguna, lo que excluye la contaminación de aguas diluidas por una cuña salina. Además, las concentraciones porcentuales de la vertiente y del vecino riachuelo evaporado son distintas (ver diagrama triangular). Lo que tenemos por tanto, es un agua de lixiviación de rocas volcánicas por soluciones ácidas producidas por la oxidación del azufre al contacto con aguas meteóricas. La reacción de oxidación es:



La oxidación del azufre produce entonces ácido sulfúrico que altera fuertemente las rocas volcánicas. Por ejemplo, la alteración de la albita se escribe:



La alteración de este mineral produce sodio además del sulfato. Por otra parte, la acidez puede ser neutralizada en el agua de alteración, elevando su pH. El pH del agua de la vertiente es de 8,65, pero su alcalinidad es muy baja: 0,52 meq/l, lo que refleja bien la poca importancia del ácido carbónico en los procesos de alteración en la cuenca de la laguna de la Azufrera.

El caso de la otra vertiente (LAZ-1) es más complejo. Contiene menos sulfato (33% en mg/l) y presenta una excelente relación equimolar entre Na (37,2 meq/l) y Cl (37,5 meq/l) que

constituyen el 51% de la salinidad total (en mg/l). La alcalinidad, sin embargo, sigue baja (0,7 meq/l). Es posible que actúen dos procesos: la alteración de rocas volcánicas por soluciones sulfúricas y la redisolución de antigua halita (NaCl). Faltan más muestras de aguas de aporte para concluir.

Vías evolutivas y relación con la geología

Las dos aguas de aporte siguen la vía evolutiva neutra sulfatada, lo que refleja perfectamente la litología de la cuenca constituida de rocas volcánicas con abundante azufre. Sin embargo, no se detectan variaciones en la geología que puedan explicar la diferencia de composición de los dos aportes. Lo más probable es que, efectivamente, la vertiente fluyente (1) ha redissuelto cloruro de sodio de antiguas evaporitas recubiertas por formaciones volcánicas más recientes.

Evolución cuantitativa de aguas

Veamos ahora la evolución cuantitativa de las aguas de aporte cuando se evaporan. La tabla 2 presenta la composición calculada de las dos aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta la salinidad de las diversas salmueras. 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 (LAZ-xE) y las salmueras (LAZ-x.EQ). Todas las composiciones de las salmueras fueron ajustadas al equilibrio con los minerales que las sobresaturan.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
<u>LAZ-2.EQ</u>	7,29	5,24	58500	27300	655	17,3	32100	5760	28,5	582	7840	
LAZ-1E	7,95	10,2	51000	34400	686	20,1	34200	5410	33,7	627	6090	0,021
LAZ-4E	7,79	7,56	49700	42100	479	18,7	20800	5200	33,0	539	14800	0,091
<u>LAZ-3.EQ</u>	8,13	1,42	5890	5300	57,3	28,0	2140	469	3,05	659	1690	
LAZ-4E	8,13	1,36	5340	5880	51,6	31,5	2240	559	3,54	628	1590	0,011
LAZ-1E	8,10	1,40	5500	5050	73,9	31,7	3690	582	3,63	633	658	0,122

Tabla 2 : Comparación de las aguas de aporte evaporadas con aguas de la laguna de la Azufrera. ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

Se observa una excelente correlación entre las salmueras reales y la composición evaporada del aporte que las alimentan: la laguna (2) proviene de la evaporación de la vertiente fluyente (1) y el riachuelo, de la evaporación de la vertiente difusa (4).

Calidad de aguas

Ningún agua de aporte cumple con las normas chilenas de potabilidad o de riego. La vertiente difusa (LAZ-4) contiene 10 veces más boro y la vertiente fluyente (LAZ-1) 20 veces más arsénico que los máximos permitidos. Además, sus salinidades están 10 veces por encima de la norma de potabilidad.

Balance hídrico

Podemos establecer un orden de magnitud del balance hídrico de la laguna de la Azufrera asumiendo que su alimentación proviene de la vertiente 1. Se utiliza el cloruro como elemento conservativo. La evaporación de la laguna esta reducida en 15% en relación a la evaporación potencial para tomar en cuenta su salinidad elevada (159 g/l). Los parámetros considerados son :

- $H_e = (1,63 - 0,25) = 1,38$ m/año
- $H_p = 0,18$ m/año
- $S = 3,5$ km²
- $C_{ap} = 1330$ mg/l
- $C_L = 56100$ mg/l

Volumen de aporte : $V_{ap} = S(H_e - H_p)/(1 - C_{ap}/C_L) = 4\,300\,000$ m³/año = 136 l/s

Volumen de infiltraciones : $V_i = S(H_e - H_p)/(1 - C_L/C_{ap}) = 100\,000$ m³/año ~ 3 l/s

El caudal entrante en la laguna es del orden de 130 - 140 l/s

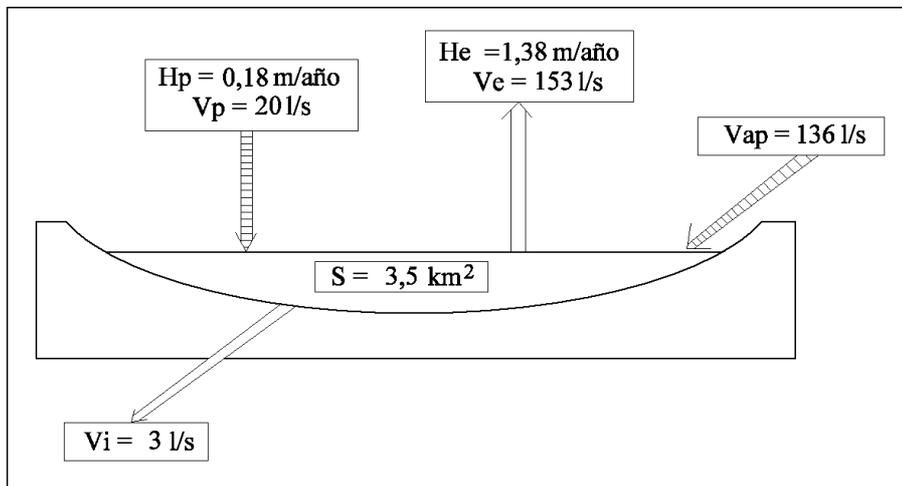
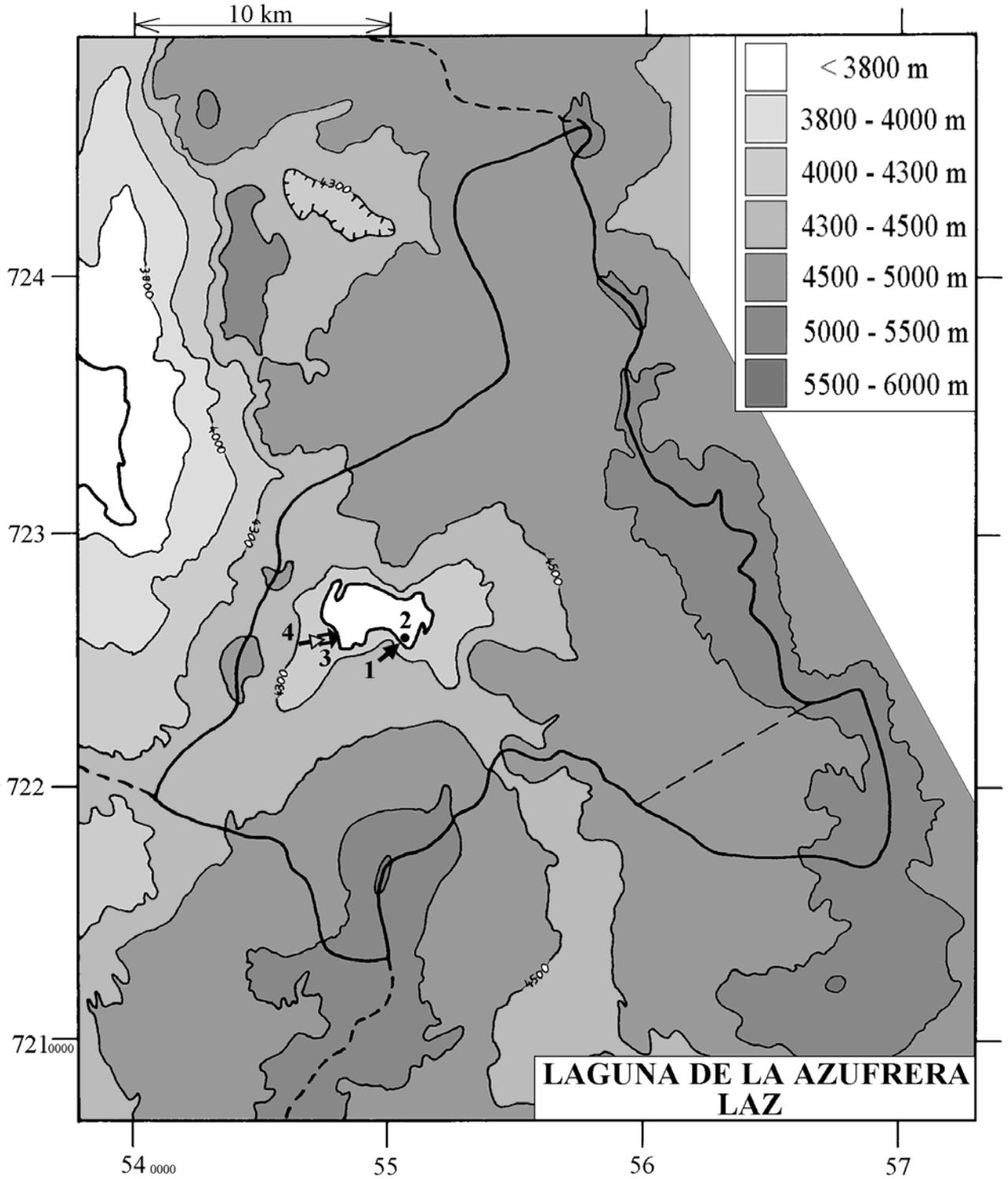


Fig.2 : Balance hídrico de la laguna de la Azufrera.

Conclusiones

La laguna de la Azufrera recibe aguas salobres muy sulfatadas cuya composición proviene de la alteración de rocas volcánicas por soluciones ácidas. Estas soluciones resultan de la formación de ácido sulfúrico a partir de la oxidación del azufre de un importante yacimiento al sur de la laguna. Existe también un indicio de redisolución de antiguas evaporitas para explicar el origen de una parte del cloruro de sodio. Hay una perfecta coherencia entre la litología volcánica con azufre de la cuenca de drenaje, la vía evolutiva neutra sulfatada que siguen los aportes al evaporarse y la composición de la salmuera de la laguna que pertenece al mega-grupo sulfatado: Na /Cl-SO₄. A pesar de un caudal entrante en la laguna relativamente elevado de 130-140 l/s, hay pocas posibilidades de encontrar napas diluidas, por lo menos en el sur de la cuenca. Deben estar salinizadas por aguas de alteración y antiguas sales. Quedaría por explorar el este y el norte de la cuenca.



**LAGUNA DE LA AZUFRERA
LAZ**

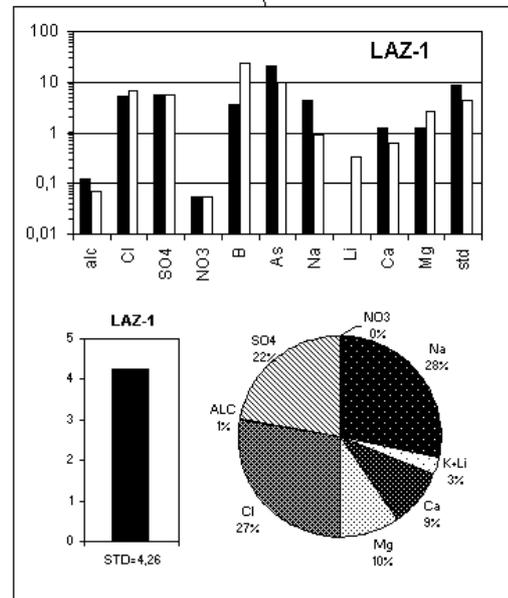
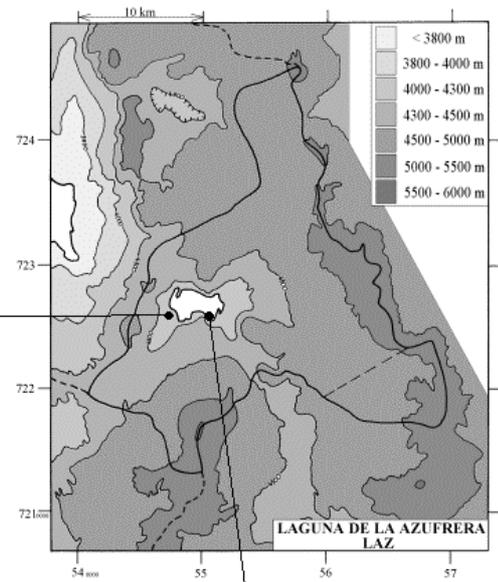
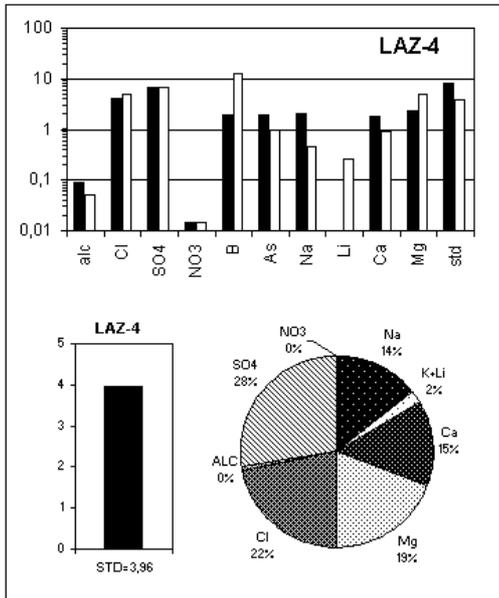
NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE	METROS	
LAZ-1	26/03/96	12 ^H 53	550311	7225728	4251	Manantial corriente
LAZ-2	26/03/96	13 ^H 05	550309	7225730	4250	Laguna
LAZ-3	26/03/96	14 ^H 10	547240	7226031	4250	Riachuelo dentro del salar
LAZ-4	26/03/96	15 ^H 50	547006	7226032	4255	Manantial difuso

NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
LAZ-1	6030	18,3	3,5	1,004	7,78	0,701	1330	2,21	0,105	1420	2,37	17,5	35,8	1,02	856	138	0,861	251	156
LAZ-2	130000	11,2	1,4	1,121	7,58	10,3	56100	79,5	0,505	48400	0,899	610	47,3	15,0	39800	5360	26,5	541	7360
LAZ-3	20400	11,2	5,5	1,014	8,36	2,11	5890	9,03	0,527	5430	0,060	57,3	29,1	0,148	2140	469	3,05	730	1690
LAZ-4	5060	12,6	7,0	1,004	8,65	0,520	994	1,21	0,129	1710	0,632	9,59	29,7	0,095	416	104	0,659	371	292

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
LAZ-1	4257	36,7	0,48	0,84	66,21	67,84	2,4	LAZ-1	-6,46	-64
LAZ-2	158853	-	-	-	2504	2598	3,7			
LAZ-3	16579	49,8	5,76	0,30	280,9	281,3	0,1			
LAZ-4	3965	12,2	1,38	0,04	63,38	64,13	1,2			
LGN-5	-5,26	-53								

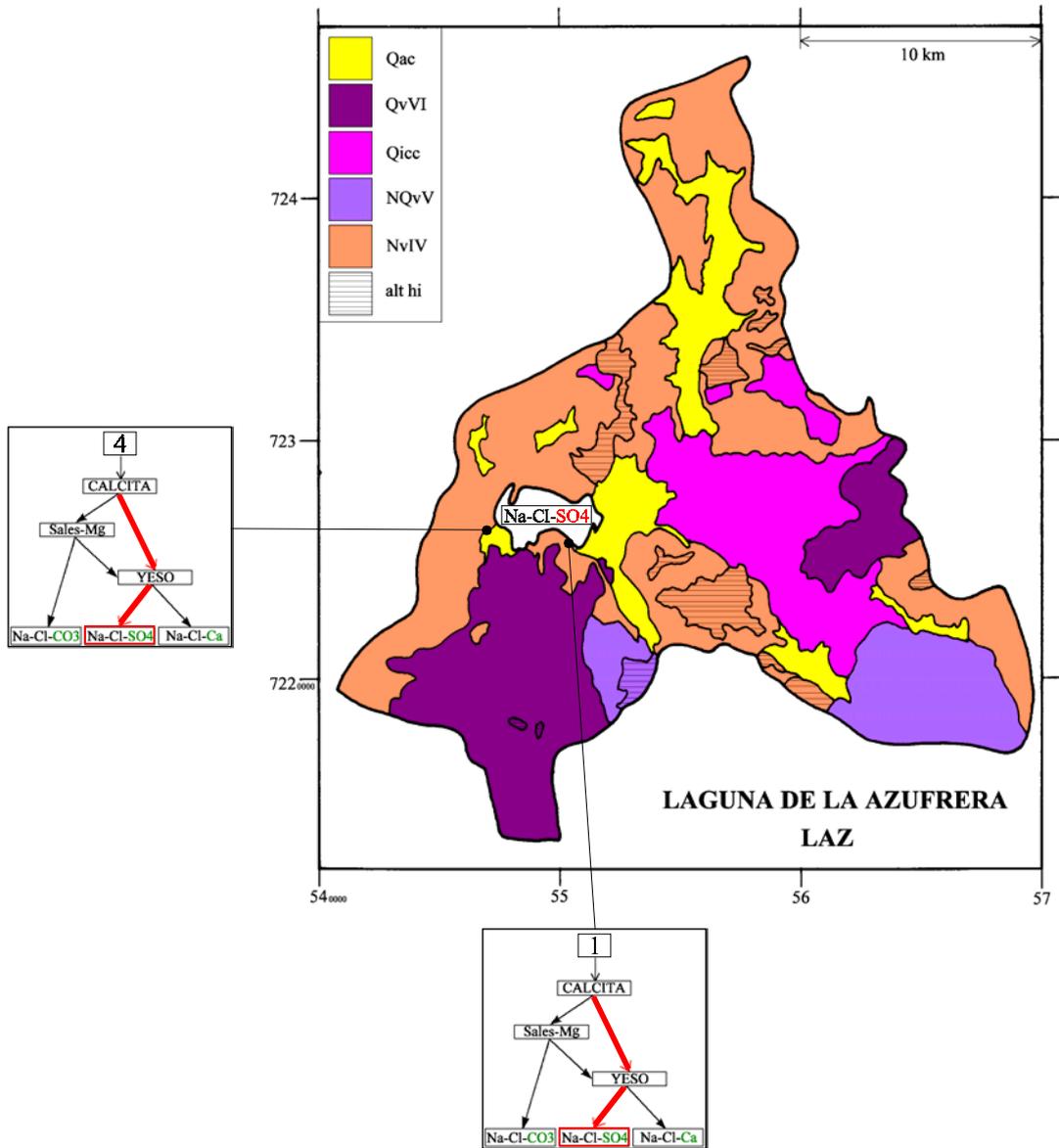
Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.
S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l)
DIF.% = diferencia en %



MAPA GEOLOGICO Y VIAS EVOLUTIVAS

LAZ

- Qac** : *Cuaternario*. Depósitos aluviales y coluviales: bloques, gravas y arenas con cenizas, arcillas y sales.
- QvVI** : *Cuaternario*. Conjunto volcánico VI: estrato-volcanes no erosionados. Andesitas y dacitas de piroxeno y biotita; dacitas de hornblenda y biotita.
- Qicc** : *Pleistoceno inf.* Ignimbrita Caletones. Toba de cristales (plg, px, bi) y ceniza.
T : Terciario. Coladas, brechas y tobas andesíticas a riolíticas.
- NQvV** : *Plioceno sup. - Pleistoceno inf.* Conjunto volcánico V: Lavas bien preservadas de andesitas y dacitas de piroxeno y biotita, ocasionalmente hornblenda.
- NvIV** : *Mioceno sup. - Plioceno inf.* Conjunto volcánico IV: estrato-volcanes y conos de escoria debilmente erosionados. Andesitas de dos piroxenos y dacitas de piroxeno y biotita. Ocasionalmente andesitas basálticas de olivino y piroxeno.
- alt hi** : alteración hidrotermal.



SALAR DE PAJONALES

Introducción

El salar de Pajonales se encuentra al sur de la II Región, siendo el más extenso en ella después de los salares de Atacama y Punta Negra. Tiene dos tipos de lagunas:

- en las orillas, los aportes forman lagunas someras.
- en su parte central, es una costra salina (NaCl) con numerosos “ojos” donde aparece la napa de salmuera del salar.

Sus principales características morfométricas y climatológicas son:

- altura: 3537 m
- superficie de la cuenca: 1984 km²
- superficie del salar: 104 km²
- superficie de las lagunas: 1,4 km²
- precipitaciones: 80 - 150 mm/año
- evaporación potencial: 1350 mm/año
- temperatura media: 5°C

No se encontró ningún agua de aporte en sectores altos de la cuenca de drenaje. Todos estaban ubicados en la orilla y en la mitad occidental del salar. Tampoco se encontró vertientes al este del salar, a pesar que la precipitaciones son dos veces más altas al este de la cuenca que al oeste.

Composición de las aguas y salmueras

La composición de las aguas de Pajonales 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	
PAJ-8	11728	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl	Ca
PAJ-1	15376	Na- (Mg) - (Ca)	/ Cl- (SO4)	Ca
PAJ-7	21777	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl	Ca
PAJ-3	22395	Na- (Mg) - (Ca)	/ Cl	Ca
LAGUNAS				
PAJ-4	43510	Na- (Mg) - (Ca)	/ Cl	Ca
PAJ-2	56885	Na- (Mg) - (Ca)	/ Cl- (SO4)	Ca
PAJ-9	115273	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl	Ca
PAJ-11	142631	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl	Ca
PAJ-6	161466	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl	Ca
PAJ-10	215247	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl	Ca
paj-5	246673	Na- (Mg)	/ Cl	Ca

Tabla 1 : Salinidades, tipos químicos y vías evolutivas de las aguas del salar de Pajonales
Ca = vía cálcica.

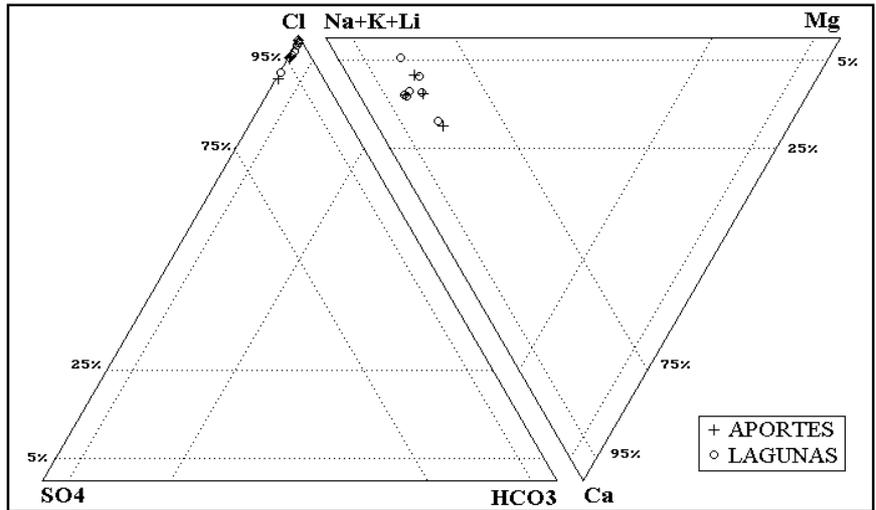


Fig.1: Composición de las aguas y salmueras del salar de Pajonales

Todas las aguas que hemos encontrado en Pajonales son saladas. El agua de aporte menos concentrada tiene una salinidad elevada de 11,7 g/l. La composición química de todas las aguas, aportes y lagunas, es homogénea: Na-(Ca)-(Mg) / Cl, con leves variaciones en las proporciones relativas de Ca y Mg. Aportes y lagunas tienen concentraciones porcentuales similares. Pajonales es un salar de tipo cálcico, es decir que sus salmueras contienen más calcio que sulfato.

Origen de los componentes disueltos

La única relación de equimolaridad entre componentes mayores que se ha encontrado es entre Na+Ca+Mg y Cl (Fig.2), y se aplica para todas las aguas. No se observa diferencias entre las aguas de aporte y de lagunas, como ocurre casi siempre en los demás salares.

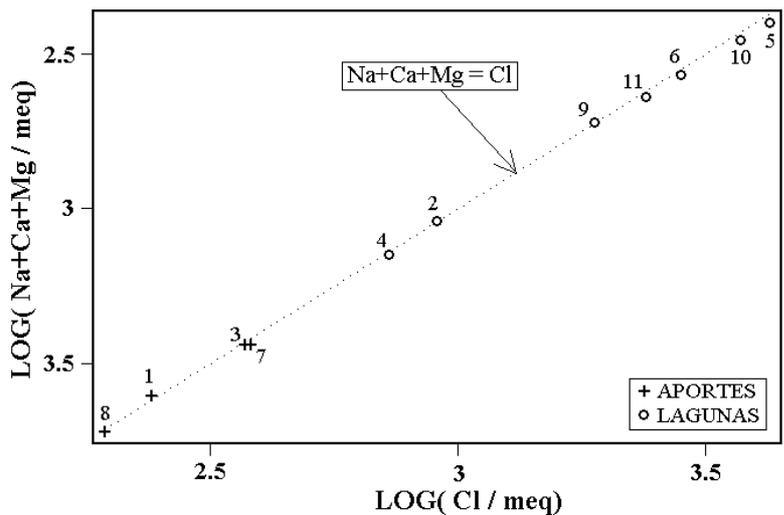


Fig. 2 : Relación entre Na+Ca+Mg y Cl en aguas del salar de Pajonales

La similitud de composición química entre aportes y lagunas, así que la alta salinidad de los aportes, hace pensar que las aguas que calificamos de aporte son en realidad cuñas salinas del propio salar. Sin embargo, hay dos vertientes fluyentes (PAJ-1 y 8), pero de bajo caudal. Esas vertientes podrían provenir de salmueras residuales de un antiguo salar recubierto por formaciones volcánicas de la cuenca de drenaje. Con los solos datos químicos, no se puede zanjar entre las dos hipótesis.

Vías evolutivas y relación con la geología

Todas las aguas pertenecen a la vía evolutiva cálcica. Esta vía se encuentra sobre todo en aguas asociadas a terrenos sedimentarios. Tales formaciones existen en la cuenca (Tal y Nga, ver mapa geológico), pero son de poca extensión, por lo menos superficialmente. La cuenca de drenaje del salar de Pajonales es principalmente volcánica. En cuencas de tal naturaleza, se debería encontrar salmueras y sales de tipo carbonatado o, más comúnmente en los Andes chilenos, de tipo sulfatado. El salar de Pajonales no es el producto del transporte y concentración de componentes que derivaron de la alteración de la actual cuenca de drenaje. Eso sugiere que Pajonales proviene de la remobilización de un antiguo salar que se originó en un ambiente geológico distinto, con formaciones sedimentarias dominantes.

Evolución cuantitativa de las aguas.

Veamos ahora la evolución cuantitativa de las aguas de aporte cuando se evaporan. La tabla 2 presenta la composición calculada de todas las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta la salinidad del agua de la laguna considerada. 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 (PAJ-xE) y las aguas de laguna. Se nota que cada agua de laguna proviene de la evaporación de la vertiente o napa que la alimenta, con buena concordancia y sin anomalía. La salmuera central del salar (10) proviene sobre todo de la vertiente fluyente (8), es decir de aportes desde el sur de la cuenca de drenaje.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
<u>PAJ-2</u>	8,05	3,67	32200	3560	136	47,3	15500	1330	21,2	2370	1440	
PAJ-1E	7,85	1,63	31300	3650	148	26,1	16000	1360	21,0	2170	1470	0,035
PAJ-3E	7,90	1,61	32900	1930	126	25,8	16700	1350	38,3	1600	1510	0,119
PAJ-8E	7,82	1,93	32600	1750	206	26,0	16500	1240	30,8	2400	1060	0,121
PAJ-7E	7,71	0,77	34900	249	64,7	25,8	14700	1120	18,3	3890	1530	0,418
<u>PAJ-5</u>	7,30	12,2	151000	2660	498	26,8	76100	5550	159	3830	6200	
PAJ-3E	7,36	5,13	148000	2510	551	8,92	75100	6060	172	4570	6780	0,107
PAJ-1E	7,25	4,65	147000	2770	647	8,93	75100	6400	99,1	4140	6900	0,132
PAJ-8E	6,93	3,42	147000	1470	842	9,28	74200	5610	139	8080	4770	0,213
PAJ-7E	7,16	2,78	152000	756	281	9,33	63900	4880	79,6	16700	6650	0,456
<u>PAJ-6</u>	7,44	4,76	100000	691	173	34,7	42300	3010	50,5	10500	4250	
PAJ-7E	7,42	1,82	99100	708	184	15,3	41700	3190	52,0	11000	4340	0,061
PAJ-8E	7,48	4,71	94900	2450	588	15,4	47800	3620	89,4	5870	3070	0,382
PAJ-1E	7,64	4,70	94500	3970	446	15,2	48100	4100	63,5	3590	4420	0,450
PAJ-3E	7,63	3,90	95100	3720	364	15,1	48200	3890	111	3820	4350	0,452

PAJ-9	7,58	8,73	67100	3340	458	42,0	34000	2450	64,5	5090	2120	
PAJ-8E	7,65	3,74	66800	2820	421	19,7	33700	2550	63,0	4590	2160	0,057
PAJ-3E	7,73	2,74	66800	3910	256	19,4	33900	2730	77,7	3230	3060	0,126
PAJ-1E	7,74	3,30	66300	4180	313	19,5	33800	2880	44,5	3100	3100	0,126
PAJ-7E	7,54	1,30	70800	505	131	19,5	29800	2280	37,1	7870	3100	0,458
PAJ-11	7,40	12,6	84800	3180	613	40,9	40500	3530	91,6	6340	2720	
PAJ-8E	7,58	4,65	83400	2630	525	17,1	42000	3180	78,6	5360	2700	0,080
PAJ-3E	7,68	3,42	83500	3870	320	16,8	42300	3410	97,1	3610	3820	0,155
PAJ-1E	7,68	4,12	82900	4110	391	16,8	42200	3600	55,7	3420	3880	0,168
PAJ-7E	7,47	1,60	87600	625	162	16,9	36900	2820	45,9	9740	3840	0,464
PAJ-10	6,88	11,4	132000	1390	718	35,6	62100	4730	113	8780	4590	
PAJ-8E	7,12	3,79	128000	1840	746	11,3	64500	4880	121	7270	4150	0,121
PAJ-3E	7,51	5,25	128000	3010	492	10,9	65100	5250	149	4320	5880	0,242
PAJ-1E	7,43	5,15	128000	3280	581	11,0	65100	5550	85,9	3970	5980	0,256
PAJ-7E	7,26	2,42	132000	944	245	11,3	55600	4250	69,3	14700	5790	0,275

Tabla 2 : Comparación de las aguas de aporte evaporadas (PAJ-xE) con las salmueras del salar de Pajonales. ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

Calidad de agua

Todas las aguas son de pésima calidad tanto para el consumo humano como para el riego. Además las posibilidades de encontrar grandes cantidades de agua de buena calidad en napas más arriba en la cuenca no son alentadoras. Si los aportes han sido salinizados por salmueras residuales, las napas cuenca arriba pueden haber sido también salinizadas.

Balance hídrico

Solamente podemos establecer el balance hídrico de lagunas superficiales y no de los ojos que son ventanas en la napa. Tenemos suficientes datos para estimar ordenes de magnitud del balance hídrico de las lagunas al norte del salar (PAJ-2 y 5). Hemos visto que estas lagunas están alimentadas por napas y vertientes en sus orillas. Se puede entonces aplicar las formulas del balance hídrico a esas lagunas.

	Laguna PAJ-2	Laguna PAJ-5
$H_e =$	1,28 m/año	1,22 m/año
$H_p =$	0,075 m/año	0,075 m/año
$S =$	0,45 km ²	0,25 km ²
$C_{ap} =$	8520 mg/l (PAJ-1)	13200 mg/l (PAJ-3)
$C_L =$	32200 mg/l (PAJ-2)	82100 mg/l (PAJ-4 + PAJ-5)/2

Se obtiene para la laguna PAJ-2 :

$$\text{Volumen de aporte : } V_{ap} = S(H_e - H_p)/(1 - C_{ap}/C_L) = 737\ 000\ \text{m}^3/\text{año} = 23\ \text{l/s}$$

$$\text{Volumen de infiltraciones : } V_i = S(H_e - H_p)/(1 - C_L/C_{ap}) = 195\ 000\ \text{m}^3/\text{año} = 6\ \text{l/s}$$

Para la laguna PAJ-5 :

$$\text{Volumen de aporte : } V_{ap} = S(H_e - H_p)/(1 - C_{ap}/C_L) = 341\ 000\ \text{m}^3/\text{año} = 11\ \text{l/s}$$

$$\text{Volumen de infiltraciones : } V_i = S(H_c - H_p)/(1 - C_L/C_{ap}) = 55\,000 \text{ m}^3/\text{año} = 1,7 \text{ l/s}$$

Los caudales de aporte son débiles : 23 l/s para la vertiente fluyente PAJ-1 y 11 l/s para la descarga de la napa PAJ-3. Queda pendiente la pregunta de si se trata de descargas de cuñas salinas o de aguas de aporte que han redissuelto antiguas evaporitas o salmueras. Las dimensiones (arbitrarias, como ejemplo) de un paralelepípedo de agua de aporte, con volumen anual igual al de la vertiente fluyente PAJ-1 es : 1000 m de ancho (paralelo a la orilla) por 100 m de profundidad (perpendicular a la orilla) y 15 m de espesor. Para determinar estas dimensiones, se consideró para el acuífero una porosidad elevada de 50% llena de agua. Así se percibe que el volumen de agua que se descarga cada año por la vertiente (1), aunque pequeño en valor absoluto, es demasiado importante para provenir de una antigua cuña salina. En pocos años esta se habría eliminado completamente.

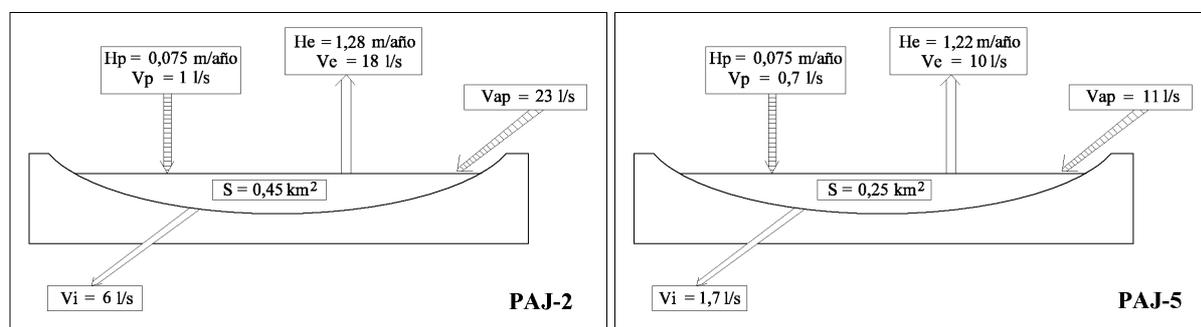
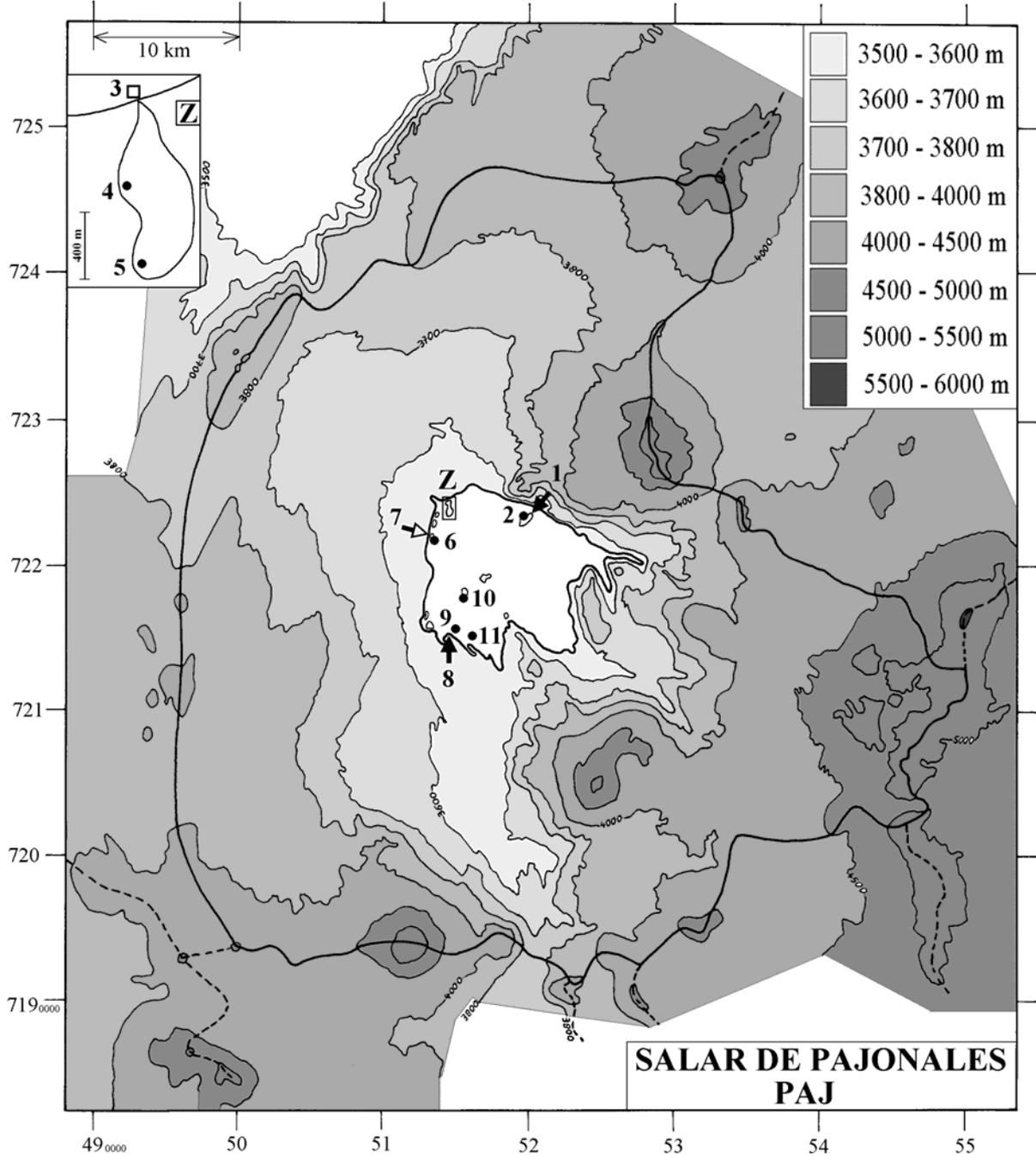
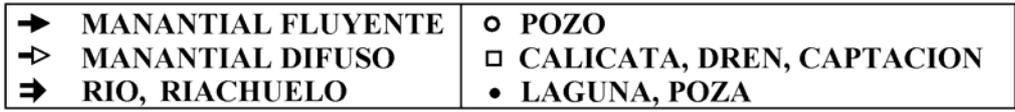


Fig.3 : Balance hídrico de dos lagunas del salar de Pajonales.

Es probable, entonces, que la alta salinidad de los aportes se deba a la contaminación de aguas diluidas por antiguas salmueras de tipo Na-(Ca)-(Mg) / Cl. Es poco probable que se trate de sales redissueltas, puesto que las cloruros de calcio y de magnesio son extremadamente solubles.

Conclusiones

El salar de Pajonales no presenta mucho interés en cuanto a calidad de recursos de agua para usos potable y riego. Todos los aportes encontrados son salados y de tipo Na-(Ca)-(Mg) / Cl. Esta alta salinidad proviene probablemente de la redissolución de salmueras residuales de un antiguo salar recubierto por formaciones volcánicas más recientes. La composición química y la vía evolutiva exclusivamente cálcica de los aportes y salmueras, no es consistente con la geología esencialmente volcánica de la actual cuenca. Se esperaría en tal ambiente soluciones carbonatadas o, sobre todo, sulfatadas sódicas. Todo eso sugiere que el salar de Pajonales proviene de la removilización de un antiguo salar que se formó en un ambiente geológico distinto, en un cuenca de drenaje en gran parte sedimentaria.



**SALAR DE PAJONALES
PAJ**

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
PAJ-1	25/03/96	11 ^H 54	520224	7223622	3538	Manantial corriente
PAJ-2	25/03/96	12 ^H 15	519979	7223562	3537	Laguna
PAJ-3	25/03/96	14 ^H 30	514338	7224562	3537	Napa (calicata)
PAJ-4	25/03/96	14 ^H 40	514230	7224152	3537	Laguna
PAJ-5	25/03/96	14 ^H 54	514462	7223680	3537	Laguna
PAJ-6	25/03/96	15 ^H 20	513100	7221900	3537	Laguna
PAJ-7	25/03/96	15 ^H 40	513025	7222250	3537	Manantial difuso (muestra en calicata)
PAJ-8	25/03/96	17 ^H 02	514475	7215350	3539	Manantial corriente
PAJ-9	25/03/96	17 ^H 15	514490	7215350	3537	Laguna
PAJ-10	27/03/96	16 ^H 10	515535	7218266	3537	Napa salar (gran ojo formando laguna)
PAJ-11	27/03/96	17 ^H 00	515572	7214931	3537	Laguna

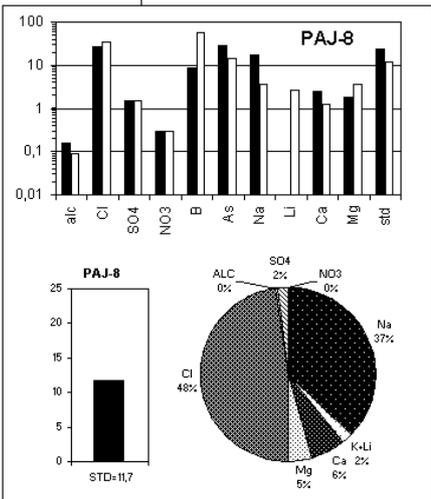
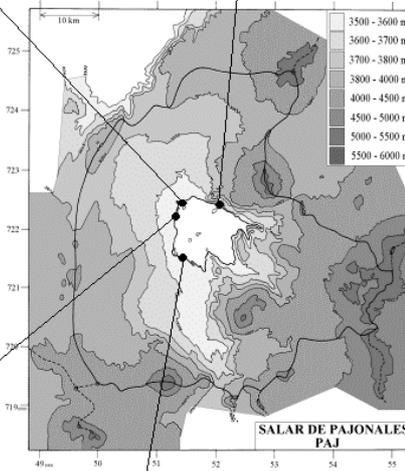
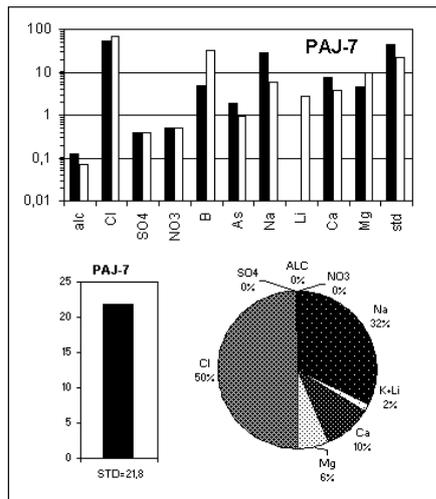
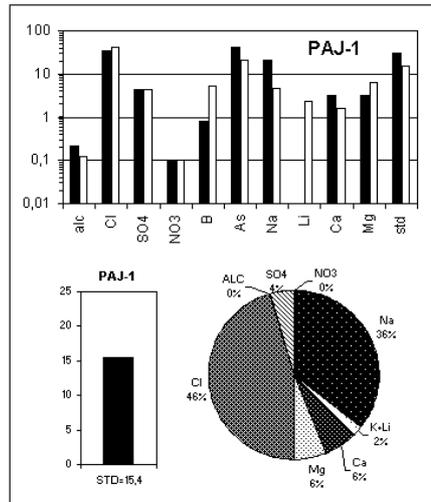
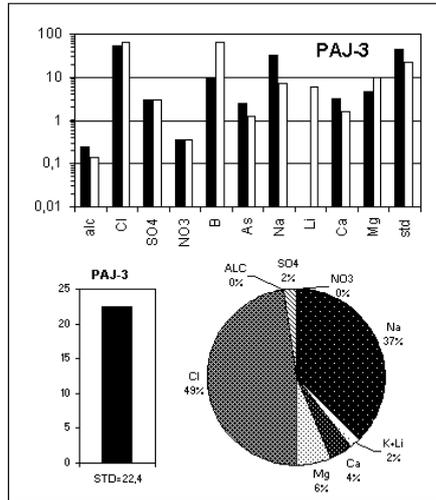
**SALAR DE PAJONALES
PAJ**

NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
PAJ-1	23300	14	4,5	1,012	7,76	1,23	8520	3,02	0,660	1100	4,58	39,7	38,4	2,10	4210	365	5,65	650	394
PAJ-2	74200	13,8	4,0	1,042	8,05	3,67	32200	11,2	1,15	3560	1,04	136	47,3	7,00	15500	1330	21,2	2370	1440
PAJ-3	33500	10,5	5,0	1,016	7,97	1,37	13200	4,23	0,292	762	15,4	49,8	34,4	0,123	6490	532	15,1	646	595
PAJ-4	60800	16	4,5	1,031	8,14	2,66	25700	9,51	0,316	1490	3,24	93,4	27,9	0,204	12500	1040	28,9	1300	1240
PAJ-5	219000	17	1,0	1,166	7,30	12,2	151000	49,5	1,85	2660	2,80	498	26,8	0,876	76100	5550	159	3830	6200
PAJ-6	171400	15,1	2,0	1,114	7,44	4,76	100000	21,7	0,642	691	64,5	173	34,7	0,658	42300	3010	50,5	10500	4250
PAJ-7	33200	10	5,5	1,016	7,76	0,695	13500	2,76	0,141	95,4	21,7	24,8	23,4	0,097	5520	430	7,01	1500	586
PAJ-8	18590	7,8	6,5	1,009	7,90	0,884	6850	4,71	0,642	364	13,3	42,8	18,0	1,45	3380	259	6,40	509	220
PAJ-9	133100	8,6	2,5	1,081	7,58	8,73	67100	53,1	3,96	3340	13,4	458	42,0	16,6	34000	2450	64,5	5090	2120
PAJ-10	198300	11,7	1,4	1,147	6,88	11,4	132000	65,6	5,79	1390	1,90	718	35,6	18,5	62100	4730	113	8780	4590
PAJ-11	155300	10,8	2,0	1,100	7,40	12,6	84800	55,1	2,91	3180	1,77	613	40,9	20,0	40500	3530	91,6	6340	2720

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	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
PAJ-1	15376	70,2	1,38	1,6	258,0	264,3	2,4	PAJ-1	-5,48	-56
PAJ-2	56885	79,3	7,44	0,88	949,8	984,9	3,6	Análisis de oxígeno-18 y deuterio		
PAJ-3	22395	55,8	1,80	0,79	379,0	388,5	2,5			
PAJ-4	43510	58,0	5,34	0,48	739,3	756,7	2,3			
PAJ-5	246673	-	-	-	4176	4318	3,3			
PAJ-6	161466	121	16,5	6,6	2796	2840	1,6			
PAJ-7	21777	31,7	0,90	0,79	374,8	384,0	2,4			
PAJ-8	11728	38,9	0,72	0,75	198,0	201,7	1,8			
PAJ-9	115273	262	15,1	9,7	1981	1969	0,6			
PAJ-10	215247	-	-	-	3653	3760	2,9			
PAJ-11	142631	431	24,4	24	2404	2469	2,7			

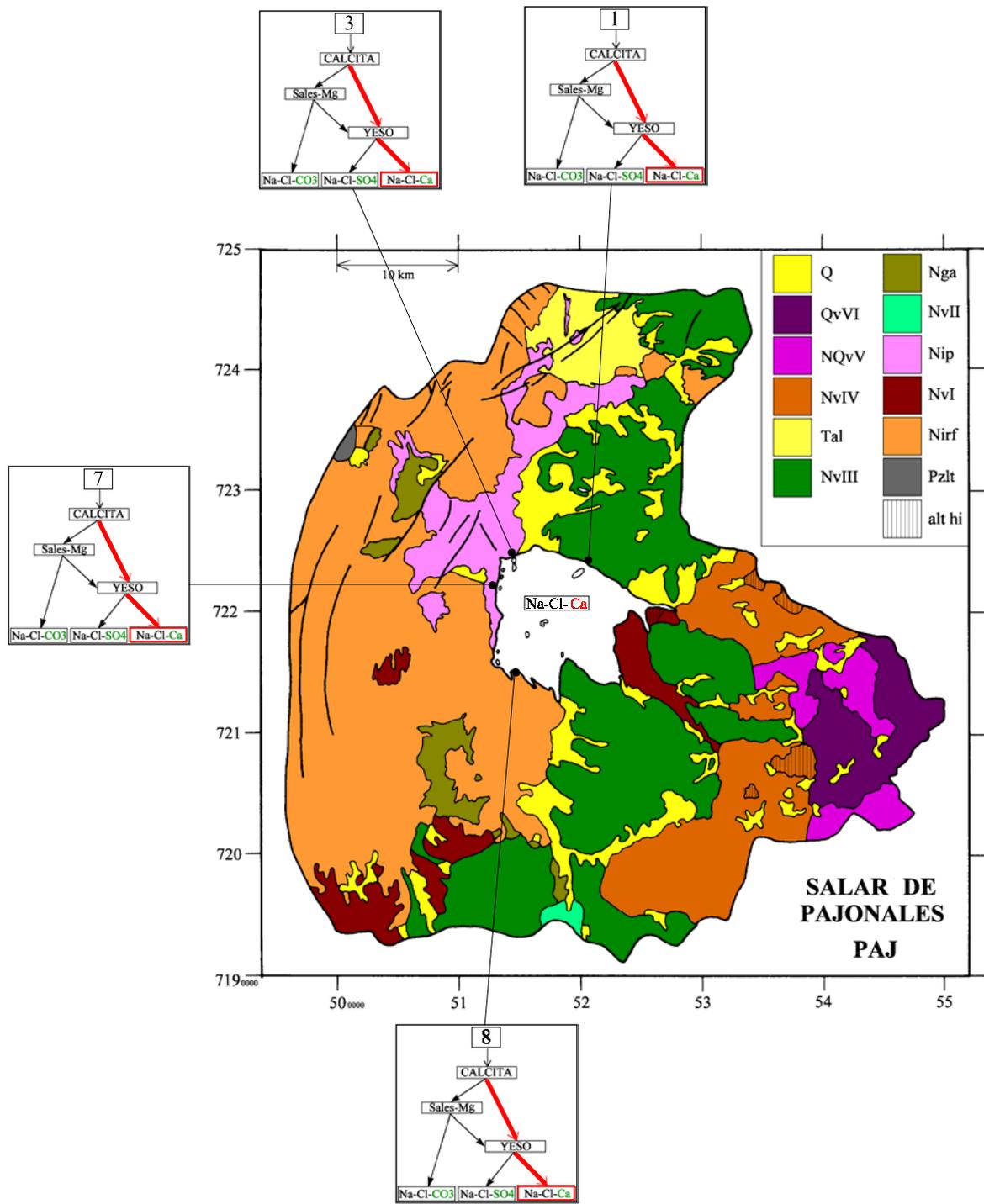
Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.
 S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l)
 DIF.% = diferencia en %



MAPA GEOLOGICO Y VIAS EVOLUTIVAS

PAJ

- Q** : *Cuaternario*. Depósitos aluviales y coluviales: bloques, gravas y arenas con cenizas, arcillas y sales.
- QvVI** : *Cuaternario*. Conjunto volcánico VI: estrato-volcanes no erosionados. Andesitas y dacitas de piroxeno y biotita; dacitas de hornblenda y biotita.
- NQvV** : *Plioceno sup. - Pleistoceno inf.* Conjunto volcánico V: Lavas bien preservadas de andesitas y dacitas de piroxeno y biotita, ocasionalmente hornblenda.
- NvIV** : *Mioceno sup. - Plioceno inf.* Conjunto volcánico IV: estrato-volcanes y conos de escoria debilmente erosionados. Andesitas de dos piroxenos y dacitas de piroxeno y biotita. Ocasionalmente andesitas basálticas de olivino y piroxeno.
- Tal** : *Mioceno sup. - Plioceno*. Depósitos aluviales y coluviales antiguos. Gravas con lentes de arena y limo e intercalaciones de ceniza volcánica. En zona de fallas, localmente las gravas ocurren cementadas por carbonatos y con niveles de travertino.
- NvIII** : *Mioceno medio - Mioceno sup.* Conjunto volcánico III: estrato-volcanes mediana a debilmente erosionados. Andesitas de dos piroxenos, andesitas basálticas de olivino y piroxeno. Escasas dacitas de hornblenda y biotita.
- Nga** : *Mioceno medio*. Gravas de Atacama. Depósitos de gravas y bolones con matriz de arena, localmente consolidados en cemento de carbonatos y sulfatos.
- NvII** : *Mioceno inf. - Mioceno medio*. Conjunto volcánico II: estrato-volcanes medianamente erosionados. Andesitas de piroxenos y daciandesitas de hornblenda.
- Nip** : *Mioceno medio*. Ignimbrita Pajonales. Tobas dacíticas de cenizas y cristales (plg, anf, bi, px).
- NvI** : *Oligoceno - Mioceno inf.* Conjunto volcánico I: estrato-volcanes rofundamente erosionados. Andesitas de ortopiroxeno y clinopiroxeno con daciandesitas de hornblenda y/o biotita y piroxeno. Ocasionalmente andesitas basálticas de ortopiroxeno y olivino.
- Nirf** : *Mioceno inf.* Ignimbrita Río Frío. Tobas dacíticas ricas en cristales (plg, anf, px, bi).
- Pzlt** : *Carbonífero - Pérmico*. Fm. La Tabla. Tobas soldadas y porfidos riolíticos ricos en cristales (feldK, qz, plg, bi), allanita y circón como accesorios.
- alt hi** : alteración hidrotermal.





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 V
ESTUDIO DE CUENCAS DE LA I I I REGION**

REALIZADO POR:

**François Risacher
Hugo Alonso
Carlos Salazar**

S.I.T. N° 51

Santiago, Enero de 1999

INDICE

TERCERA REGION

Salar de Gorbea	1 - 11	[GOR]
Salar Ignorado	13 -21	[IGN]
Salar de la Azufrera	23 - 33	[AZU]
Salar de Agua Amarga	35 - 43	[AMA]
Salar de Aguilar	45 - 51	[AGI]
Salar de La Isla	53 - 69	[ISL]
Salar de las Parinas	71 - 81	[PAR]
Salar Grande	83 - 93	[GRA]
Salar de los Infieles	95 - 103	[INF]
Salar de Pedernales	105 - 123	[PED]
Salar de la Laguna	125 - 133	[LGN]
Salar de Piedra Parada	135 - 145	[PIE]
Lagunas Bravas	147 - 155	[BRA]
Lagunas del Jilguero	157 - 165	[JIL]
Laguna del Bayo	167 - 175	[BAY]
Salar de Wheelwright	177 - 187	[WHE]
Laguna Escondida	189 - 197	[ESC]
Laguna Verde	199 - 209	[LAV]
Salar de Maricunga	211 - 229	[MAR]
Laguna del Negro Francisco	231 - 247	[FRA]

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.

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. N° 83, del Ministerio de Relaciones Exteriores.

SALAR DE GORBEA

Introducción

El salar de Gorbea se encuentra en el norte de la Cordillera de Los Andes en la Tercera Región, cerca de la frontera con Argentina. Es una costra salina con mucho sulfato de calcio (yeso). Al sur del salar, se observa leves relieves de sulfato de sodio (tenardita). Las lagunas son casi todas "ojos" de unos metros de profundidad donde aparece la salmuera subterránea. Las principales características morfométricas y climatológicas del salar son:

- altura: 3950 m
- superficie de la cuenca: 324 km²
- superficie del salar: 27 km²
- superficie de las lagunas: 0,5 km²
- precipitaciones: 140 mm/año
- evaporación potencial: 1000 mm/año
- temperatura media: -1°C

Hemos muestreado un río cuenca arriba, cuatro vertientes difusas en las orillas y siete ojos.

Composición de aguas y salmueras

Las composiciones de aguas del salar de Gorbea están presentadas en la figura 1 y en la tabla 1. El rasgo impactante es la acidez de casi todas las aguas de Gorbea. Solamente dos aportes - los menos concentrados - tienen un pH neutro. Algunas salmueras tienen un pH muy bajo, inferior a 2. Este tipo de quimismo, que también se observa en el vecino salar Ignorado, parece único en las cuencas evaporíticas de la Cordillera, por lo menos en Chile y Bolivia. Se conoce un otro caso de lago salado ácido en un cráter volcánico de Indonesia (Delmelle y Bernard, 1994).

<u>APORTES</u>	<u>SALINIDAD</u> mg/l	<u>PH</u>	<u>TIPO QUÍMICO</u>		<u>VIA EVOLUTIVA</u>
			Cationes	Aniones	
GOR-6	2839	7,22	Ca-Na- (Mg)	/ SO4- (Cl)	SO4 (N)
GOR-1	3276	7,19	Ca-Na- (Mg)	/ SO4- (Cl)	SO4 (N)
GOR-10	3519	4,26	Na- (Ca)	/ Cl- (SO4)	ácida
GOR-2	5586	3,64	Na-Ca- (Mg)	/ Cl-SO4	ácida
GOR-7	12436	3,87	Na-Mg- (Ca)	/ Cl-SO4	ácida
<u>LAGUNAS</u>					
GOR-8	7875	3,57	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl- (SO4)	ácida
GOR-3	9775	4,17	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl-SO4	ácida
GOR-4	25746	2,02	Na-Mg- (Ca)	/ Cl-SO4	ácida
GOR-9	37544	3,21	Na- (Mg) - (Ca)	/ Cl- (SO4)	ácida
GOR-5	123695	1,32	Na-Mg	/ Cl-SO4	ácida
GOR-12	294254	2,05	Na-Mg	/ Cl-SO4	ácida
GOR-11	296734	1,61	Na-Mg	/ Cl-SO4	ácida

Tabla 1 : Salinidades, pH, tipos químicos y vías evolutivas de aguas del salar de Gorbea.
SO₄ (N) = vía neutra sulfatada.

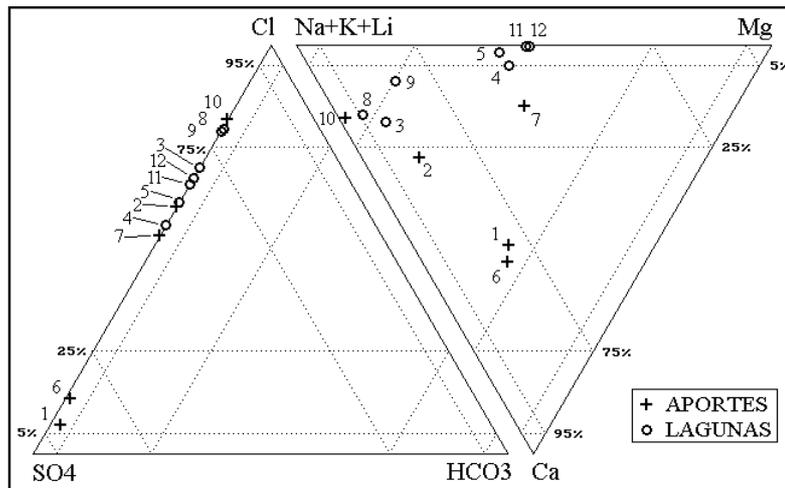


Fig.1: Composición de aguas y salmueras del salar de Gorbea.

Todos los aportes son salobres o salados (3 - 12 g/l), incluido el río 1 en un sector alto de la cuenca. Se distingue nitidamente dos tipos de aportes:

- los aportes no ácidos (1 y 6), muy concentrados en sulfato y calcio.
- los aportes ácidos (10, 2 y 7), con menos sulfato, tienen distintas composiciones catiónicas con mucha variación en la concentración porcentual del magnesio.

Si consideramos solamente las vertientes y lagunas ácidas, notamos que se reparten en dos grupos:

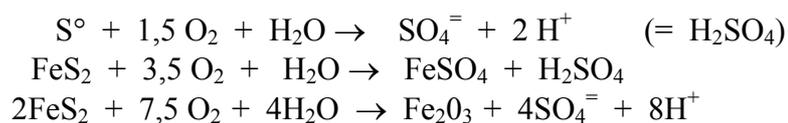
- en el centro y al sur del salar (7, 4, 5, 11, 12), las aguas contienen mucho magnesio y sulfato
- en el extremo norte (2, 3, 8, 9, 10), las aguas contienen menos Mg y SO₄ y más Na y Cl.

Todas las salmueras de Gorbea pertenecen al mega-grupo sulfatado con más sulfato que calcio. La precipitación del yeso en aguas que se evaporan concentra el sulfato en desmedro del calcio.

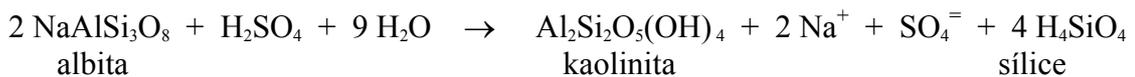
Un otro rasgo relevante de las aguas de Gorbea es su alto contenido en aluminio: hasta 4,5 g/l (GOR-11, ver cuadro de análisis) y en algunos otros metales Fe, Mn y Zn. Solamente en soluciones muy ácidas o muy básicas puede concentrarse tanto el aluminio.

Origen de los componentes disueltos

El principal problema es el origen de la acidez de las aguas de Gorbea. La oxidación del azufre o de sulfuros en mineralizaciones acidifica las aguas segun reacciones del tipo:



La oxidación del azufre y de los sulfuros produce ácido sulfurico. Las aguas ácidas de lixiviación alteran fuertemente las rocas volcánicas. Por ejemplo, la alteración de la albita se escribe:



La alteración de la albita agrega sodio y sílice en el agua sulfatada de lixiviación. Además, la acidez del agua de alteración queda neutralizada y su pH puede elevarse. Los iones Na^+ reemplazan los iones H^+ responsables de la acidez. Es un mecanismo muy común en aguas de los Andes Centrales. Sin embargo, en el caso de Gorbea, la alteración de las rocas volcánicas no logra neutralizar toda la acidez de las aguas de lixiviación constituyendo, con el salar Ignorado, un caso único dentro de los salares chilenos. Hay que buscar cuales son los rasgos excepcionales de la litología de la cuenca de Gorbea que podrían explicar esta anomalía. En el mapa geológico, no aparece nada particular. Se nota una azufretera justo al límite de cuenca, en territorio argentino y zonas de alteración hidrotermal alrededor del salar. Pero tales rasgos se encuentran en las cuencas de muchos salares sin que estos se vuelvan ácidos. Podría ser que la importancia de la alteración hidrotermal fuera mucho más intensa que lo indicado en el mapa geológico. De hecho, se observa en terreno las más extensas e impresionantes zonas de alteración de todas las cuencas evaporíticas visitadas, siendo Gorbea una de la más afectada por la alteración hidrotermal (Cornejo, 1987). Los minerales productos de esta alteración (arcillas) ya no pueden neutralizar la acidez de un agua sulfúrica, pues han perdido el potencial neutralizador que tenían los silicatos primarios. En el ejemplo de la alteración de la albita en kaolinita, se nota que la kaolinita no puede proveer cationes para compensar las cargas positivas de los iones H^+ . Sin embargo, muchos minerales secundarios todavía contienen cationes, pero como resultan de un proceso de alteración, son muy estables. Por otra parte, las aguas ácidas pueden solubilizar altas concentraciones de cationes como Al^{+++} y otros metales. Esta es la hipótesis más simple y probable para explicar la composición ácida de las aguas de Gorbea y su alto contenido en aluminio.

La alta salinidad de los aportes puede derivar exclusivamente de la fuerte capacidad de solubilización de las soluciones ácidas. Sin embargo, aparecen algunas tendencias equimolares entre componentes mayores que pueden sugerir una redisolución de antiguas sales evaporíticas.

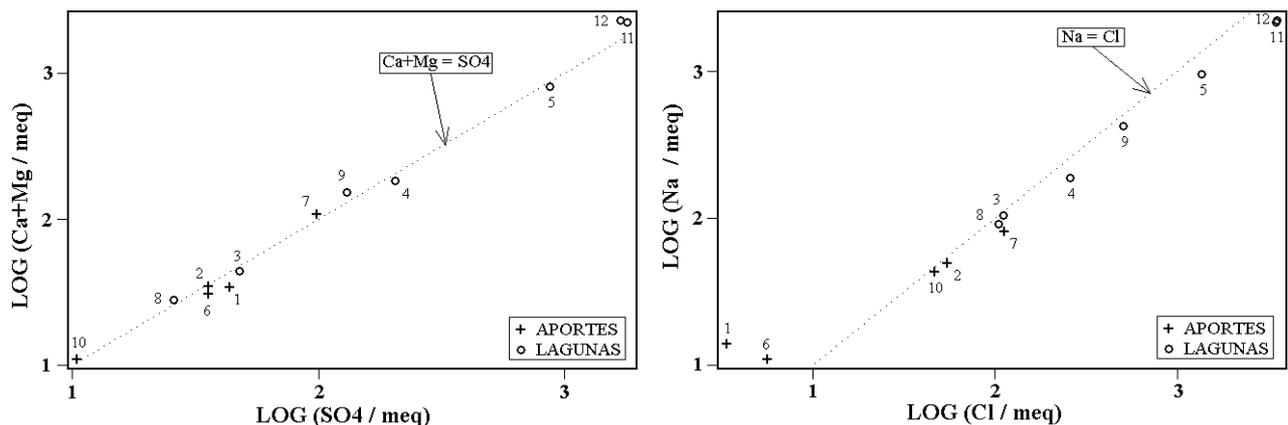


Fig.2 : Relaciones Ca+Mg versus SO_4 y Na versus Cl en aguas del salar de Gorbea.

La figura 2 muestra una relación equimolar entre SO_4 y Ca+Mg en todas las soluciones - aportes y lagunas - de Gorbea. No hemos detectado ningún otro salar en la Cordillera chilena con esta característica. Por otra parte, existe una tendencia equimolar, muy común, entre Na y Cl en las

soluciones ácidas (aguas 1 y 6 son neutras). Finalmente, señalamos que las vías evolutivas neutras sulfatadas que siguen los dos aportes no ácidos 1 y 6 concuerdan con la litología volcánica con azufre de la cuenca de drenaje.

Calidad de agua

Es evidente que, con tales composiciones salobres o ácidas, ningún agua de aporte es aprovechable para el consumo humano o el riego. Sin embargo, aparece un rasgo extraño (otro más en Gorbea !) y es que de las cinco aguas de aporte, cuatro tienen una concentración en arsénico dentro de la norma de potabilidad, y el agua con exceso de arsénico (diez veces por encima de la norma) es la más diluida de las aguas de aporte (GOR-6).

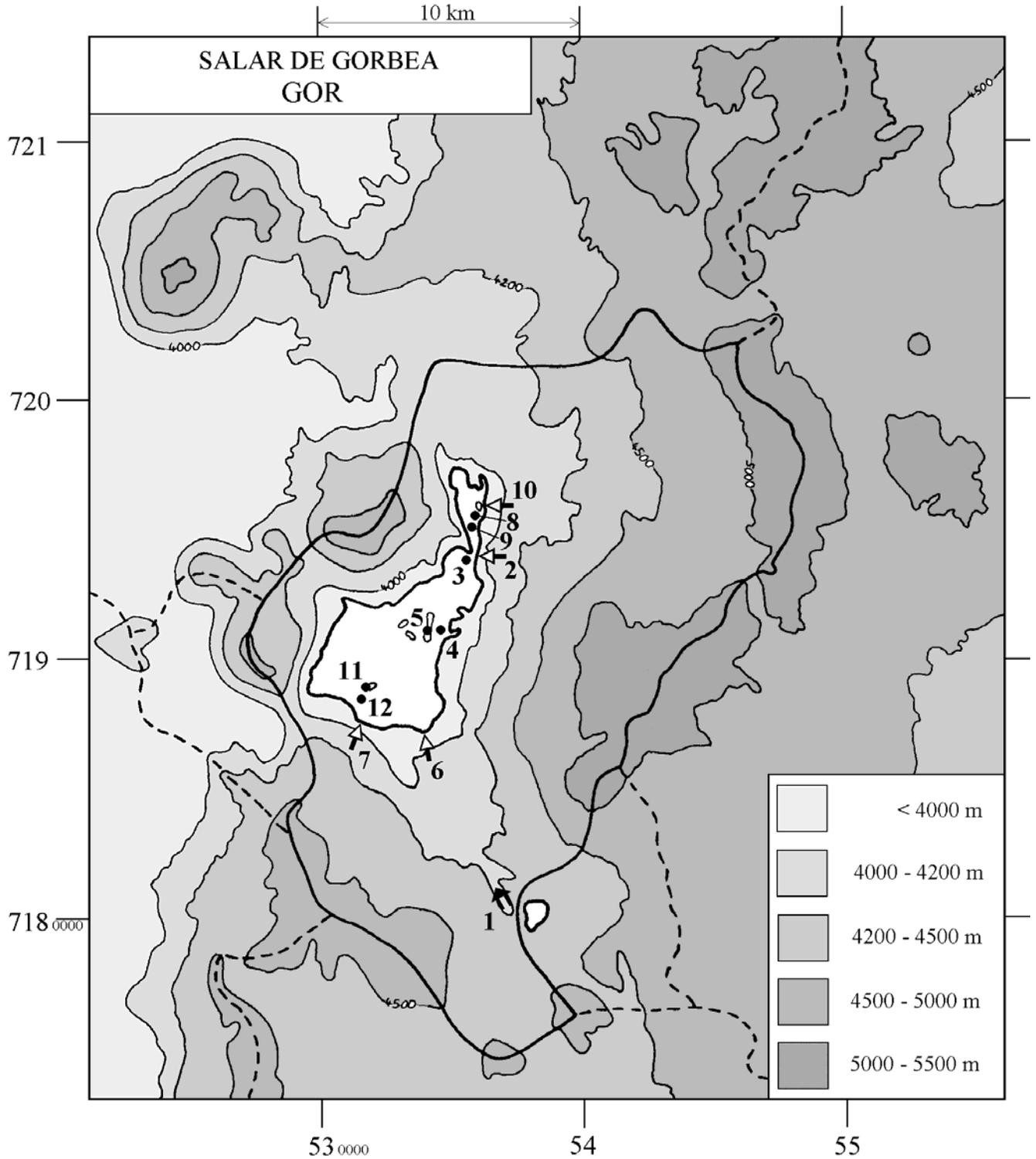
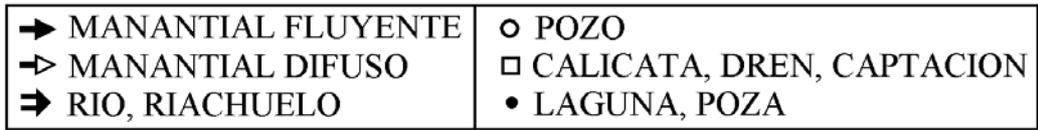
Conclusiones

El salar de Gorbea es un salar excepcional en el ámbito de los Andes Centrales. La mayor parte de sus aportes y todas sus salmueras son ácidas. Los pH bajan hasta 1,32. La acidez proviene probablemente de la oxidación del azufre o de mineralizaciones sulfuradas. Generalmente, la acidez de las soluciones así producida queda neutralizada por la alteración de rocas volcánicas. Los cationes liberados reemplazan los protones H^+ . Este proceso no actúa en Gorbea, tal vez porque las aguas ácidas drenan rocas ya fuertemente afectadas por la alteración hidrotermal y los minerales secundarios producidos por esta alteración, son mucho más estables que los minerales primarios. Para entender los mecanismos geoquímicos que actúan en Gorbea, es necesario un estudio detallado de su entorno geológico, particularmente del tipo de alteración hidrotermal. La cuenca de Gorbea es probablemente una de las menos favorables para la búsqueda de recursos de agua diluida. Todas las aguas de aporte, hasta cuenca arriba, tienen una composición muy por encima de las normas de potabilidad y de riego, con la sorprendente excepción del arsénico que presenta bajas concentraciones.

Referencias y estudios anteriores

Cornejo, P. 1987. Hydrothermal alteration zones and sulphur deposits in Upper Cenozoic volcanoes of salar de Gorbea, Andes of Northern Chile. Pacific Rim Congress, 26-29 August 1987, Gold Coast, Australia. Proceedings, 877-885.

Delmelle, P. y Bernard, A. 1994. Geochemistry, mineralogy, and chemical modeling of the acid crater lake of Kawah Ijen Volcano, Indonesia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58, 11, 2445-2460.



III - 5 [GOR]

**SALAR DE GORBEA
GOR**

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
GOR-1	14/03/96	16 ^H 45	536835	7180658	4195	Vegas formando río
GOR-2	22/03/96	11 ^H 40	536036	7193688	3950	Manantial difuso
GOR-3	22/03/96	12 ^H 00	535954	7193812	3950	Napa salar (gran ojo formando laguna)
GOR-4	22/03/96	14 ^H 32	534678	7190804	3950	Napa salar (gran ojo formando laguna)
GOR-5	22/03/96	14 ^H 58	534448	7190940	3950	Napa salar (gran ojo formando laguna)
GOR-6	22/03/96	16 ^H 32	533994	7187174	3951	Manantial difuso
GOR-7	22/03/96	17 ^H 00	531773	7187494	3951	Manantial difuso
GOR-8	23/03/96	11 ^H 53	536241	7195897	3950	Napa salar (gran ojo formando laguna)
GOR-9	23/03/96	12 ^H 05	536230	7195869	3950	Napa salar (gran ojo formando laguna)
GOR-10	23/03/96	12 ^H 40	536395	7195972	3950	Manantial difuso (muestra en pocito)
GOR-11	23/03/96	16 ^H 30	531874	7189084	3950	Napa salar (gran ojo formando laguna)
GOR-12	23/03/26	17 ^H 07	531576	7188550	3950	Napa salar (gran ojo formando laguna)

**SALAR DE GORBEA
GOR**

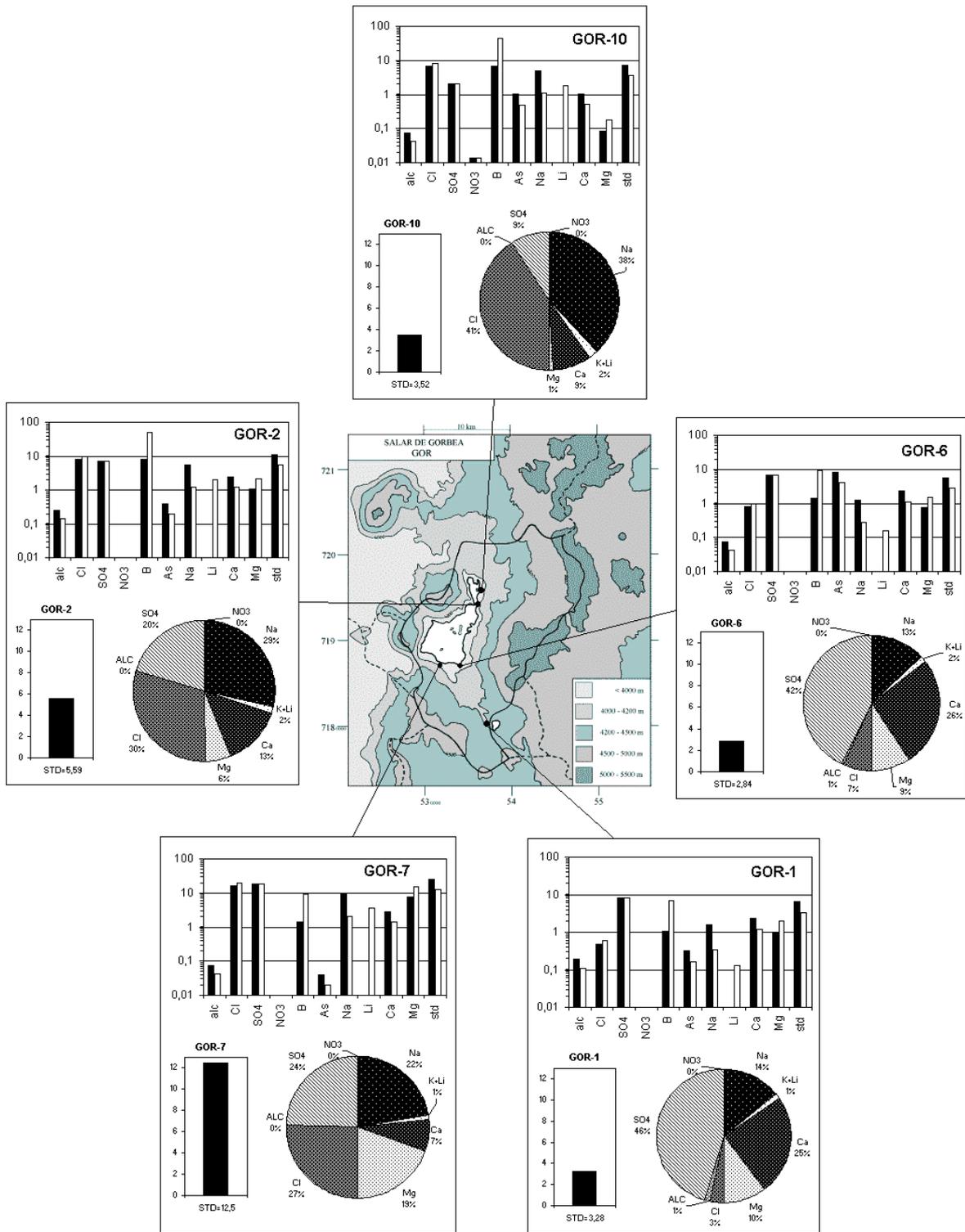
NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
GOR-1	3360	17,3	5,4	1,002	7,19	1,09	119	0,058	0,0072	2090	nd	5,34	29,7	0,017	317	43,0	0,319	481	120
GOR-2	7810	10	4,0	1,005	3,64	-0,370	1930	3,24	0,339	1720	nd	38,9	58,2	0,020	1120	95,8	5,01	477	130
GOR-3	14000	8,8	5,9	1,008	4,17	-0,130	3940	6,84	0,607	2280	nd	77,7	74,8	0,009	2390	200	11,2	585	177
GOR-4	32900	14	4,4	1,023	2,02	-18,8	9160	3,80	0,118	9790	nd	144	54,6	3,10	4320	469	23,9	397	1990
GOR-5	109000	18	2,8	1,101	1,32	-60,4	47900	18,1	0,522	41800	nd	375	124	10,5	21900	2550	124	626	9380
GOR-6	3300	10	6,0	1,003	7,22	0,425	200	0,159	0,0567	1710	nd	6,81	48,2	0,400	253	48,1	0,403	453	94,0
GOR-7	15790	11,7	5,0	1,011	3,87	-0,180	3980	0,689	0,0669	4730	nd	7,13	66,1	0,002	1860	132	8,88	573	950
GOR-8	12000	22	6,0	1,006	3,57	-0,360	3690	8,39	0,959	1240	nd	73,8	127	0,056	2090	149	10,2	421	82,6
GOR-9	48000	15,1	4,0	1,029	3,21	-0,620	18000	21,9	0,845	6270	nd	310	134	0,102	9660	684	48,5	1050	1210
GOR-10	5610	11,2	3,6	1,003	4,26	-0,050	1650	4,19	0,774	498	0,6	33,4	65,0	0,050	989	68,0	4,56	203	10,7
GOR-11	137100	14,7	0,6	1,225	1,61	-8,61	122000	8,95	0,961	85700	nd	1610	59,1	0,206	49000	5790	312	245	27000
GOR-12	138600	16,6	0,3	1,220	2,05	-2,08	124000	6,40	1,15	80700	nd	1580	50,7	0,013	51100	4220	328	240	27900

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	AL	FE	MN	ZN	NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF. %	NUMERO	δ ¹⁸ O	δ ² H
GOR-1	nd	nd	nd	nd	GOR-1	3276	65,3	0,2	6,2	48,83	48,05	1,6	GOR-1	-5,91	-60
GOR-2	22,4	0,10	3,02	0,27	GOR-2	5586	-	-	-	89,18	89,93	0,8	GOR-2	-8,89	-54
GOR-3	34,0	0,03	3,57	0,45	GOR-3	9775	-	-	-	158,4	158,5	0,1			
GOR-4	469	27,2	40,0	3,99	GOR-4	25746	-	-	-	441,9	443,2	0,3			
GOR-5	2320	145	185	9,48	GOR-5	123695	-	-	-	2109	2160	2,4			
GOR-6	nd	nd	nd	nd	GOR-6	2839	25,2	0,06	2,5	42,63	41,66	2,3			
GOR-7	122	0,05	15,5	1,57	GOR-7	12436	-	-	-	206,6	210,4	1,8			
GOR-8	14,0	0,22	1,81	0,22	GOR-8	7875	-	-	-	125,4	129,4	3,2			
GOR-9	217	9,94	27,0	2,62	GOR-9	37544	-	-	-	621,8	636,0	2,3			
GOR-10	2,40	0,02	0,24	0,16	GOR-10	3519	1,59	0,0	140	56,66	56,75	0,2			
GOR-11	4560	7,48	460	51,0	GOR-11	296734	-	-	-	5081	5227	2,8			
GOR-12	3780	1,01	490	55,0	GOR-12	294254	-	-	-	5127	5170	0,8			

En mg/l

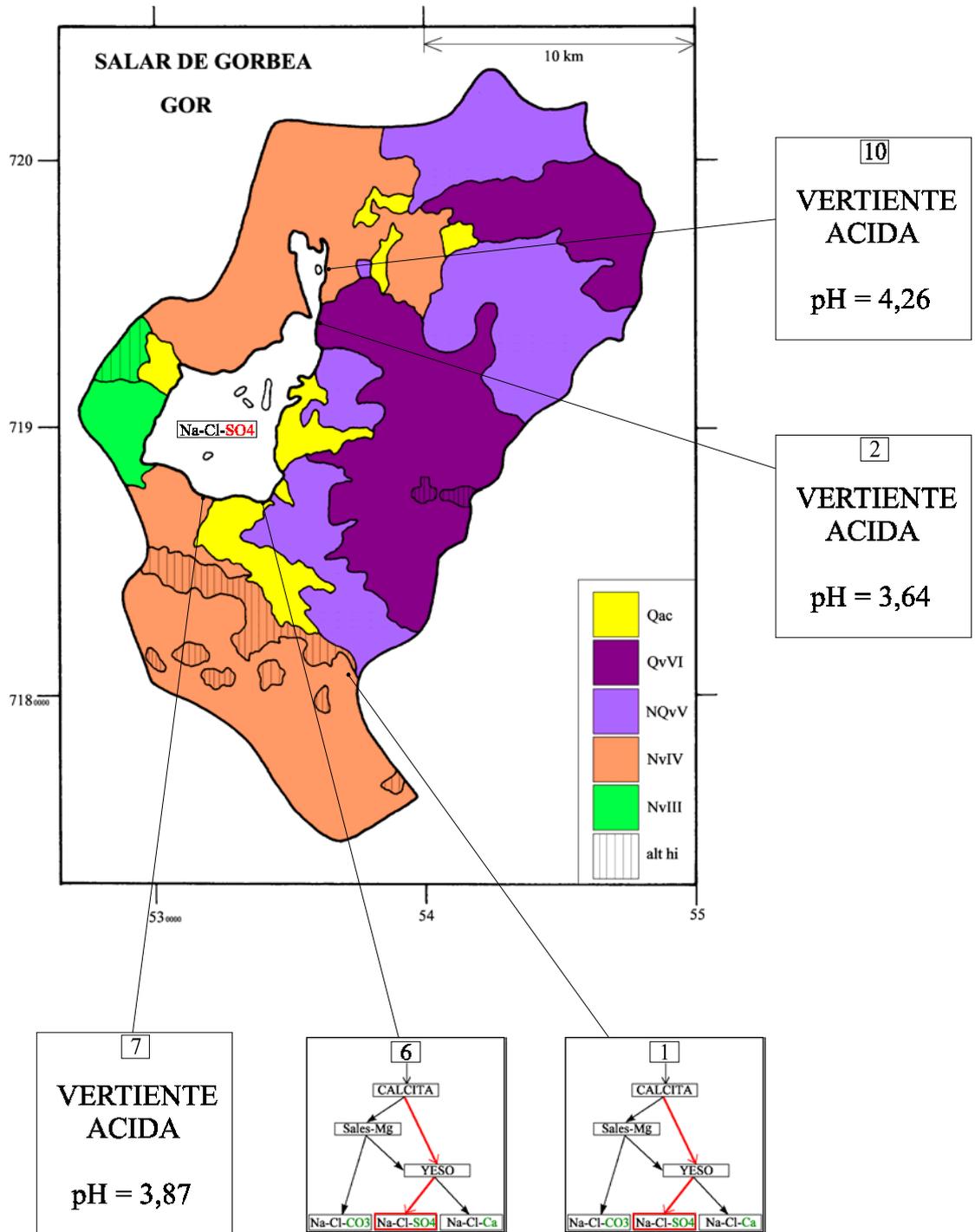
Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.
S(+) = suma cationes; S(-) = suma aniones (meq/l);
DIF.% = diferencia en %



MAPA GEOLOGICO
Y
VIAS EVOLUTIVAS

GOR

- Qac** : *Cuaternario*. Depósitos aluviales y coluviales: bloques, gravas y arenas con cenizas, arcillas y sales.
- QvVI** : *Cuaternario*. Conjunto volcánico VI: estrato-volcanes no erosionados. Andesitas y dacitas de piroxeno y biotita; dacitas de hornblenda y biotita.
- NQvV** : *Plioceno sup. - Pleistoceno inf.* Conjunto volcánico V: Lavas bien preservadas de andesitas y dacitas de piroxeno y biotita, ocasionalmente hornblenda.
- NvIV** : *Mioceno sup. - Plioceno inf.* Conjunto volcánico IV: estrato-volcanes y conos de escoria debilmente erosionados. Andesitas de dos piroxenos y dacitas de piroxeno y biotita. Ocasionalmente andesitas basálticas de olivino y piroxeno.
- NvIII** : *Mioceno medio - Mioceno sup.* Conjunto volcánico III: estrato-volcanes mediana a debilmente erosionados. Andesitas de dos piroxenos, andesitas basálticas de olivino y piroxeno. Escasas dacitas de hornblenda y biotita.
- alt hi** : alteración hidrotermal.



SALAR IGNORADO

Introducción

El muy pequeño salar Ignorado se encuentra en el norte de la Cordillera de los Andes en la Tercera Región junto a la frontera con Argentina. En el mapa aparece casi como una sub-cuenca del salar de Gorbea, pero en terreno, el relieve que separa las cuencas es bien marcado. Es una costra salina con mucho sulfato de calcio (yeso). Las lagunas son casi todas "ojos" de unos metros de profundidad donde aparece la salmuera subterránea. Las principales características morfológicas y climatológicas del salar son:

- altura: 4250 m
- superficie de la cuenca: 37,5 km²
- superficie del salar: 0,7 km²
- superficie de las lagunas: 0,002 km²
- precipitaciones: 140 mm/año
- evaporación potencial: 1000 mm/año
- temperatura media: -2°C

Hemos encontrado solamente una vertiente difusa al norte del salar que alimenta una lagunita superficial. Se extrajeron dos aguas en esta lagunita y dos otras en los "ojos" al sur del salar.

Composición de aguas y salmueras

Las composiciones de aguas del salar Ignorado están presentadas en la figura 1 y en la tabla 1. El rasgo impactante es la acidez de todas las aguas. Soluciones ácidas se encontraron también en el vecino salar de Gorbea. Parecen únicas en las cuencas evaporíticas de la Cordillera de los Andes, por lo menos en Chile y Bolivia. Se conoce un otro caso de lago salado ácido en un cráter volcánico de Indonesia (Delmelle y Bernard, 1994).

APORTE	SALINIDAD mg/l	PH	TIPO QUÍMICO		VIA EVOLUTIVA
			Cationes	Aniones	
IGN-1	4043	3,88	Ca-Na-Mg	/ SO4-(Cl)	ácida
<u>LAGUNAS</u>					
IGN-4	9654	2,65	Na-Mg-(Ca)	/ SO4-(Cl)	ácida
IGN-5	12847	3,28	Na-Mg-(Ca)	/ SO4-(Cl)	ácida
IGN-3	13106	3,06	Na-Mg-(Ca)	/ SO4-(Cl)	ácida
IGN-2	97091	4,16	Na-Mg	/ SO4-(Cl)	ácida

Tabla 1 : Salinidades, pH y tipos químicos de aguas del salar Ignorado.

El agua de la vertiente difusa (1) tiene una composición catiónica igualmente repartida entre los tres cationes Na, Ca y Mg (en meq/l) balanceados por el sulfato que constituye el 94% de los aniones (en meq/l). Los cuatro componentes Na + Ca + Mg + SO₄ suman el 92% de la salinidad

total del agua (en mg/l). La composición aniónica de las lagunas se caracteriza también por la predominancia del sulfato; pero tienen mucho menos calcio que la vertiente (en %). Son del tipo Na-Mg / SO₄ con porcentajes menores de Ca. Por otra parte, hay que recalcar el alto contenido en aluminio (hasta 2,9 g/l) y algunos otros metales (Fe, Mn, Zn) en las aguas ácidas del salar Ignorado.

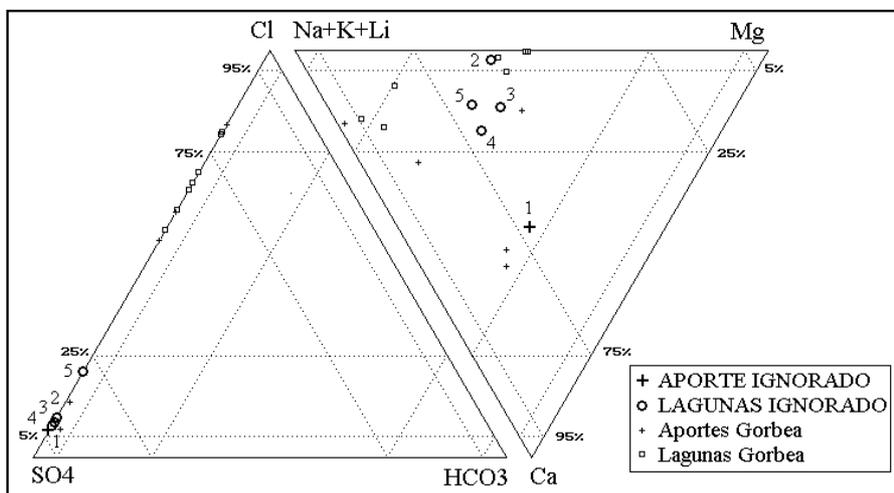


Fig.1: Composición de aguas y salmueras del salar Ignorado.

Origen de la acidez de las soluciones

El origen de las soluciones ácidas está discutida en la parte correspondiente al salar de Gorbea en el presente trabajo. Presentamos entonces solamente un resumen de la discusión. La oxidación del azufre, o de sulfuros en mineralizaciones, acidifica las aguas según reacciones del tipo:



La oxidación del azufre y de los sulfuros produce ácido sulfurico que altera fuertemente las rocas volcánicas. La alteración libera cationes y tiende a neutralizar la acidez del agua de lixiviación. Sin embargo, en el caso de Ignorado, como de Gorbea, la alteración de rocas volcánicas no logra neutralizar toda la acidez de las aguas de lixiviación, talvez porque las aguas ácidas drenan rocas ya fuertemente afectadas por la alteración hidrotermal. Los minerales secundarios producidos por esta alteración son mucho más estables que los minerales primarios.

Comparación de las aguas del salar Ignorado con las del salar de Gorbea

Los dos salares son colindantes y contienen soluciones ácidas, siendo los únicos con esta característica que conocemos en los Andes chilenos y bolivianos. Sin embargo, los dos salares presentan importantes diferencias en el detalle de sus composiciones químicas. La figura 2 ilustra algunas de estas diferencias. En el salar de Gorbea, se ha detectado dos tendencias equimolares entre componentes mayores: Ca+Mg = SO₄ y Na = Cl. En las soluciones de Ignorado, también hay una excelente correlación entre Ca+Mg y SO₄, de una parte, y Na y Cl, de otra parte, pero no de tipo equimolar como en Gorbea.

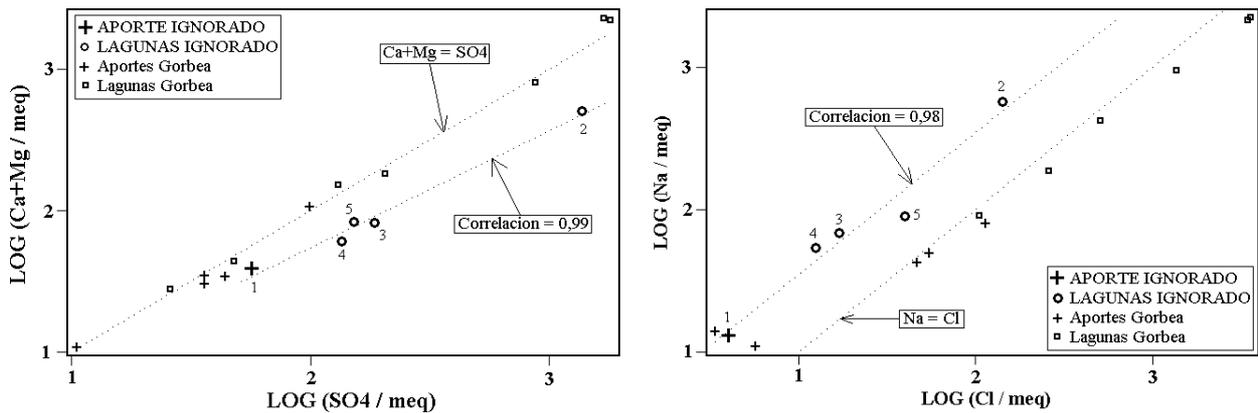


Fig.2 : Relaciones Ca+Mg versus SO₄ y Na versus Cl en aguas de Gorbea e Ignorado.

El riachuelo GOR-1 se encuentra a solamente 700 m de la vertiente difusa IGN-1 (ver mapas de ubicación). Se nota en los diagramas triangulares (Fig.1) y circulares que los dos aportes tienen la misma composición porcentual, siendo IGN-1 un poco más concentrado que GOR-1. Parece que la misma agua alimenta Gorbea e Ignorado de cada lado del límite de cuenca. Sin embargo, IGN-1 es un agua ácida (pH = 3,88) mientras que GOR-1 es neutra (pH = 7,19). Aquí debe haber una clave. Un estudio geológico e hidrogeológico detallado de este pequeño sector podría resolver el problema de las soluciones ácidas. Mientras tanto, podemos adelantar dos posibilidades:

- el agua inicial es neutra (GOR-1) y se acidifica en su trayecto hacia la cuenca de Ignorado
- el agua inicial es ácida (IGN-1) y queda neutralizada durante su trayecto en el sector alto de la cuenca de Gorbea.

Lo interesante es que, cualquier que sea el proceso, este ocurre rápidamente y en un muy pequeño sector.

Calidad de agua

Obviamente, la cuenca del salar Ignorado no presenta buenas potencialidades para recursos de agua. La única vertiente es salobre con una concentración en SO₄ diez veces por encima de la norma de potabilidad. Hay pocas posibilidades de encontrar napas diluidas cuenca arriba. Al igual que en Gorbea, el arsénico presenta una anomalía en el ámbito volcánico con azufre: su concentración es diez veces inferior a la norma de potabilidad.

Conclusiones

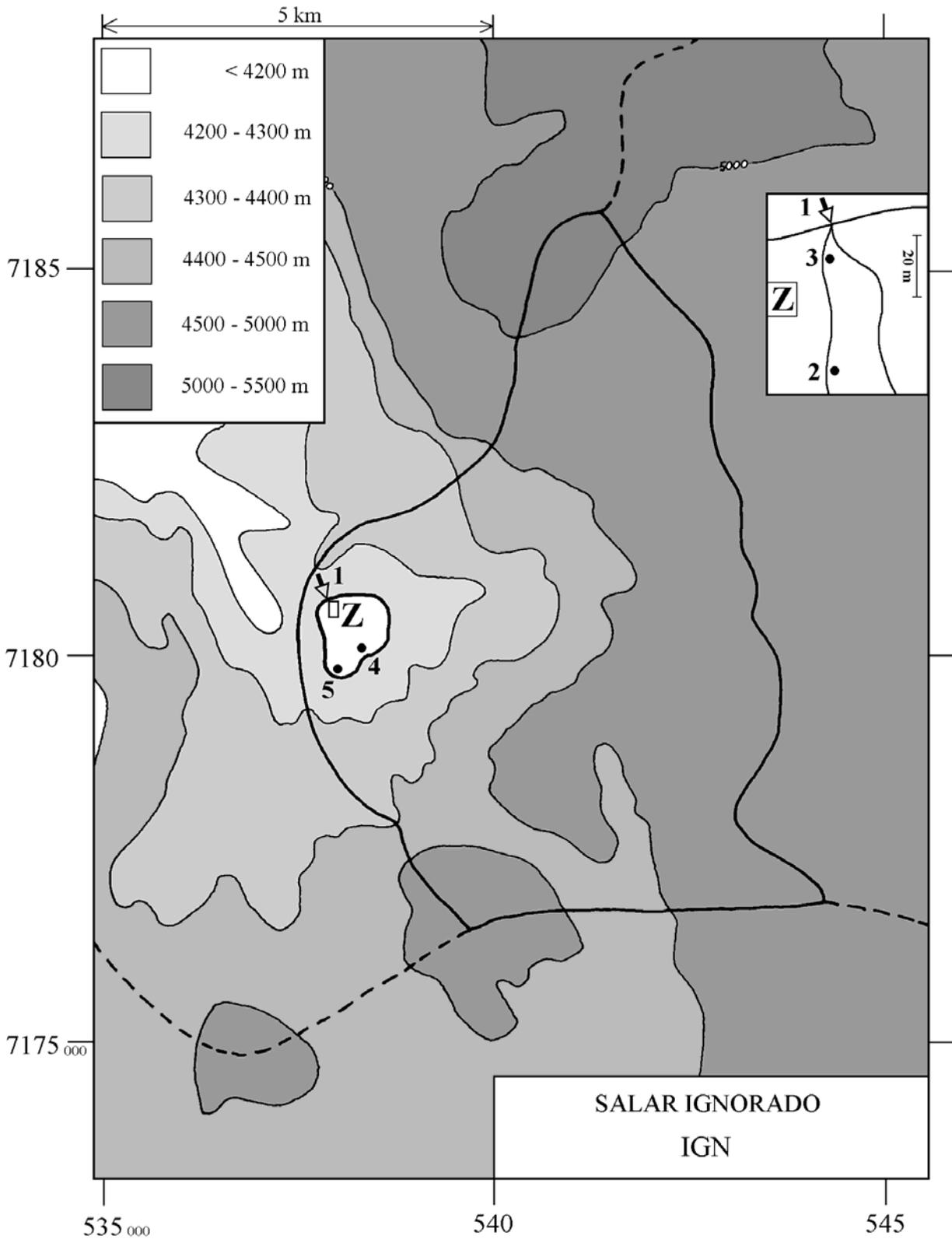
El salar Ignorado es un salar excepcional en el ámbito de los Andes Centrales. Todas sus aguas son ácidas. Solamente el vecino salar de Gorbea presenta la misma característica. Los pH bajan hasta 2,65. La acidez proviene probablemente de la oxidación del azufre o de mineralizaciones sulfuradas. Generalmente, la acidez de las soluciones así producidas queda neutralizada por la alteración de rocas volcánicas. Los cationes liberados reemplazan los protones H⁺. Este proceso no actúa en Ignorado, tal vez porque las aguas ácidas drenan rocas ya fuertemente afectadas por la alteración hidrotermal. Los minerales secundarios producidos por esta alteración son mucho más estables que los minerales primarios. Para entender los mecanismos geoquímicos que actúan en

Ignorado, es necesario un estudio detallado de su entorno geológico, en particular en el límite de cuenca con Gorbea. La cuenca de Ignorado es probablemente una de las menos favorable para la búsqueda de recursos de agua diluida. El único aporte tiene una composición muy por encima de las normas de potabilidad y de riego, con la sorprendente excepción del arsénico que presenta una baja concentración.

Referencias

Delmelle, P. y Bernard, A. 1994. Geochemistry, mineralogy, and chemical modeling of the acid crater lake of Kawah Ijen Volcano, Indonesia. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 58, 11, 2445-2460.

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



**SALAR IGNORADO
IGN**

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
IGN-1	24/03/96	11 ^H 28	537827	7180708	4250	Manantial difuso
IGN-2	24/03/96	11 ^H 40	537827	7180658	4250	Laguna
IGN-3	24/03/96	12 ^H 10	537827	7180698	4250	Poza de preconcentración
IGN-4	24/03/96	12 ^H 40	538352	7179921	4250	Napa salar (gran ojo formando laguna)
IGN-5	24/03/96	13 ^H 25	537929	7179724	4250	Napa salar (gran ojo formando laguna)

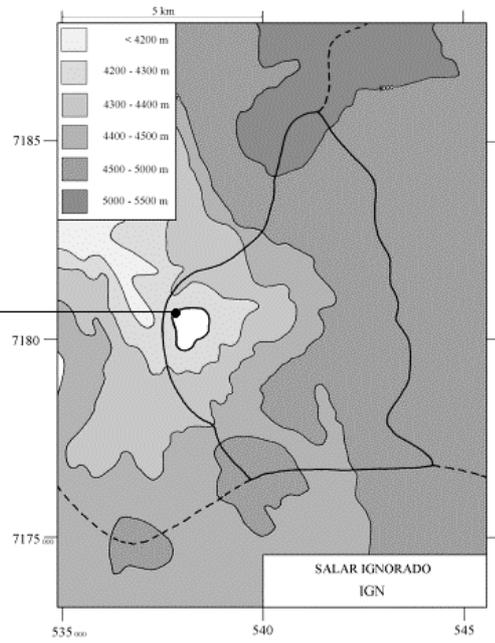
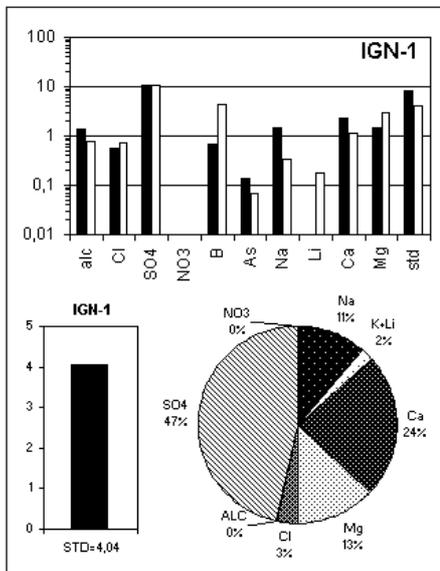
NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
IGN-1	3950	8,8	8,5	1,004	3,88	-0,11	142	0,088	0,0124	2750	nd	3,38	43,4	0,007	301	84,1	0,458	469	182
IGN-2	55400	9	3,7	1,086	2,65	-5,32	5010	na	0,213	65600	0,341	193	115	0,273	13100	4030	14,7	529	5760
IGN-3	11570	11,5	5,5	1,012	3,28	-1,15	604	0,144	0,0291	8900	nd	19,1	74,5	0,049	1580	454	1,90	449	722
IGN-4	9240	14	5,4	1,009	3,06	-2,36	444	0,151	0,0061	6490	0,025	18,1	131	0,158	1230	342	1,20	485	445
IGN-5	13190	10,5	5,5	1,012	4,16	-0,20	1410	0,409	0,0174	7300	61,6	29,2	126	0,629	2060	637	2,20	505	707

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	AL	FE	MN	ZN	NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF. %	NUMERO	δ ¹⁸ O	δ ² H
IGN-1	66,6	0,09	2,36	0,30	IGN-1	4043	-	-	-	61,25	61,09	0,3	IGN-1	-5,77	-57
IGN-2	2910	51,0	93,9	6,73	IGN-2	97091	-	-	-	1507	1502	0,4			
IGN-3	356	1,40	12,0	0,79	IGN-3	13106	-	-	-	202,4	201,3	0,6			
IGN-4	194	4,80	5,00	4,97	IGN-4	9654	-	-	-	145,3	145,3	0,02			
IGN-5	19,6	0,25	5,49	0,65	IGN-5	12847	-	-	-	191,8	192,4	0,3			

En mg/l

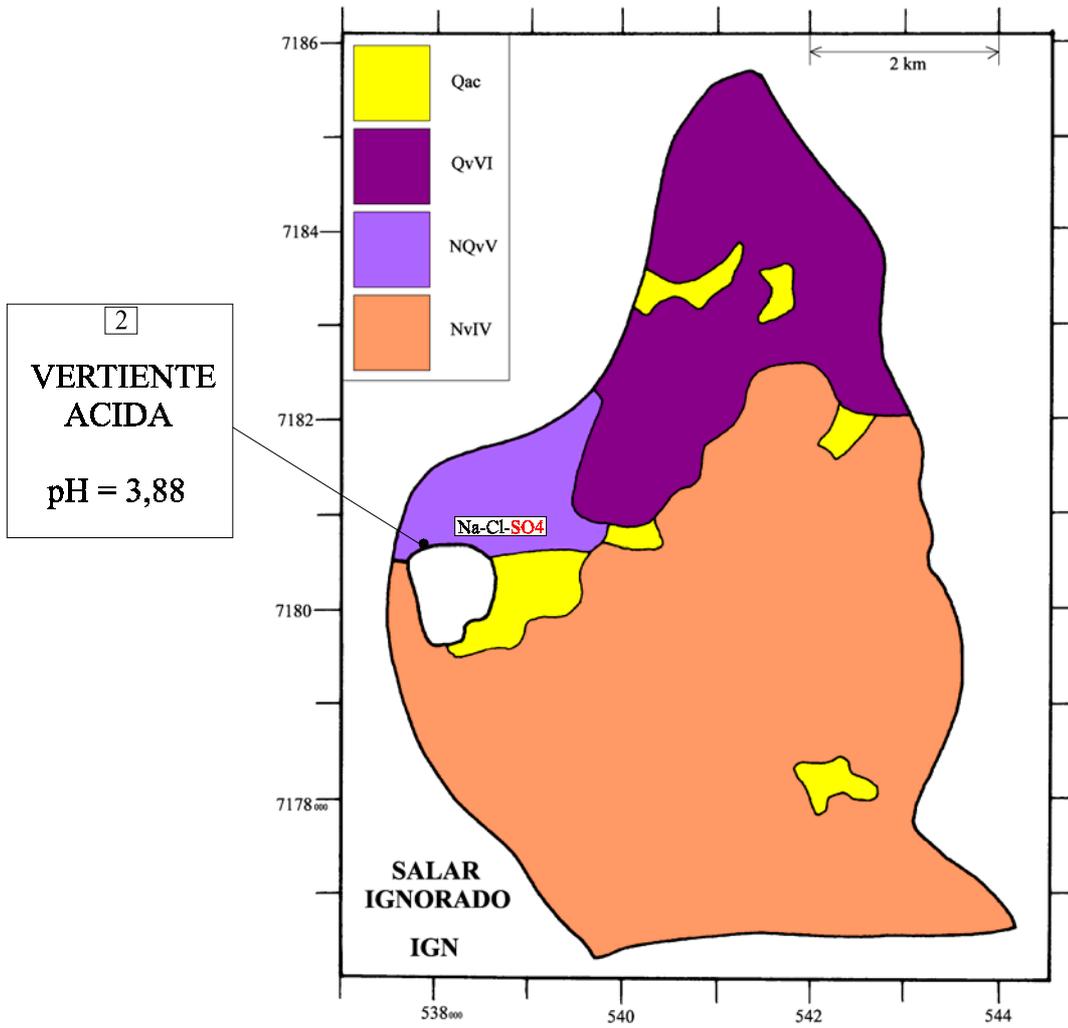
Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.
S(+) = suma cationes; S(-) = suma aniones (meq/l)
DIF.% = diferencia en %



MAPA GEOLOGICO Y VIAS EVOLUTIVAS

IGN

- Qac** : *Cuaternario*. Depósitos aluviales y coluviales: bloques, gravas y arenas con cenizas, arcillas y sales.
- QvVI** : *Cuaternario*. Conjunto volcánico VI: estrato-volcanes no erosionados. Andesitas y dacitas de piroxeno y biotita; dacitas de hornblenda y biotita.
- NQvV** : *Plioceno sup. - Pleistoceno inf.* Conjunto volcánico V: Lavas bien preservadas de andesitas y dacitas de piroxeno y biotita, ocasionalmente hornblenda.
- NvIV** : *Mioceno sup. - Plioceno inf.* Conjunto volcánico IV: estrato-volcanes y conos de escoria debilmente erosionados. Andesitas de dos piroxenos y dacitas de piroxeno y biotita. Ocasionalmente andesitas basálticas de olivino y piroxeno.



SALAR DE LA AZUFRERA

Introducción

El salar de la Azufrera (que no hay que confundir con la *laguna de la Azufrera* en la Segunda Región) se encuentra en el extremo norte de la Cordillera de los Andes en la Tercera Región. Es una costra de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) con dos lagunitas adjuntas a su orilla occidental. En el volcán que cierra la cuenca al este, existe un importante yacimiento de azufre anteriormente explotado. También debe haber azufre en el volcán Azufre, al nor-oeste de la cuenca. En las ignimbritas que bordean la orilla nor-oeste del salar se encuentran varias cuevas que sirvieron de campamento durante la explotación de la azufrera: es el campamento Plato de Sopa. Las principales características morfológicas y climatológicas de la cuenca son:

- altura: 3580 m
- superficie de la cuenca: 214 km²
- superficie del salar: 3,3 km²
- superficie de las lagunas: 0,02 km²
- precipitaciones: 120 mm/año
- evaporación potencial: 1100 mm/año
- temperatura media: 3°C

Hemos muestreado un perfil de aguas de concentración creciente en la pequeña laguna más cercana al campamento Plato de Sopa. Se encontraron dos aportes: una napa subterránea en una pileta que servía para la alimentación del campamento y una vertiente difusa, 400 m más al sur, en el bofedal que alimenta la lagunita.

Composición de aguas y salmueras

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

<u>APORTES</u>	<u>SALINIDAD</u> mg/l	<u>TIPO QUÍMICO</u>		<u>VÍA EVOLUTIVA</u>
		Cationes	Aniones	
AZU-7	548	Ca - (Na) - (Mg)	Cl - SO ₄ - (HCO ₃)	Ca
AZU-1	2184	Ca - Na - (Mg)	Cl - (SO ₄)	Ca
<u>LAGUNAS</u>				
AZU-4	8245	Na - Ca - (Mg)	Cl - (SO ₄)	Ca
AZU-5	19227	Na - Ca - (Mg)	Cl - (SO ₄)	Ca
AZU-2	54868	Na - (Ca) - (Mg)	Cl	Ca
AZU-3	129124	Na - Ca - (Mg)	Cl	Ca
AZU-6	323473	Na - Ca - (Mg)	Cl	Ca

Tabla 1 : Salinidades, tipos químicos y vías evolutivas de aguas del salar de la Azufrera.
Ca = vía cálcica.

El salar de la Azufrera se caracteriza por ser el más cálcico de todos los salares de la Cordillera Andina chilena. El agua de napa (7) tiene la concentración porcentual en calcio más elevada de todas las aguas extraídas en los 52 salares estudiados, constituyendo el 70% de los cationes o el 35% de todos los componentes (en meq/l). La salmuera (6) presenta la concentración absoluta más elevada en calcio: 43 g/l. Todas las aguas pertenecen entonces al tipo Na - Ca / Cl, con proporciones variables entre Na y Ca y un contenido porcentual en sulfato que disminuye con el aumento de la salinidad. Los dos aportes tienen composiciones distintas. La vertiente difusa es cuatro veces más concentrada que la napa.

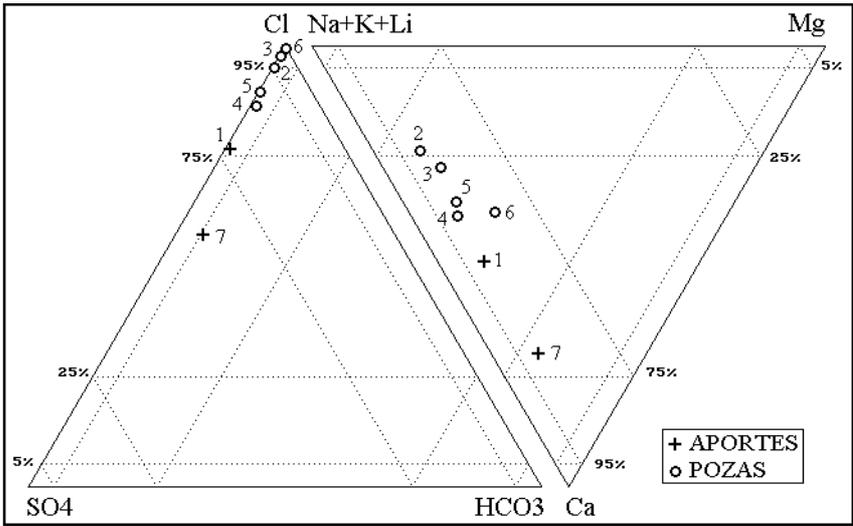
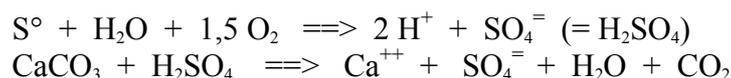


Fig.1: Composición de aguas y salmueras del salar de la Azufrera.

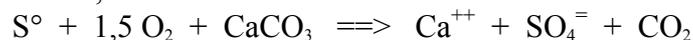
Origen de los componentes disueltos

La composición de la napa (7) es muy peculiar en el ambiente de las cuencas cerradas de la Cordillera. Se puede hacer las siguientes observaciones:

- la diferencia de salinidad entre la vertiente difusa salobre (1) con 2184 mg/l y la napa diluida (7) con 548 mg/l, es de 1636 mg/l, que se reparten en 80% para los tres componentes Na, Ca y Cl y 20% para todos los otros. Además, los aumentos en meq/l de Na (12,7), Ca (11,7) y Cl (23) casi concuerdan con la relación $Na+Ca = Cl$. Eso sugiere que la vertiente difusa y salobre (1) proviene de la contaminación del agua diluida de napa (7) por una salmuera de tipo Na-Ca / Cl.
- en el agua de napa diluida (7), los componentes Na, Ca y Cl no presentan la relación $Na+Ca = Cl$. El muy elevado contenido en Ca del agua no se debe exclusivamente a su mezcla con una salmuera de tipo Na - Ca / Cl. Aunque es posible que haya un leve aporte de tal tipo, puesto que se la observa en una solución cercana, no puede explicar todo el exceso de calcio en el agua de napa.
- la concentración porcentual relativamente elevada del sulfato (19% en meq/l) y la baja alcalinidad del agua de napa (0,474 meq/l) sugieren que el sulfato proviene de la oxidación del azufre de los volcanes de la cuenca. El muy alto contenido en Ca del agua de napa podría provenir de la alteración de rocas sedimentarias (calizas, por ejemplo) por aguas de lixiviación acidificadas por la oxidación del azufre. Esquemáticamente las reacciones serian:



Sumando las dos ecuaciones, se obtiene el balance final:



Se nota que no se forma iones bicarbonato (HCO_3^-), principal constituyente de la alcalinidad, como ocurre cuando el agua de alteración contiene ácido carbónico por disolución del CO_2 atmosférico ($\text{H}_2\text{CO}_3 = \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$). Eso es consistente con la baja alcalinidad del agua de napa.

Vías evolutivas y relación con la geología

No hay relación entre la vía evolutiva cálcica de los aportes y la geología superficial enteramente volcánica de la cuenca de drenaje. Es probablemente a este respecto uno de los salares de composición más anómala entre todos los que hemos estudiado. En una cuenca volcánica con abundante azufre, las salmueras son normalmente sulfatadas ($\text{Na} / \text{Cl-SO}_4$). En cambio en el salar de la Azufrera, no solamente son cálcicas, sino que además son las más cálcicas de todos los salares de las Cordillera chilena. Las aguas estudiadas no provienen por tanto de la alteración de rocas de la cuenca de drenaje.

Evolución cuantitativa de aguas

Veamos ahora la evolución cuantitativa de las aguas de aporte cuando se evaporan.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
<u>AZU-1</u>	7,05	0,407	973	381	4,70	26,4	327	31,2	0,756	350	39,9	
AZU-7E	8,00	0,491	681	639	1,64	33,1	146	45,6	0,195	472	40,2	0,359
<u>AZU-4.EQ</u>	7,91	0,497	4320	824	12,4	23,5	1600	113	2,78	1070	156	
AZU-1E	7,88	0,492	3800	1370	18,4	30,6	1280	122	2,96	1310	156	0,058
AZU-7E	7,83	0,388	3640	1240	8,74	32,4	781	244	1,04	1570	215	0,249
<u>AZU-5.EQ</u>	7,81	0,560	10500	1480	37,8	23,7	3870	332	7,50	2320	423	
AZU-1E	7,78	0,607	10500	1370	50,9	29,2	3540	338	8,19	2580	431	0,017
AZU-7E	7,73	0,406	9920	1180	23,8	31,1	2130	664	2,84	3350	586	0,216
<u>AZU-2.EQ</u>	7,71	1,12	31900	1840	124	25,0	13900	1010	13,9	4370	1080	
AZU-1E	7,63	1,28	32200	1320	156	25,2	10800	1040	25,1	6710	1320	0,077
AZU-7E	7,58	0,712	30100	1100	72,3	27,1	6460	2020	8,62	9120	1780	0,247
<u>AZU-3.EQ</u>	6,47	1,56	78500	1240	266	17,5	30.000	2520	47,5	12100	3160	
AZU-1E	7,37	3,06	77400	1040	376	17,9	26100	2490	60,4	15300	3180	0,030
AZU-7E	7,34	1,68	72200	834	173	19,9	15500	4840	20,7	21100	4270	0,218
<u>AZU-6</u>	5,92	27,3	202000	466	910	21,9	55200	7590	166	43300	11700	
AZU-1E	6,36	3,65	196000	257	877	5,87	66100	6310	153	37600	8060	0,190
AZU-7E	6,75	3,84	165000	287	397	8,55	35500	11100	47,4	47700	9770	0,327

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

La tabla 2 presenta la composición calculada de todas las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta la salinidad de las diversas lagunas. 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 (AZU-xE) y las lagunas (AZU-x.EQ). Todas las composiciones de las lagunas fueron ajustadas al equilibrio con los minerales que las sobresaturan.

Se confirma primero que la vertiente difusa 1 no proviene de la evaporación del agua de napa 7. El coeficiente de desviación es elevado (0,359). Las soluciones de la laguna resultan de la evaporación de la vertiente difusa 1 y no de la napa 7.

Calidad de aguas

El agua de napa (7) es de buena calidad, tanto para el consumo humano como para el riego. Todos sus componentes cumplen con las normas, incluido el arsénico. Es la única agua de calidad potable que hemos encontrado en la Cordillera, entre el salar de Aguas Calientes 4 al norte y el salar de Pedernales al sur.

Balance hídrico

Podemos establecer un orden de magnitud del caudal de aporte de la vertiente difusa (1) a la pequeña laguna superficial. Las infiltraciones por el fondo de la laguna parecen ser despreciables puesto que existen salmueras muy concentradas. Los parámetros considerados son :

- $H_e = 1,1$ m/año
- $H_p = 0,12$ m/año
- $S = 0,02$ km²

Volumen de aporte : $V_{ap} = S(H_e - H_p) = 20\ 000$ m³/año = 0,6 l/s.

Es un caudal muy bajo que no permite esperar grandes recursos de agua.

Conclusiones

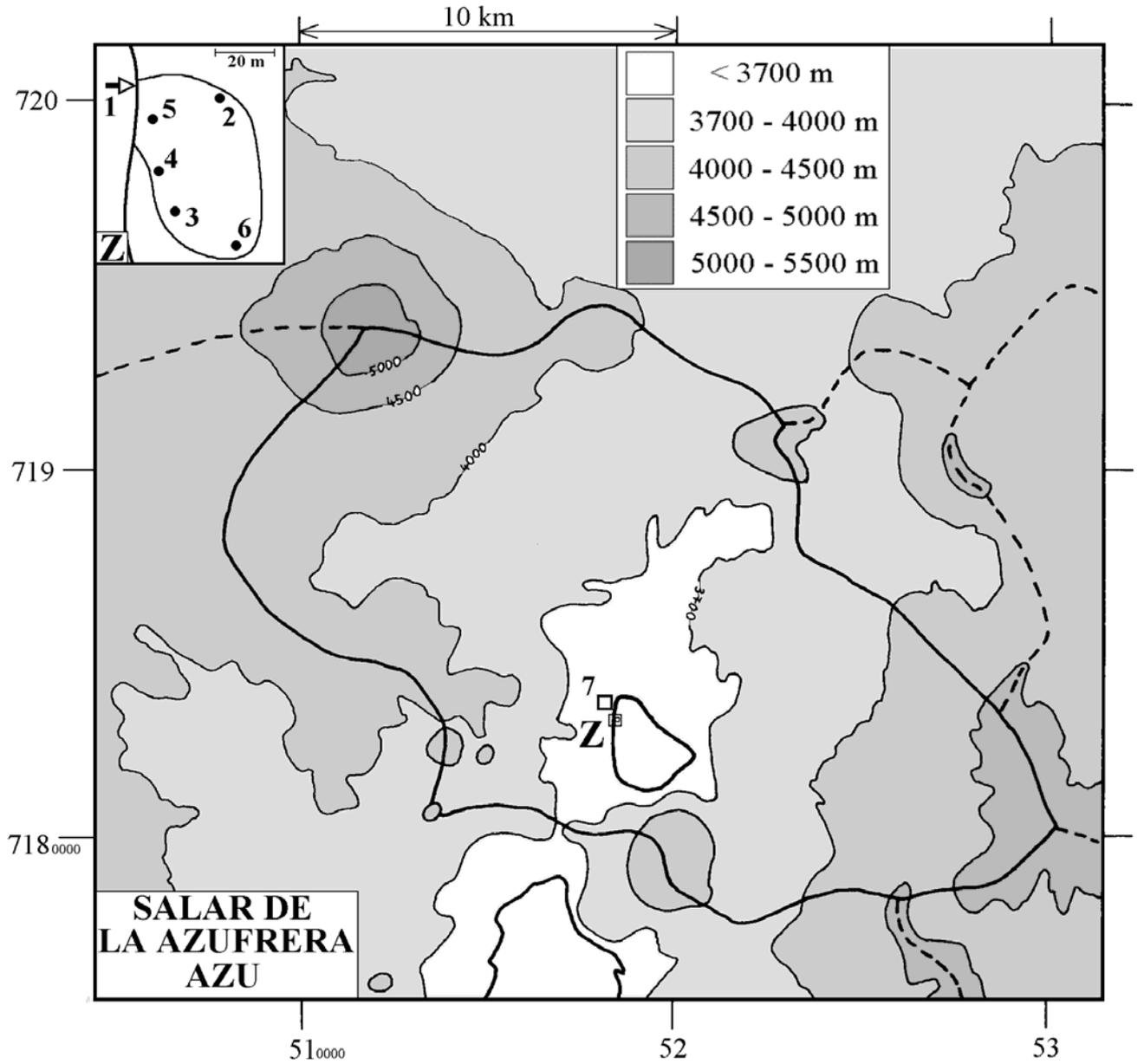
El salar de la Azufrera recibe muy poca agua superficial en su orilla oeste. Se forman pequeñas lagunas de 100 a 200 m de diámetro. Las aguas de aporte son las más cálcicas de todas las aguas estudiadas en los 52 salares de la Cordillera Andina chilena. Esta composición y la vía evolutiva cálcica de los aportes, discrepan completamente con la litología superficial de la cuenca de drenaje constituida de formaciones volcánicas con azufre. En tal ambiente, el salar de la Azufrera debería tener salmueras ricas en sulfato de sodio. El alto contenido en calcio tiene varios orígenes:

- la salinización de los aportes diluidos por salmueras residuales de tipo Na-Ca / Cl de antiguos salares recubiertos por formaciones volcánicas más recientes. La ocurrencia probable de este mecanismo, no es suficiente para explicar todo el exceso de calcio.

- la alteración de rocas sedimentarias (calizas, por ejemplo) por aguas de lixiviación acidificadas por la oxidación del azufre de los volcanes. Esta es la hipótesis más simple para explicar la gran cantidad de Ca y baja alcalinidad en la napa de agua diluida al nor-oeste el salar. Sin embargo, no aparecen rocas sedimentarias en el mapa geológico de la cuenca.

El agua de napa de la orilla oeste del salar es la única diluida de buena calidad que hemos encontrado en un amplio sector cordillerano de la Tercera Región. Lamentablemente, no parece que las reservas de agua sean importantes ya que los caudales entrantes al salar son muy bajos.

→ MANANTIAL FLUYENTE	⇒ RIO, RIACHUELO	○ POZO
⇨ MANANTIAL DIFUSO	• LAGUNA, POZA	□ CALICATA, DREN, CAPTACION



**SALAR DE LA AZUFRERA
AZU**

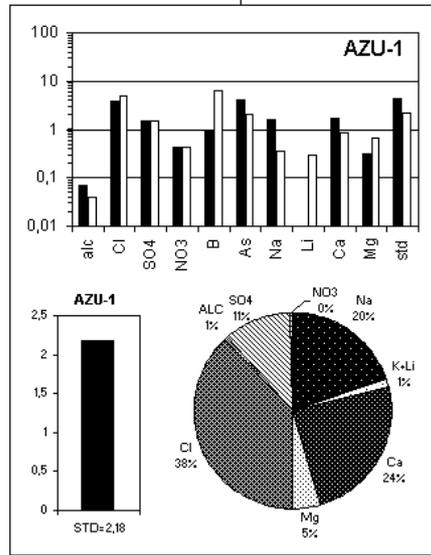
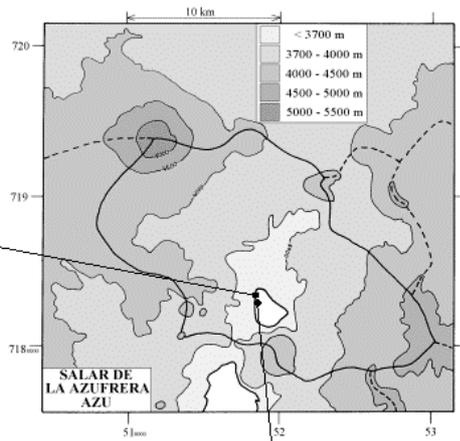
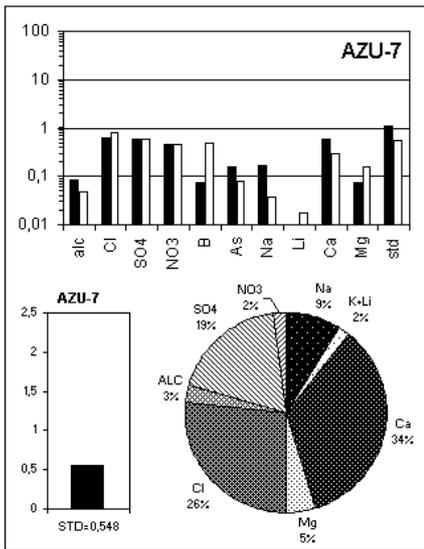
NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
AZU-1	14/03/96	11 ^H 14	518298	7183303	3580	Manantial difuso
AZU-2	14/03/96	11 ^H 30	518318	7183296	3580	Lagunita superficial
AZU-3	14/03/96	11 ^H 45	518308	7183259	3580	Lagunita superficial
AZU-4	14/03/96	11 ^H 50	518304	7183266	3580	Bofedal
AZU-5	14/03/96	12 ^H 03	518305	7183289	3580	Bofedal
AZU-6	14/03/96	12 ^H 30	518317	7183257	3580	Lagunita superficial
AZU-7	14/03/96	13 ^H 05	518323	7183747	3585	Napa (Pozo)

NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
AZU-1	3430	10,2	6,2	1,002	7,05	0,407	973	0,511	0,311	381	18,6	4,70	26,4	0,205	327	31,2	0,756	350	39,9
AZU-2	70700	21,7	3,8	1,040	7,80	3,83	31700	6,23	1,15	2090	5,39	124	33,9	5,00	14000	1010	13,9	4530	1080
AZU-3	141200	22,4	2,4	1,092	7,18	8,43	77700	22,3	1,99	1960	4,10	266	33,3	3,09	30400	2520	47,5	12500	3160
AZU-4	12730	16,5	8,7	1,006	8,35	1,74	4260	1,84	0,516	824	nd	12,4	23,5	0,177	1640	113	2,78	1100	156
AZU-5	27000	24,3	7,4	1,015	8,10	1,29	10400	4,43	0,987	1580	3,91	37,8	23,7	1,25	3980	332	7,50	2380	423
AZU-6	216000	23,4	na	1,231	5,92	27,3	202000	69,4	11,1	466	96,7	910	21,9	4,85	55200	7590	166	43300	11700
AZU-7	827,0	4,8	6,9	1,001	7,48	0,474	157	0,089	0,085	148	20,5	0,378	16,4	0,008	33,8	10,6	0,045	117	9,31

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
AZU-1	2184	24,5	0,06	3,7	35,87	36,05	0,5	AZU-7	-5,56	-51
AZU-2	54868	113	11,0	2,2	952,7	940,5	1,3			
AZU-3	129124	325	28,4	31	2275	2239	1,6			
AZU-4	8245	75,6	7,62	0,48	142,3	138,9	2,4			
AZU-5	19227	31,9	3,90	0,30	336,2	326,4	3,0			
AZU-6	323473	-	-	-	5740	5739	0,02			
AZU-7	548,3	28,7	0,06	2,0	8,353	8,295	0,7			

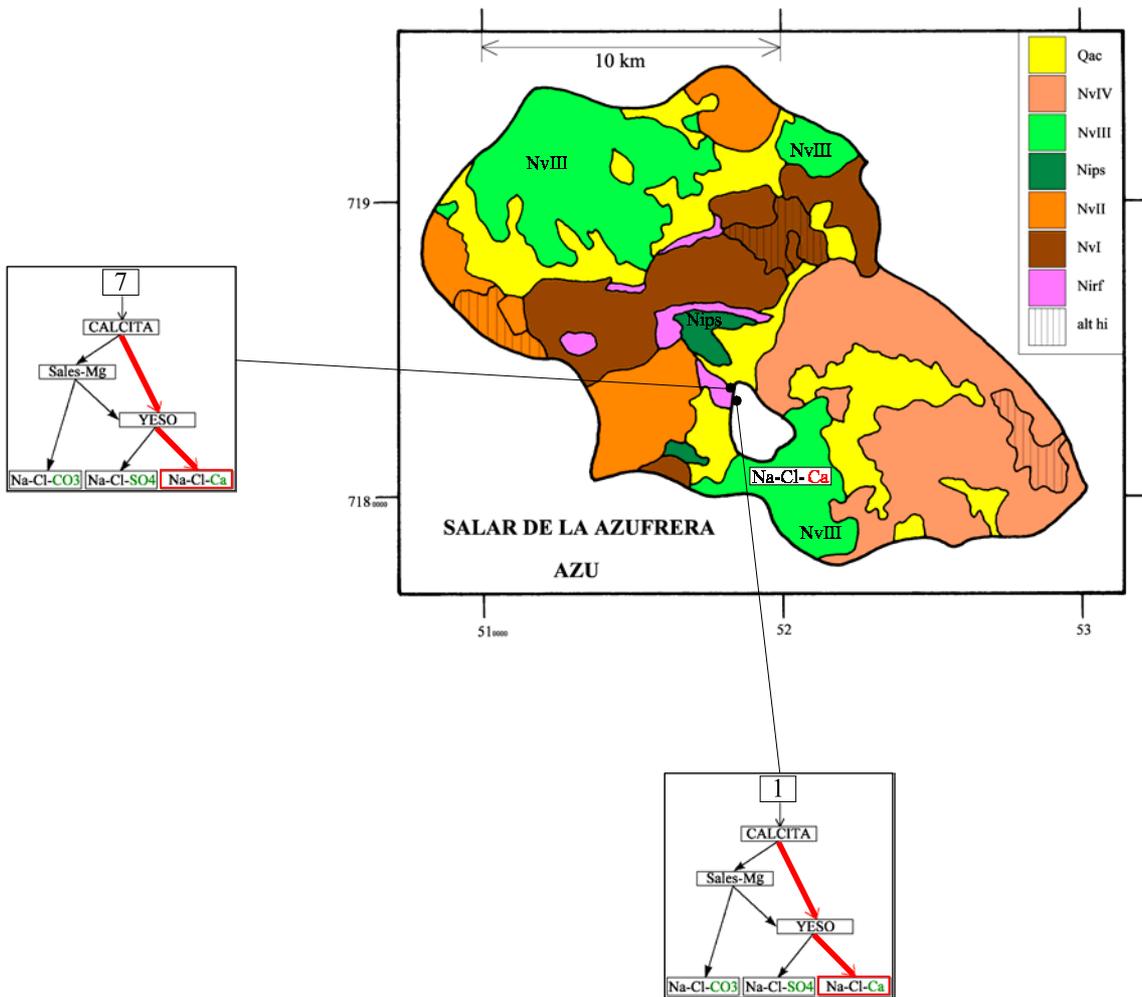
Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.
 S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l)
 DIF.% = diferencia en %



MAPA GEOLOGICO
Y
VIAS EVOLUTIVAS

AZU

- Qac** : *Cuaternario*. Depósitos aluviales y coluviales: bloques, gravas y arenas con cenizas, arcillas y sales.
- NvIV** : *Mioceno sup. - Plioceno inf.* Conjunto volcánico IV: estrato-volcanes y conos de escoria debilmente erosionados. Andesitas de dos piroxenos y dacitas de piroxeno y biotita. Ocasionalmente andesitas basálticas de olivino y piroxeno.
- NvIII** : *Mioceno medio - Mioceno sup.* Conjunto volcánico III: estrato-volcanes mediana a debilmente erosionados. Andesitas de dos piroxenos, andesitas basálticas de olivino y piroxeno. Escasas dacitas de hornblenda y biotita.
- Nips** : *Mioceno medio*. Ignimbrita Plato Superior. Toba dacítica, rica en cristales (plg, anf, bi).
- NvII** : *Mioceno inf. - Mioceno medio*. Conjunto volcánico II: estrato-volcanes medianamente erosionados. Andesitas de piroxenos y daciandesitas de hornblenda.
- NvI** : *Oligoceno - Mioceno inf.* Conjunto volcánico I: estrato-volcanes rofundamente erosionados. Andesitas de ortopiroxeno y clinopiroxeno con daciandesitas de hornblenda y/o biotita y piroxeno. Ocasionalmente andesitas basálticas de ortopiroxeno y olivino.
- Nirf** : *Mioceno inf.* Ignimbrita Río Frío. Tobas dacíticas ricas en cristales (plg, anf, px, bi).
- alt hi** : alteración hidrotermal.



SALAR DE AGUA AMARGA

Introducción

El salar de Agua Amarga se encuentra al extremo norte de la Cordillera Andina de la Tercera Región al sur de los salares de Punta Negra y de Pajonales. Es una costra de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y de halita (NaCl) con "ojos" al norte y pequeñas lagunas superficiales mal definidas en las orillas este y sur. La gran laguna que aparece en los mapas topográficos IGM no existe. En realidad, es una costra de yeso rugosa coloreada en marrón por partículas terrosas. El mapa geológico no presenta este error. Las principales características morfométricas y climatológicas del salar son:

- altura: 3558 m
- superficie de la cuenca: 863 km²
- superficie del salar: 23 km²
- superficie de las lagunas: 0,04 km²
- precipitaciones: 120 mm/año
- evaporación potencial: 1100 mm/año
- temperatura media: 2°C

Hemos encontrado dos vertientes, una difusa y la otra fluyente.

Composición de aguas y salmueras

Las composiciones de aguas del salar de Agua Amarga están presentadas en la figura 1 y en la tabla 1. Los dos aportes son salados: AMA-3 (7,6 g/l) y AMA-5 (18,2 g/l). La composición química de los aportes y de las lagunas se caracteriza por su alto contenido porcentual en calcio. Las aguas son un poco más cálcicas al sur del salar (1, 2, 3). Las salmueras pertenecen al megagrupo Na-Ca / Cl.

<u>APORTES</u>	<u>SALINIDAD</u> mg/l	<u>TIPO QUÍMICO</u>		<u>VÍA EVOLUTIVA</u>
		Cationes	Aniones	
AMA-3	7656	Ca-Na- (Mg)	/ Cl	Ca
AMA-5	18234	Na-Ca- (Mg)	/ Cl- (SO4)	Ca
<u>LAGUNAS</u>				
AMA-2	16737	Ca-Na- (Mg)	/ Cl	Ca
AMA-1	31312	Ca-Na- (Mg)	/ Cl	Ca
AMA-6	84335	Na-Ca- (Mg)	/ Cl	Ca
AMA-4	196672	Na-Ca- (Mg)	/ Cl	Ca

Tabla 1 : Salinidades, tipos químicos y vías evolutivas de aguas del salar del Agua Amarga. Ca = vía cálcica.

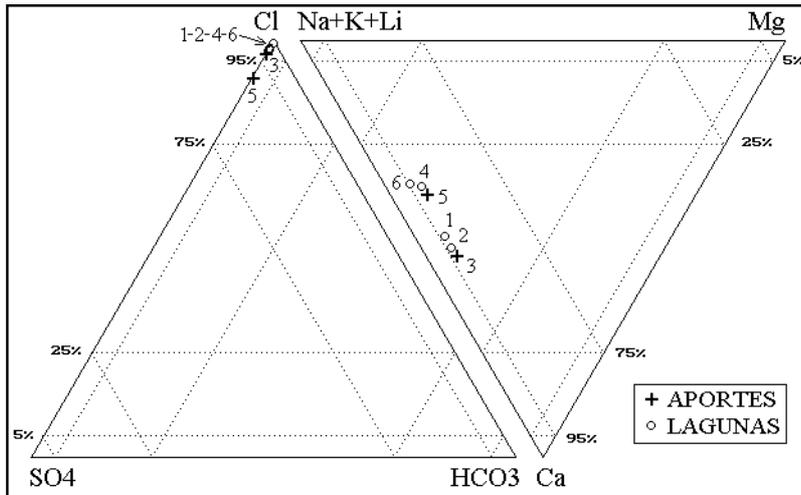


Fig.1: Composición de aguas y salmueras del salar de Agua Amarga.

Origen de los componentes disueltos

La única relación de equimolaridad entre componentes mayores de los aportes que se haya encontrado es entre Na+Ca y Cl (Fig.2). La suma Na+Ca +Cl corresponde al 94 % de la salinidad de AMA-3, y al 89 % de la de AMA-5. Eso sugiere una salinización de aguas diluidas por salmueras residuales de cloruros de sodio y calcio de un antiguo salar recubierto por formaciones volcánicas. No se trata de la redisolución de sales cristalizadas porque el cloruro de calcio es una sal extremadamente soluble que solamente precipita a temperaturas muy bajas que no se encuentran en este ambiente andino.

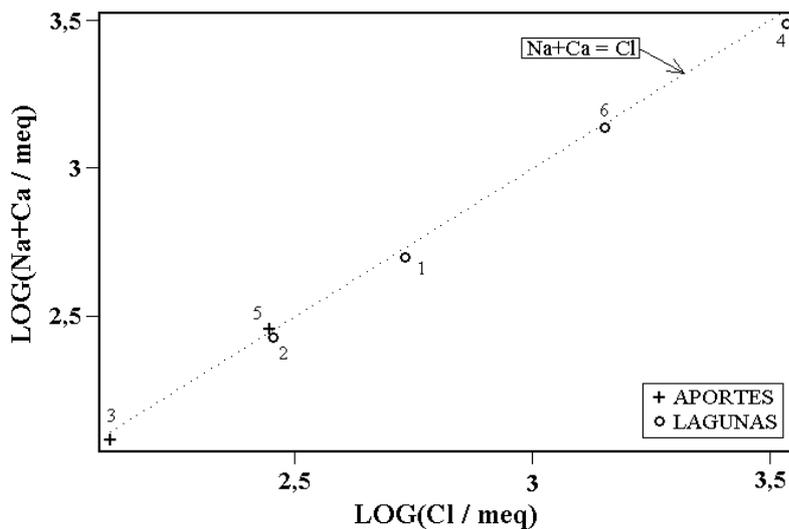


Fig.2 : Relación entre Na+Ca y Cl en aguas del salar de Agua Amarga

Vías evolutivas y relación con la geología

La vía evolutiva cálcica caracteriza aguas que drenan terrenos sedimentarios. Según el mapa geológico, la cuenca es casi enteramente volcánica. Se nota solamente la presencia limitada de pequeñas manchas de Gravas de Atacama al oeste del salar. Las aguas de aporte no tienen relación con la litología de la cuenca, lo que está totalmente en acuerdo con el origen de la mayor parte de los componentes por disolución de antiguas salmueras.

Evolución cuantitativa de aguas

Veamos ahora la evolución cuantitativa de las aguas de aporte cuando se evaporan. La tabla 2 presenta la composición calculada de todas las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta la salinidad de las diversas lagunas. 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 (AMA-xE) y las lagunas (AMA-x.EQ). Las composiciones de algunas lagunas fueron ajustadas al equilibrio con los minerales que las sobresaturan.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
<u>AMA-2.EQ</u>	7,75	0,364	10100	305	13,0	28,7	2850	153	7,43	2910	227	
AMA-3E	7,72	0,337	10000	424	12,3	31,3	2690	147	6,90	3080	227	0,013
<u>AMA-1.EQ</u>	7,67	0,419	19000	428	31,1	27,1	5640	303	14,7	5170	411	
AMA-3E	7,63	0,354	18800	793	22,9	29,6	5020	274	12,9	5740	423	0,051
AMA-5E	7,71	1,02	17800	1400	125	29,4	6600	347	25,8	3800	540	0,309
<u>AMA-6</u>	7,29	2,14	50400	1300	161	38,9	19800	946	53,5	10300	970	
(3) + (5)	7,51	2,04	50600	1120	263	21,6	17200	908	61,3	11200	1410	0,076
AMA-5E	7,51	2,69	50100	1280	350	23,4	18600	974	72,5	9570	1520	0,109
AMA-3E	7,46	0,642	51500	924	63	24,0	13800	754	35,4	15200	1160	0,163
<u>AMA-4</u>	6,84	10,6	121000	674	515	35,0	43200	2490	157	24100	3090	
(3) + (5)	7,06	4,48	120000	646	616	12,5	40700	2150	145	25700	3340	0,097
AMA-5E	6,93	4,33	119000	739	794	13,4	44100	2310	172	21700	3600	0,104
AMA-3E	7,07	1,51	122000	510	149	14,3	32600	1780	83,6	35300	2750	0,271

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

Se observa que las aguas de lagunas (1) y (2) al sur del salar provienen de la evaporación de la vertiente difusa (3). La laguna (6), al este, tiene una buena correlación con la evaporación de la mezcla de las dos vertientes (50 % de AMA-3 con 50 % de AMA-5). La salmuera de la napa (4) tiene una relación aceptable con la vertiente evaporada (5), pero no con la vertiente sur. La mezcla de las dos vertiente mejora un poco la correlación. No aparece entonces ningún problema particular en la evolución de las aguas de aporte por evaporación.

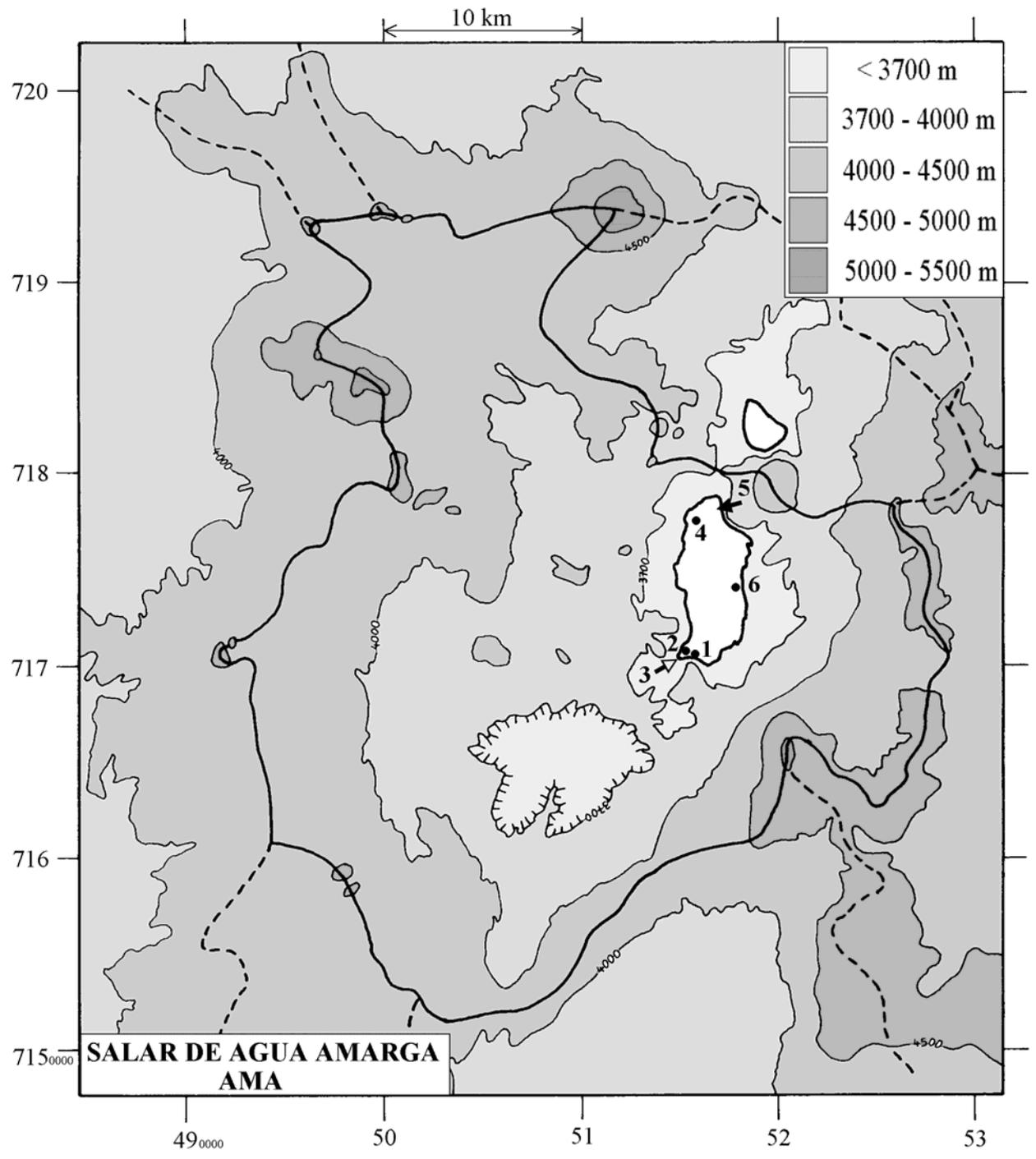
Calidad de aguas

Debido a sus altas salinidades, ninguna de las dos aguas de aporte cumple con las normas chilenas de potabilidad o de riego. La vertiente fluyente (5) tiene una concentración excepcionalmente elevada en arsénico: 14,3 mg/l o sea 286 veces el máximo permitido por la norma de potabilidad. Al contrario, la vertiente difusa (3) no sobrepasa la norma para el arsénico (pero si para la salinidad total)

Conclusiones

El salar de Agua Amarga recibe aguas de aporte muy salinas provenientes de antiguas salmueras residuales de tipo Na-Ca / Cl. Las soluciones del salar son todas del mismo tipo cálcico, sin relación con la geología de la cuenca de drenaje. La salinización de los aportes y sus caudales entrantes muy reducidos - que no permiten desarrollar lagunas bien delimitadas - no alientan a encontrar recursos de agua en la cuenca, por lo menos en la proximidad del salar.

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



**SALAR DE AGUA AMARGA
AMA**

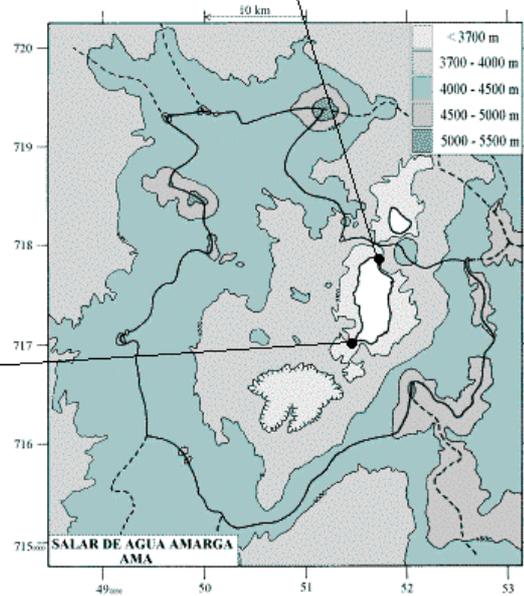
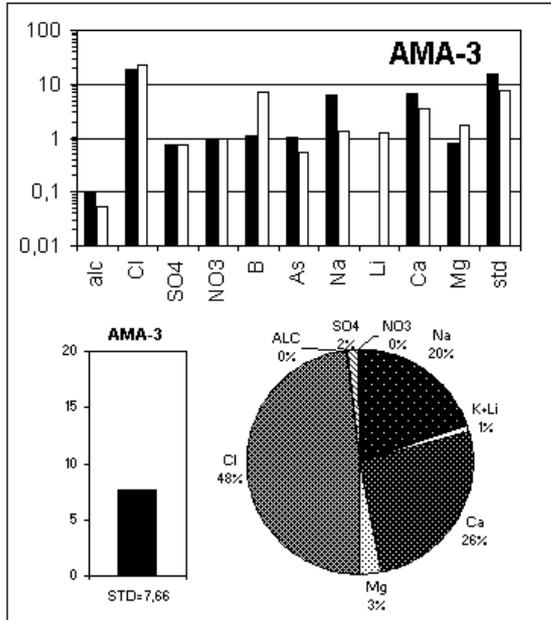
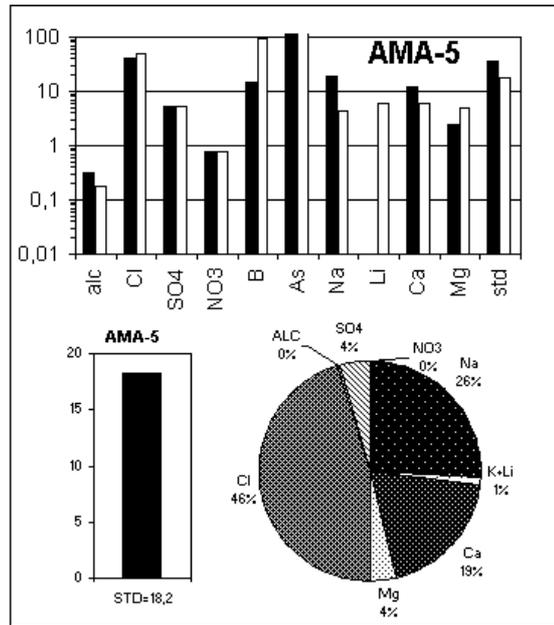
NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
AMA-1	19/03/96	14 ^H 30	515457	7170559	3557	Laguna
AMA-2	19/03/96	15 ^H 30	514980	7170364	3557	Laguna
AMA-3	19/03/96	15 ^H 45	514966	7170330	3558	Manantial difuso
AMA-4	24/03/96	16 ^H 00	515802	7178004	3557	Napa del salar (ojo)
AMA-5	24/03/96	17 ^H 10	517175	7178447	3558	Manantial corriente
AMA-6	28/03/96	10 ^H 55	517977	7174341	3557	Laguna

NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
AMA-1	44500	16,6	4,5	1,024	7,90	1,35	19100	2,49	1,08	428	134	31,1	36,4	0,109	5640	303	14,7	5130	411
AMA-2	26500	18,7	4,0	1,013	7,68	0,624	10100	1,34	1,11	305	84,3	13,0	46,5	0,063	2850	153	7,43	2920	227
AMA-3	12740	15,5	2,9	1,006	7,09	0,537	4580	0,736	0,50	192	43,5	5,56	30,8	0,053	1220	66,5	3,12	1380	103
AMA-4	186000	13,4	0,6	1,140	6,84	10,6	121000	16,0	12,3	674	606	515	35,0	15,0	43200	2490	157	24100	3090
AMA-5	26600	16,5	4,5	1,014	7,12	1,79	9900	4,14	2,39	1280	33,6	70,7	31,9	14,3	3890	197	14,6	2380	306
AMA-6	104600	6,4	3,5	1,061	7,29	2,14	50400	5,46	3,50	1300	275	161	38,9	1,34	19800	946	53,5	10300	970

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
AMA-1	31312	45,6	5,04	0,84	544,7	550,4	1,1	AMA-5	-6	-57
AMA-2	16737	29,2	1,32	0,84	293,5	292,4	0,4	Análisis de oxígeno-18 y deuterio		
AMA-3	7656	31,8	0,18	3,8	132,3	134,2	1,5			
AMA-4	196672	-	-	-	3424	3445	0,6			
AMA-5	18234	100	0,96	11	320,1	308,0	3,9			
AMA-6	84335	75,0	3,00	7,5	1484	1454	2,0			

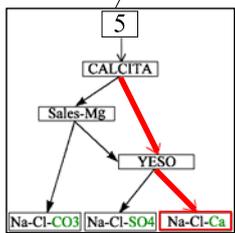
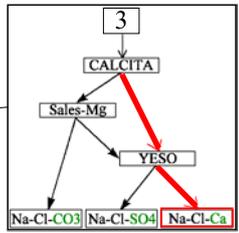
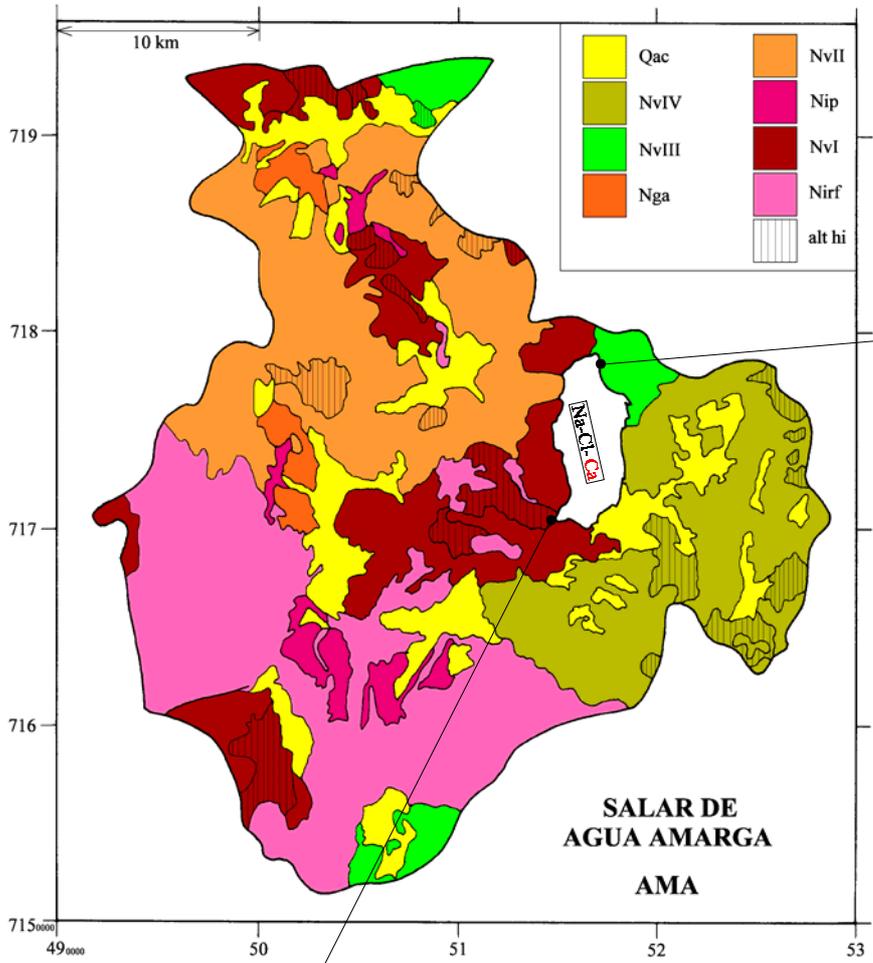
Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.
S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l)
DIF.% = diferencia en %



MAPA GEOLOGICO Y VIAS EVOLUTIVAS

AMA

- Qac** : *Cuaternario*. Depósitos aluviales y coluviales: bloques, gravas y arenas con cenizas, arcillas y sales.
- NvIV** : *Mioceno sup. - Plioceno inf.* Conjunto volcánico IV: estrato-volcanes y conos de escoria debilmente erosionados. Andesitas de dos piroxenos y dacitas de piroxeno y biotita. Ocasionalmente andesitas basálticas de olivino y piroxeno.
- NvIII** : *Mioceno medio - Mioceno sup.* Conjunto volcánico III: estrato-volcanes mediana a debilmente erosionados. Andesitas de dos piroxenos, andesitas basálticas de olivino y piroxeno. Escasas dacitas de hornblenda y biotita.
- Nga** : *Mioceno medio*. Gravas de Atacama. Depósitos de gravas y bolones con matriz de arena, localmente consolidados en cemento de carbonatos y sulfatos.
- NvII** : *Mioceno inf. - Mioceno medio*. Conjunto volcánico II: estrato-volcanes medianamente erosionados. Andesitas de piroxenos y daciandesitas de hornblenda.
- Nip** : *Mioceno medio*. Ignimbrita Pajonales. Tobas dacíticas de cenizas y cristales (plg, anf, bi, px).
- NvI** : *Oligoceno - Mioceno inf.* Conjunto volcánico I: estrato-volcanes rofundamente erosionados. Andesitas de ortopiroxeno y clinopiroxeno con daciandesitas de hornblenda y/o biotita y piroxeno. Ocasionalmente andesitas basálticas de ortopiroxeno y olivino.
- Nirf** : *Mioceno inf.* Ignimbrita Río Frío. Tobas dacíticas ricas en cristales (plg, anf, px, bi).
- alt hi** : alteración hidrotermal.



SALAR DE AGUILAR

Introducción

El salar de Aguilar se encuentra en el norte de la Cordillera Andina de la Tercera Región, en un sector de difícil acceso. Se llega al salar bajando una gran quebrada al sur. Es una costra rugosa de halita (NaCl) de color marrón parecida a la costra del salar de Atacama. Sus principales características morfométricas y climatológicas son:

- altura: 3320 m
- superficie de la cuenca: 589 km²
- superficie del salar: 71 km²
- superficie de las lagunas: ~ 200 m²
- precipitaciones: 100 mm/año
- evaporación potencial: 1100 mm/año
- temperatura media: 2°C

No hemos encontrado ningún aporte, ni al sur, ni al oeste de la cuenca. Solamente existen pequeñas pozas y "ojos" al sur del salar, a unos 500 m de la orilla, todas con salmueras concentradas. Hemos extraído dos muestras en un mismo "ojo": una superficial (AGI-1) y la otra a 30 cm de profundidad (AGI-1a), y también una tercera muestra en una poza superficial (AGI-2). Evidentemente, con tan pocas muestras y sobre todo sin aportes, no se puede sacar muchas conclusiones.

Composición química y vía evolutiva

Las composiciones de las salmueras del salar de Aguilar están presentadas en la figura 1 y en la tabla 1. Las salmueras son todas muy concentradas en calcio. AGI-2 es la solución de más alto contenido en Ca que hemos encontrado en todos los salares estudiados (49,7 g/l). Todas pertenecen al mega-grupo de salmueras cálcicas con mucho más Ca que SO₄. Otra característica de las salmueras es su alto contenido en nitrato (291-738 mg/l).

En el "ojo" se puede notar una estratificación de las salmueras con la más concentrada al fondo y la más diluida en superficie. La diferencia de salinidad entre las dos salmueras es de 8%.

<u>SALMUERAS</u>	<u>SALINIDAD</u> mg/l	<u>TIPO QUÍMICO</u>		<u>VÍA EVOLUTIVA</u>
		Cationes	Aniones	
AGI-1	173017	Na-Ca-(Mg)	/ Cl	Ca
AGI-1A	187039	Na-Ca-(Mg)	/ Cl	Ca
AGI-2	334882	Na-Ca-(Mg)	/ Cl	Ca

Tabla 1 : Salinidades, tipos químicos y vías evolutivas de aguas del salar de Aguilar.
Ca = vía cálcica.

La vía evolutiva cálcica al que pertenecen las tres salmueras caracteriza terrenos sedimentarios. Pero la cuenca de drenaje es enteramente volcánica, y con azufreras. La composición cálcica de las salmueras no refleja la litología de la cuenca. El salar está ahora casi inactivo, siendo más parecido a los salares fósiles del Valle Central. Lo más probable es que, cuando era activo, recibía aportes salinizados por salmueras residuales de tipo Na-Ca / Cl de un antiguo salar recubierto por formaciones volcánicas más recientes. Es un mecanismo observado a menudo en salares del norte chileno (por ejemplo en Ascotán, Agua Amarga, Wheelwright).

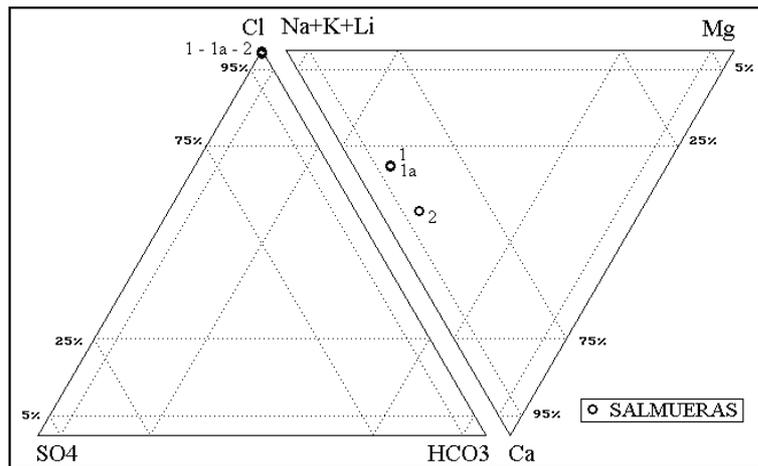


Fig.1: Composición de las salmueras del salar de Aguilar

Balance hídrico

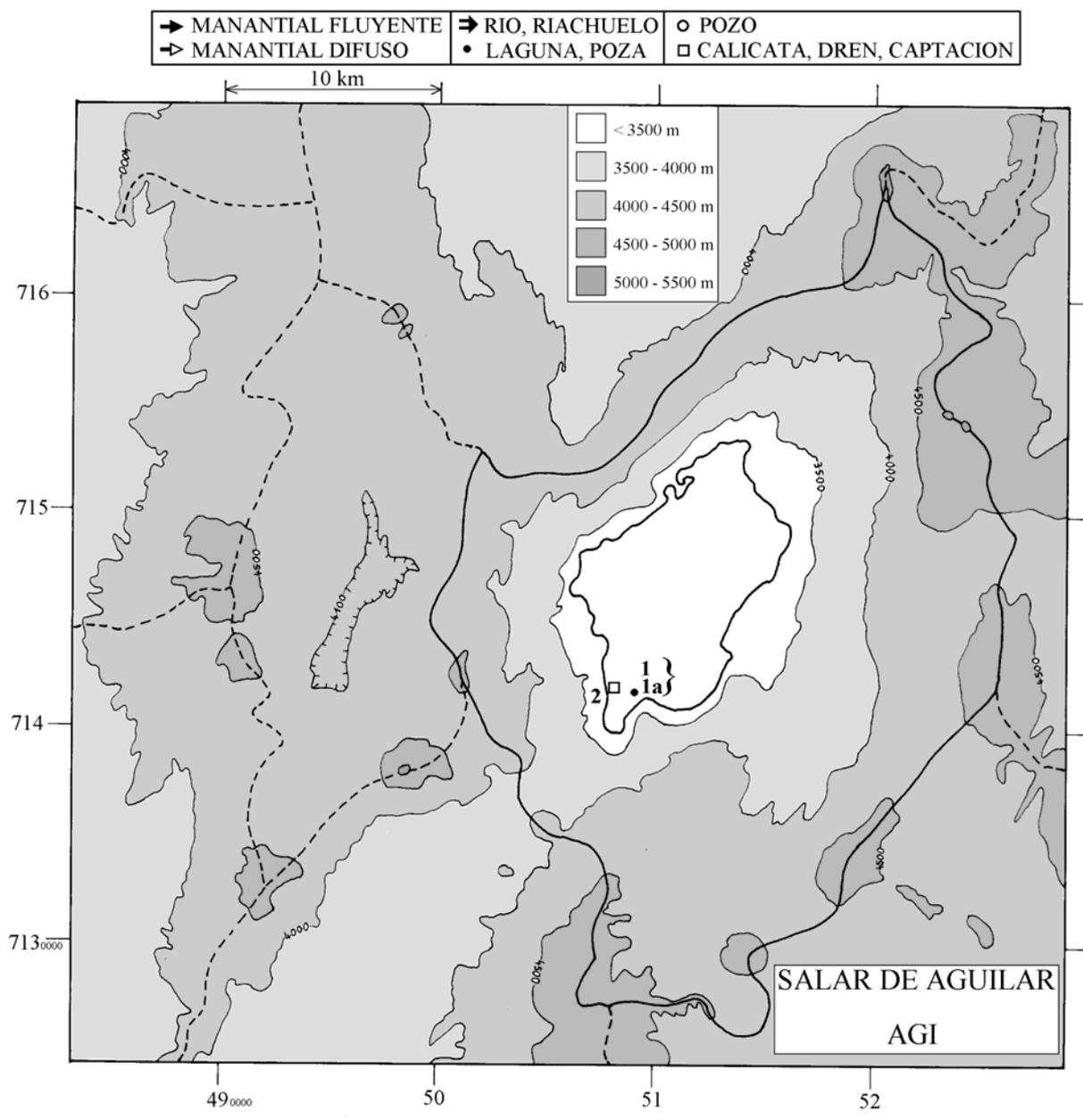
La superficie total de las pozas es del orden de unos 200 m². Eso corresponde a un volumen de aporte del orden de:

$$V_{ap} = S(H_e - H_p) = 160 \text{ m}^3/\text{año} = 5 \text{ ml/s}$$

con $H_e = 0,9 \text{ m/año}$ (1,1-0,2 para tomar en cuenta la salinidad de las salmueras) y $H_p = 0,1 \text{ m/año}$. Por supuesto este calculo da solamente un grueso orden de magnitud, pero ilustra bien la casi ausencia de aportes al salar de Aguilar.

Conclusión

En conclusión, la cuenca del salar de Aguilar no presenta interés para recursos de agua. Sin embargo, si consideramos corecta la altura de precipitación de 0,1 m/año, caería sobre la cuenca una cantidad de unos 1600 l/s, cuyo destino se desconoce.



**SALAR DE AGUILAR
AGI**

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
AGI-1	05/12/96	12 ^H 15	508818	7141809	3320	Napa (ojo salmuera superficial 0-5cm)
AGI-1a	05/12/96	12 ^H 15	508818	7141809	3320	Napa (ojo salmuera profunda 20-25cm)
AGI-2	05/12/96	13 ^H 10	507669	7142069	3320	Napa superficial al borde del salar

NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
AGI-1	184100	13	3,0	1,124	7,00	12,3	105000	18,4	7,51	833	291	662	33,9	2,46	40000	3800	257	18200	3110
AGI-1A	191000	25	1,0	1,136	6,90	13,2	114000	18,8	8,69	881	319	719	36,1	2,61	43200	3990	276	19800	3350
AGI-2	219000	18,2	0,2	1,229	5,75	11,2	209000	12,3	8,10	119	738	720	4,42	0,01	64600	2910	337	49700	6270

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.

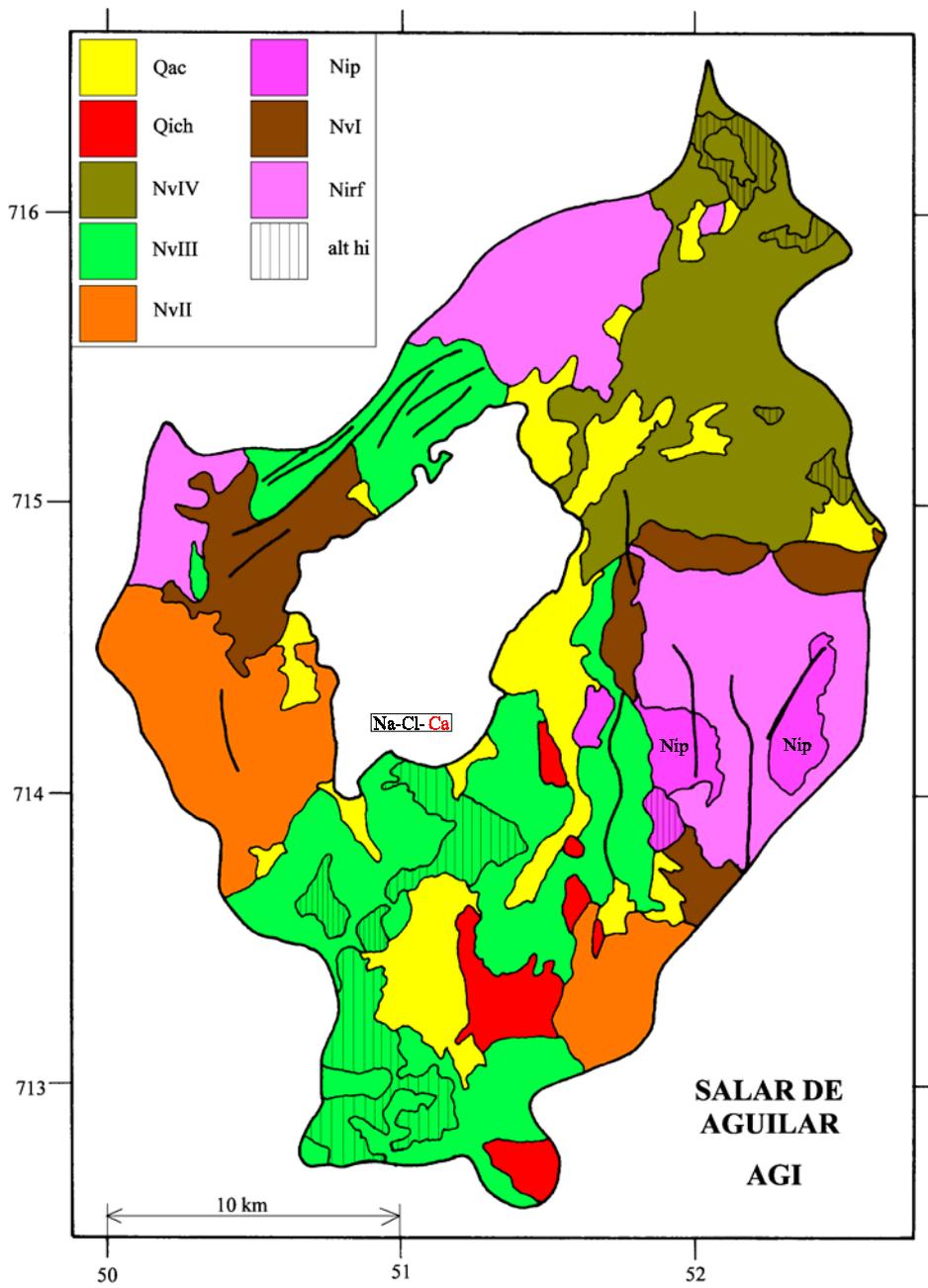
NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF. %
AGI-1	173017	-	-	-	3036	2994	1,4
AGI-1A	187039	-	-	-	3286	3237	1,5
AGI-2	334882	-	-	-	5929	5906	0,4

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

AGI

- Qac** : *Cuaternario*. Depósitos aluviales y coluviales: bloques, gravas y arenas con cenizas, arcillas y sales.
- Qich** : *Pleistoceno inf.* Ignimbrita Chato Aislado. Pómez rica en cristales (plg, bi, anf, qz)
- NvIV** : *Mioceno sup. - Plioceno inf.* Conjunto volcánico IV: estrato-volcanes y conos de escoria debilmente erosionados. Andesitas de dos piroxenos y dacitas de piroxeno y biotita. Ocasionalmente andesitas basálticas de olivino y piroxeno.
- NvIII** : *Mioceno medio - Mioceno sup.* Conjunto volcánico III: estrato-volcanes mediana a debilmente erosionados. Andesitas de dos piroxenos, andesitas basálticas de olivino y piroxeno. Escasas dacitas de hornblenda y biotita.
- NvII** : *Mioceno inf. - Mioceno medio.* Conjunto volcánico II: estrato-volcanes medianamente erosionados. Andesitas de piroxenos y daciandesitas de hornblenda.
- Nip** : *Mioceno medio.* Ignimbrita Pajonales. Tobas dacíticas de cenizas y cristales (plg, anf, bi, px).
- NvI** : *Oligoceno - Mioceno inf.* Conjunto volcánico I: estrato-volcanes rofundamente erosionados. Andesitas de ortopiroxeno y clinopiroxeno con daciandesitas de hornblenda y/o biotita y piroxeno. Ocasionalmente andesitas basálticas de ortopiroxeno y olivino.
- Nirf** : *Mioceno inf.* Ignimbrita Río Frio. Tobas dacíticas ricas en cristales (plg, anf, px, bi).
- alt hi** : alteración hidrotermal.



SALAR DE LA ISLA

Introducción

El salar de la Isla se encuentra en la Tercera Región en un sector de difícil acceso adyacente a la frontera argentina. Sus principales características morfológicas y climatológicas son:

- altura: 3950 m
- superficie de la cuenca: 858 km²
- superficie del salar: 152 km²
- superficie de las lagunas: 2,4 km²
- precipitaciones: 130 mm/año
- evaporación potencial: 1000 mm/año
- temperatura media: 0°C

No se encontró ningún aporte en sectores altos de la cuenca de drenaje. Casi todos afloran en la orilla de la mitad norte del salar donde alimentan varias lagunas superficiales. Todas las vertientes muestran una influencia termal ya que sus temperaturas van de 13° a 26°C. En época seca no hay ninguna laguna en la zona central. La superficie del salar parece estar constituida sobre todo de yeso (CaSO₄.2H₂O), por lo menos cerca de las orillas.

Composición de las aguas y salmueras

La composición de las aguas del salar de la Isla están presentadas en la figura 1 y en la tabla 1.

<u>APORTES</u>	<u>SALINIDAD</u> mg/l	<u>TIPO QUÍMICO</u>		<u>VÍA EVOLUTIVA</u>
		Cationes	Aniones	
ISL-18	6229	Na- (Mg)	/ Cl- (SO4)	SO4 (N)
ISL-4	6662	Na	/ Cl- (SO4)	SO4 (A)
ISL-8	11269	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl- (SO4)	SO4 (N)
ISL-16	14572	Na- (Mg)	/ Cl- (SO4)	SO4 (N)
ISL-9	17087	Na- (Mg) - (Ca)	/ Cl- (SO4)	SO4 (N)
ISL-1	17521	Na- (Mg)	/ Cl- (SO4)	SO4 (N)
ISL-13	31046	Na- (Mg)	/ Cl- (SO4)	SO4 (N)
<u>LAGUNAS</u>				
ISL-6	26729	Na- (Mg)	/ Cl- (SO4)	SO4
ISL-10	42164	Na- (Mg) - (Ca)	/ Cl- (SO4)	SO4
ISL-7	53369	Na- (Mg)	/ Cl- (SO4)	SO4
ISL-15	76030	Na- (Mg)	/ Cl- (SO4)	SO4
ISL-3	86916	Na- (Mg)	/ Cl	SO4
ISL-5	94773	Na- (Mg)	/ Cl	SO4
ISL-11	134013	Na- (Mg)	/ Cl- (SO4)	SO4
ISL-19	157959	Na- (Mg)	/ Cl- (SO4)	SO4

ISL-14	181647	Na- (Mg)	/ Cl- (SO ₄)	SO ₄
ISL-12	312003	Na- (Mg)	/ Cl	SO ₄
ISL-17	313963	Na- (Mg)	/ Cl- (SO ₄)	SO ₄
ISL-2	329693	Na- (Mg)	/ Cl- (SO ₄)	SO ₄

Tabla 1 : Salinidades, tipos químicos y vías evolutivas de las aguas del salar de la Isla.
SO₄ (N) = vía neutra sulfatada; SO₄ (A) = vía alcalina sulfatada.

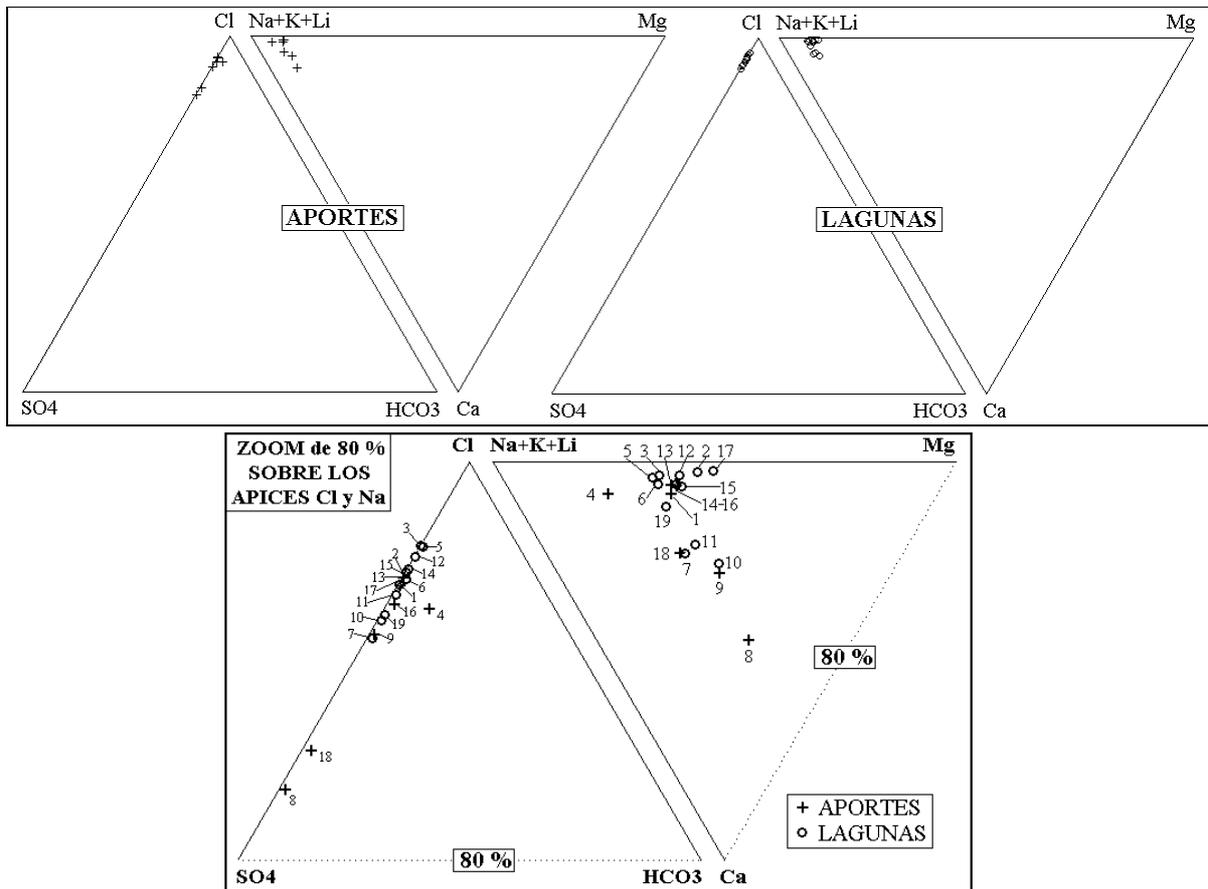


Fig.1: Composición de las aguas y salmueras del salar de la Isla.

Todas las aguas que hemos encontrado en el salar de la Isla son saladas. El agua de aporte más diluida tiene una salinidad de 6,2 g/l y la más concentrada de 31 g/l. Tratándose esta última de una vertiente fluyente, es un record en el norte de Chile. La composición química de casi todas las aguas, aportes y lagunas, es homogénea: Na-(Mg) / Cl - (SO₄), con leves variaciones en las proporciones de Mg y SO₄. Aportes y lagunas tienen concentraciones porcentuales similares. Sin embargo, se puede distinguir dos tipos de aguas según su contenido en calcio (Fig.2). Las aguas del extremo norte del salar (vertientes ISL-9, 8 y 18 y las lagunas dependientes) tienen algo más de calcio que las otras aguas del salar. Esta pequeña diferencia se nota también en la aproximación (zoom) de la figura 1. Por otra parte, se observa que ISL-4 tiene un poco más de HCO₃, lo que se refleja en su vía evolutiva alcalina sulfatada (Tabla 1). Todas las salmueras del salar de la Isla contienen más sulfato que calcio por lo que se puede clasificar este salar dentro de los de tipo sulfatado.

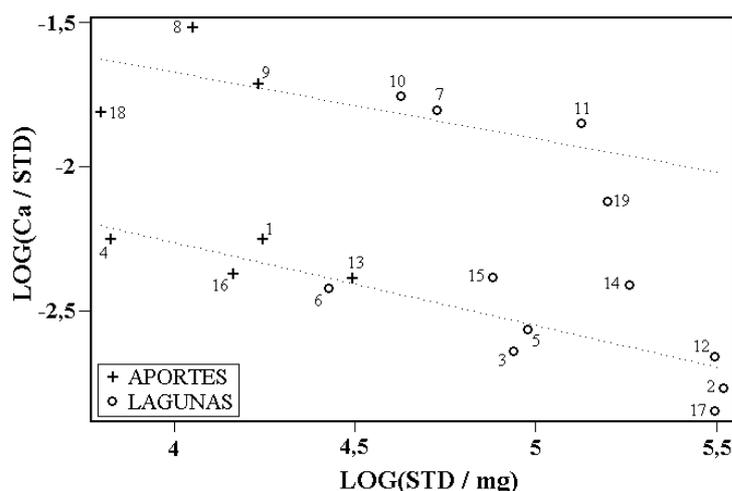


Fig.2 : Relación entre Ca y salinidad en aguas del salar de la Isla.

Origen de los componentes disueltos

La mejor relación de equimolaridad entre componentes mayores que se ha encontrado es entre Na+Mg y Cl (Fig. 3), y se aplica para todas las aguas. No se observa diferencias entre las aguas de aporte y de lagunas, como ocurre casi siempre en los demás salares.

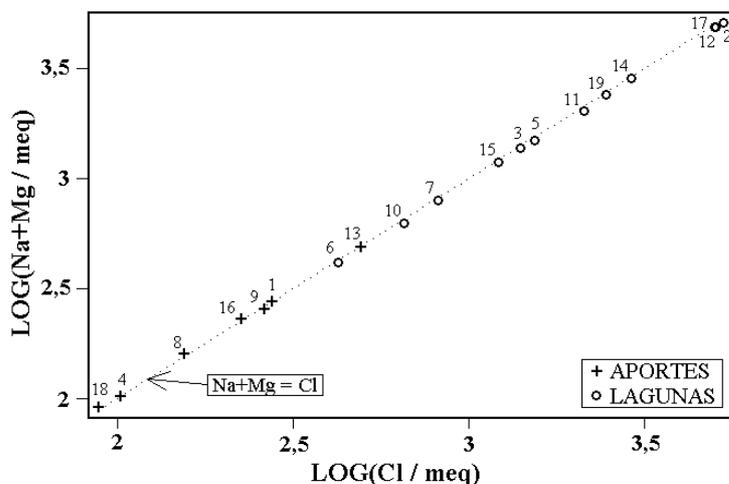


Fig. 3 : Relación entre Na+Mg y Cl en aguas del salar de la Isla.

La similitud de composición química entre aportes y lagunas, así que la alta salinidad de los aportes, hace pensar que las aguas que calificamos de aporte podrían ser cuñas salinas del propio salar. Sin embargo, hay cinco vertientes fluyentes (ISL-1, 9, 13, 16, 18) que podrían más bien provenir de salmueras residuales de un antiguo salar recubierto por formaciones volcánicas de la cuenca de drenaje. Con los solos datos químicos, no se puede zanjar definitivamente entre las dos hipótesis.

Puesto que todos los aportes que hemos encontrado son aguas termales, interesa ver si aparece alguna relación entre temperatura y concentración (Fig. 4). Primero, la salinidad de los aportes

presenta una relación inversa con la temperatura. Aunque el coeficiente de correlación no es muy bueno, se observa una tendencia nítida a la disminución de la salinidad de los aportes con el aumento de la temperatura.

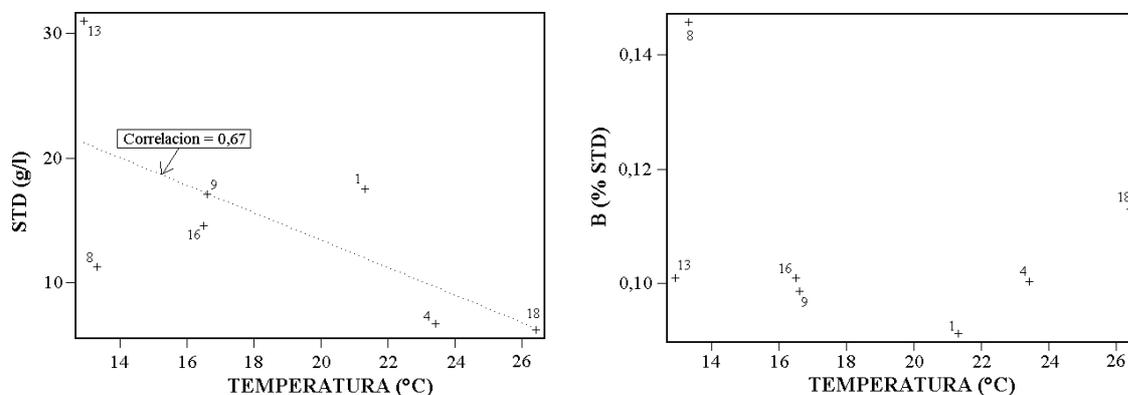


Fig. 4 : Relaciones entre temperatura de los aportes y salinidad y concentración porcentual del boro.

El origen del boro es frecuentemente relacionado con el termalismo. En el caso del salar de la Isla, no se observa ninguna relación entre la concentración porcentual del boro (relativa a la salinidad) y la temperatura.

Vías evolutivas y relación con la geología

Las aguas del salar de la Isla siguen todas las vías sulfatadas. Una sola agua de aporte (4) sigue la vía alcalina sulfatada; todas las demás siguen la vía neutra sulfatada que se encuentra generalmente en terrenos volcánicos con azufre o volcano-sedimentarios. La cuenca de drenaje del salar de la Isla es exclusivamente volcánica con importantes yacimientos de azufre al nor-este. Si esta litología refleja bien la vía evolutiva sulfatada, no explica, sin embargo, la alta salinidad de los aportes. Esta se debe probablemente a la salinización de aguas diluidas por salmueras residuales de tipo Na-(Mg) / Cl de un antiguo salar recubierto por formaciones volcánicas más recientes. La hidroquímica del salar de la Isla releja parcialmente la geología de la cuenca.

Evolución cuantitativa de aguas

Veamos ahora la evolución cuantitativa de las aguas de aporte cuando se evaporan. La tabla 2 presenta la composición calculada de las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta la salinidad del agua de la laguna considerada. Se presenta solamente las composiciones calculadas que más se acercan a la de la laguna. Varias veces se presenta el resultado de la simulación de la evaporación de una mezcla de dos aguas de aporte con los respectivos porcentajes. 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 (ISL-xE) y las aguas de laguna. En algunos casos se ha debido calcular la composición de las lagunas al equilibrio con ciertos minerales que presentan una fuerte sobre-saturación (sobre todo calcita). Tales composiciones corregidas están designadas como ISL-x.EQ.

El primer punto que resalta es la buena o excelente correlación entre los aportes evaporados (individuales o mezclados) y las lagunas correspondientes. El coeficiente de desviación de la primera solución evaporada esta dentro de un rango de 0,004 hasta 0,058. Es algo muy excepcional sobre lo cual se puede adelantar dos explicaciones. Primero, las aguas de aporte tienen composiciones muy similares. Los grandes desviaciones ocurren cuando se mezclan aguas de composiciones muy distintas. Por otra parte, los aportes son ya concentrados y la precipitación de minerales poco solubles como la calcita y los silicatos de magnesio no afecta tanto la composición de la solución que se evapora como en el caso de una agua diluida.

Sin embargo, a pesar de las buenas correlaciones, aparecen varias anomalías. Examinemos el caso del agua de laguna ISL-3 a la orilla oeste del salar. Los dos aportes evaporados que mejor se acercan *individualmente* son 13E y 16E, que se encuentran al otro lado del salar, en su orilla este. Es poco probable que tengan influencia sobre una laguna independiente ubicada a unos 10 km. Hemos entonces buscado explicar si una mezcla de aguas de aporte cercanas a la laguna no podría producir al evaporarse una salmuera que se acercaría todavía más a la composición de la laguna. Efectivamente, mezclas evaporadas de la vertiente 1, que alimenta la laguna 3, y de la vertiente 4, que se encuentra un poco más al norte, son las que más se parecen a la laguna. Esta misma observación puede hacerse para otras lagunas (ver tabla 2).

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
<u>ISL-3</u>	7,33	0,955	50100	2940	70,8	23,4	29200	2830	247	201	1240	
40% (1)+60% (4)	8,28	2,77	48900	4090	82,6	19,6	28800	2880	239	301	1070	0,036
ISL-13E	7,90	1,31	49200	4010	87,3	22,4	28600	2600	244	356	1280	0,047
ISL-16E	8,24	2,80	48400	4740	87,5	22,8	28500	2650	240	316	1330	0,049
ISL-4E	8,40	3,73	48700	3790	88,8	23,1	29300	3330	234	153	652	0,062
ISL-1E	8,15	2,17	48900	4250	79,0	22,6	28500	2630	242	482	1250	0,084
<u>ISL-2.EQ</u>	6,59	2,80	188000	14700	322	4,43	108000	10800	1080	508	5850	
70% (1)+30% (4)	7,62	3,83	188000	13900	309	4,70	110000	10500	928	575	4540	0,013
ISL-1E	7,58	3,67	180000	13100	290	6,01	105000	9650	889	671	4580	0,032
ISL-13E	7,61	4,00	173000	12900	307	6,54	101000	9140	855	742	4480	0,049
ISL-16E	7,63	3,98	166000	15300	301	6,95	98000	9130	826	677	4490	0,050
ISL-8E	7,61	6,21	168000	20700	497	6,67	101000	10300	861	508	4590	0,061
ISL-18E	7,64	4,85	167000	23800	377	6,70	104000	9180	876	458	3860	0,070
ISL-9E	7,59	4,10	176000	9760	316	6,39	100000	9610	857	930	4650	0,079
ISL-4E	7,79	4,66	168000	13100	306	7,09	101000	11500	808	527	2150	0,122
<u>ISL-6</u>	8,26	0,983	15100	1230	29,0	18,1	8900	856	75,6	102	365	
40% (1)+60% (4)	8,46	2,35	14900	1250	25,3	25,9	8820	880	73,2	122	328	0,019
ISL-16E	8,32	1,76	14800	1450	26,8	29,9	8730	813	73,6	113	407	0,030
ISL-1E	7,93	0,690	15000	1300	24,3	29,6	8760	807	74,3	148	383	0,041
ISL-4E	8,62	3,41	14900	1160	27,1	30,5	8960	1020	71,6	51	224	0,097
<u>ISL-5</u>	7,67	2,50	54700	3190	76,3	26,6	31700	3100	269	260	1270	
40% (1)+60% (4)	8,26	2,83	53300	4460	90,0	18,9	31400	3140	261	325	1170	0,032
ISL-13E	7,91	1,43	53600	4370	95,2	21,6	31200	2840	266	389	1400	0,037
ISL-16E	8,22	2,86	52800	5170	95,5	21,9	31100	2890	262	344	1440	0,042
ISL-1E	8,13	2,22	53300	4630	86,2	21,8	31100	2860	264	522	1360	0,066
ISL-4E	8,37	3,78	53200	4130	96,9	22,2	32000	3630	256	167	707	0,071
<u>ISL-10</u>	8,05	1,57	23400	2660	36,5	30,8	13300	1200	113	734	625	
ISL-9E	8,05	1,13	23000	2860	41,5	27,9	13200	1260	112	793	610	0,004
ISL-18E	8,11	1,38	21200	4740	47,8	28,2	13400	1170	111	611	492	0,050
ISL-8E	7,98	1,14	20900	5210	61,6	28,2	12500	1270	107	1170	570	0,093
<u>ISL-11.EQ</u>	7,86	1,76	75300	7120	131	15,5	43300	3790	347	1840	1840	
ISL-9E	7,83	1,86	74800	7610	135	18,0	42700	4090	365	1840	1980	0,004

ISL-8E	7,92	2,99	71000	11400	210	18,4	42600	4340	363	1310	1940	0,060
ISL-18E	7,95	2,51	69100	13500	156	18,6	43600	3800	362	1140	1600	0,070
<u>ISL-12.EQ</u>	6,79	2,63	180000	12100	276	5,03	103000	9700	937	690	5000	
70% (1) +30% (4)	7,67	3,86	178000	13500	292	5,35	104000	9900	876	679	4290	0,006
ISL-1E	7,58	3,67	178000	13100	288	6,11	104000	9580	883	684	4540	0,007
ISL-13E	7,61	4,00	173000	12900	307	6,54	101000	9140	855	742	4480	0,013
ISL-16E	7,63	3,98	166000	15300	301	6,95	98000	9130	826	677	4490	0,022
ISL-9E	7,59	4,10	176000	9760	316	6,39	100000	9610	857	930	4650	0,024
ISL-8E	7,61	6,21	168000	20700	497	6,67	101000	10300	861	508	4590	0,081
ISL-18E	7,64	4,85	167000	23800	377	6,70	104000	9180	876	458	3860	0,086
ISL-4E	7,79	4,66	168000	13100	306	7,09	101000	11500	808	527	2150	0,092
<u>ISL-7.EQ</u>	8,08	1,45	29100	3710	65,5	23,0	17000	1750	135	819	656	
ISL-9E	8,00	1,18	29300	3640	52,8	26,5	16700	1610	143	1000	777	0,015
ISL-18E	8,07	1,45	27000	6040	60,8	26,8	17100	1480	142	771	626	0,030
ISL-8E	7,97	1,33	27000	6080	79,8	26,8	16200	1650	138	1240	739	0,049
<u>ISL-19.EQ</u>	7,94	2,88	87400	9600	195	13,8	51900	4650	438	1150	2050	
50% (8) +50% (18)	7,94	3,27	83700	13500	226	14,1	51000	4920	432	1200	2160	0,015
ISL-8E	7,89	3,56	84400	12700	249	16,3	50600	5150	431	1230	2310	0,020
ISL-1E	7,96	2,68	89200	7750	144	15,8	52100	4790	442	854	2280	0,025
ISL-18E	7,94	2,97	82100	15400	185	16,5	51800	4510	430	1070	1900	0,026
<u>ISL-15</u>	7,54	0,737	43300	3420	77,3	18,7	25100	2330	221	316	1190	
ISL-13E	7,89	1,15	43000	3510	76,4	23,6	25100	2280	213	312	1120	0,006
ISL-16E	8,28	2,72	42300	4150	76,5	24,0	24900	2320	210	278	1160	0,013
ISL-1E	8,15	1,97	42800	3720	69,1	23,8	25000	2300	212	423	1090	0,018
<u>ISL-14</u>	7,25	2,30	104000	7830	183	30,5	60300	5470	521	710	2770	
ISL-13E	7,85	2,74	103000	8390	183	13,8	59900	5440	509	745	2680	0,058
ISL-16E	7,97	3,46	101000	9930	183	14,0	59600	5550	502	660	2740	0,062
ISL-1E	7,91	2,85	102000	8890	165	13,9	59700	5490	506	974	2610	0,069
<u>ISL-17.EQ</u>	6,61	3,17	178000	15100	393	4,97	101000	10600	1070	454	6020	
ISL-8E	7,61	6,21	168000	20700	497	6,67	101000	10300	861	508	4590	0,040
ISL-1E	7,58	3,67	179000	13100	290	6,03	105000	9640	888	672	4570	0,043
ISL-16E	7,63	3,98	166000	15300	301	6,95	98000	9130	826	677	4490	0,054
ISL-18E	7,64	4,85	167000	23800	377	6,70	104000	9180	876	458	3860	0,057
ISL-13E	7,61	4,00	173000	12900	307	6,54	101000	9140	855	742	4480	0,057

Tabla 2 : Comparación de las aguas de aporte evaporadas (ISL-xE) con las salmueras del salar de la Isla. ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

Se puede deducir de estas observaciones que las lagunas del salar de la Isla no están alimentadas exclusivamente por su vertiente principal, sino que ocurren mezclas con aportes vecinos. En terreno, no se observa este proceso; cada laguna parece bien independiente. Es posible que las mezclas se produzcan en época de lluvia cuando las lagunas se extienden. Este estudio preliminar puede parecer a primera vista de poca relevancia, sin embargo, muestra un proceso que puede ser más general en otros salares y que no se detecta tan bien como en el salar de la Isla.

Calidad de agua

Todas las aguas son de pésima calidad tanto para el consumo humano como para el riego. Además las posibilidades de encontrar grandes cantidades de agua de buena calidad en napas más arriba en la cuenca no son alentadoras. Si los aportes han sido contaminados por salmueras residuales, las napas cuenca arriba pueden haberlo sido también.

Balance hídrico

Se puede estimar el balance hídrico de las principales lagunas a la orilla norte del salar. El caudal de infiltración está en un orden de magnitud, en cambio el caudal de aporte es más preciso,

puesto que depende esencialmente de los parámetros climáticos y de la superficie de las lagunas. Hemos comprobado que durante nuestra campaña, en marzo de 1996, las lagunas tenían la misma extensión que en el mapa topográfico, lo que sugiere una cierta estabilidad de las superficies. La tabla 3 presenta los parámetros del balance hídrico de cada laguna. Se utiliza el cloruro como elemento conservativo. Las concentraciones de los aportes están calculadas tomando en cuenta las mezclas indicadas en la tabla 2. Las formulas son:

$$\text{Volumen de aporte : } V_{ap} = S(H_e - H_p)/(1 - C_{ap}/C_L)$$

$$\text{Volumen de infiltraciones : } V_i = S(H_e - H_p)/(1 - C_L/C_{ap})$$

$$\text{Volumen de precipitaciones : } V_p = SH_p$$

$$\text{Volumen de evaporación : } V_e = SH_e$$

Los resultados se obtienen en m³/año. Para convertirlos en l/s, hay que dividirlos por 31536. Son los valores en l/s que estan presentados en la figura 5.

<u>LAGUNA</u>	<u>Precipitaciones</u>	<u>Evaporación</u>	<u>Superficie</u>	<u>Concentraciones (mg/l)</u>	
	H _p (m/año)	H _e (m/año)	S (km ²)	Aporte: C _{ap}	Laguna: C _L
ISL-1 / 3 / 2	0,13	0,9	0,6	7900	189000
ISL-4 / 6 / 5	0,13	1	0,2	6100	54700
ISL-9 / 10 / 11	0,13	1	0,3	9300	75600
ISL-18 / 19	0,13	1	0,3	4300	87700
ISL-13 / 15 / 14	0,13	1	0,6	17500	104000
ISL-16 / 17	0,13	0,9	0,2	5500	179000

Tabla 3: Parámetros del balance hídrico. La altura de evaporación de las lagunas (ISL-3, 2 y 17) ha sido reducida de 10% para tomar en cuenta la salinidad de las salmueras.

Los caudales entrantes en cada laguna no son muy elevados: de 5 a 20 l/s. El caudal total que entra en las seis lagunas estudiadas es de 64 l/s. Los aportes se distribuyen aproximadamente a lo largo de 35 km de orilla del salar. Se puede estimar el volumen de agua subterránea que entra así cada año. Asumiendo una porosidad de 50% para los acuíferos, lo que entra anualmente corresponde a una anillo (paralelo a la orilla) de 35 km de largo, de 5 metros de espesor y de 23 metros de profundidad (perpendicular a la orilla). Si fuera una cuña salina lixivándose, no demoraría más que unos pocos años en desaparecer. Eso confirma que la alta salinidad de los aportes se debe a salmueras residuales antiguas sin relación con el actual salar.

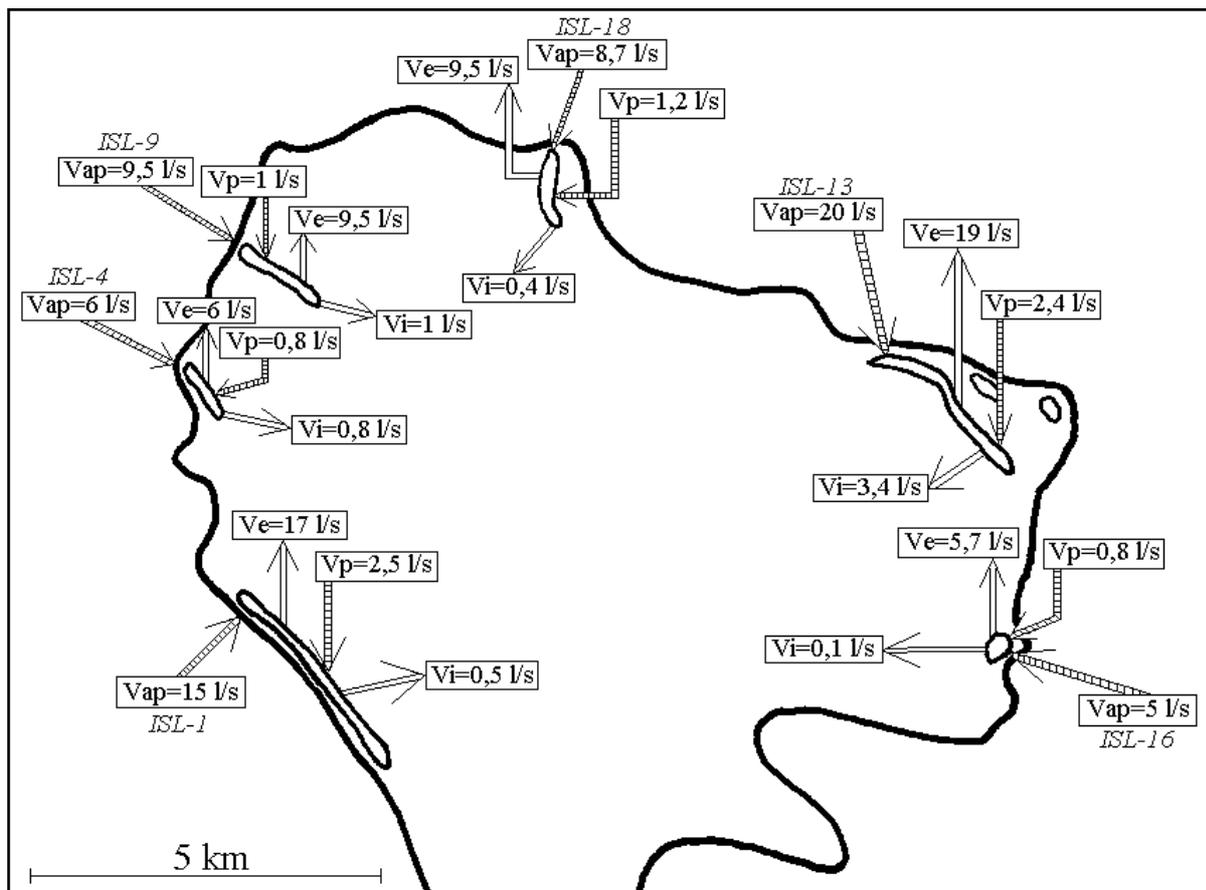
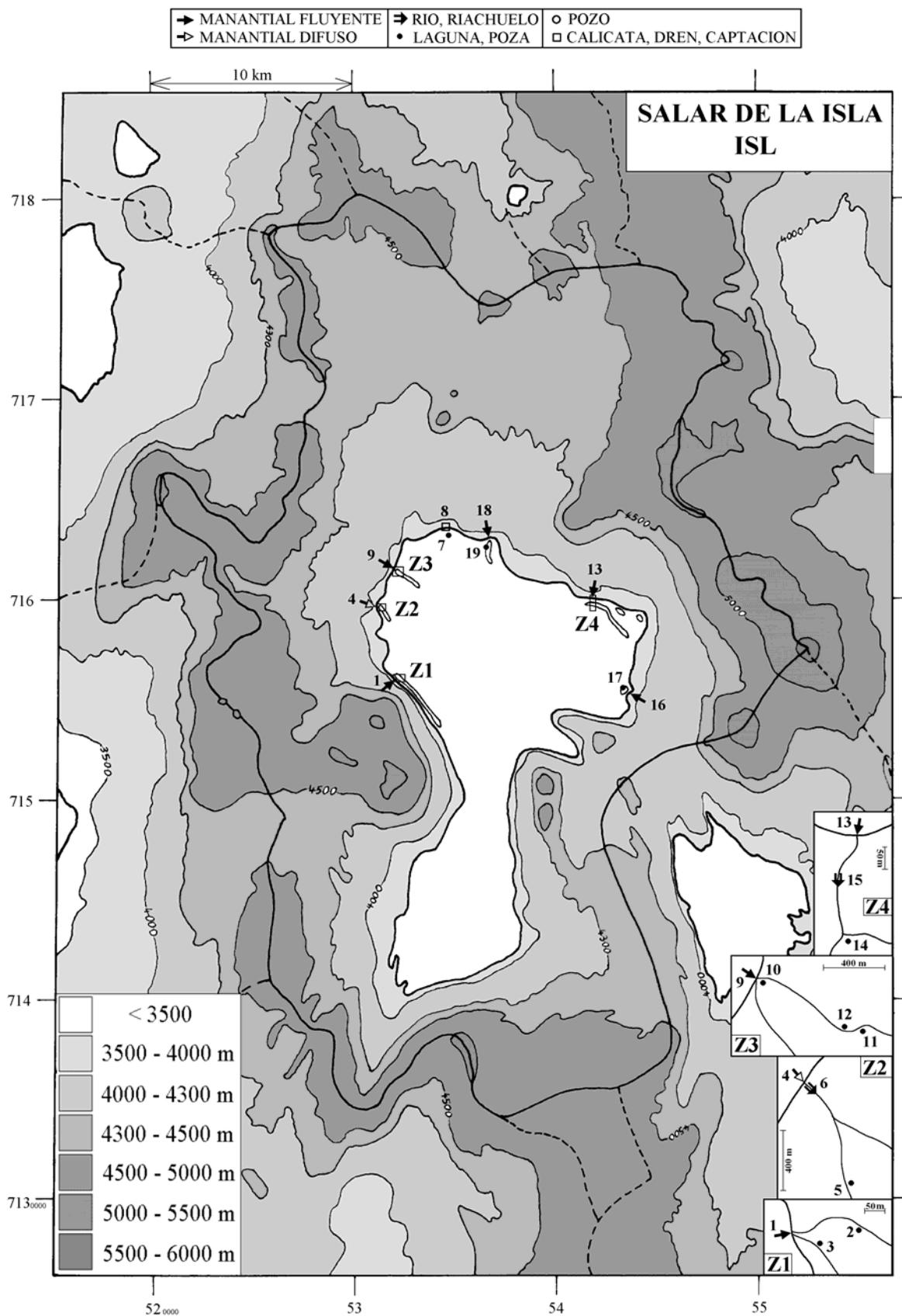


Fig.5 : Balances hídricos de las principales lagunas del salar de la Isla.

Conclusiones

El salar de la Isla no presenta buenas potencialidades para recursos de agua. El agua más diluida que se ha encontrado tiene 6,2 g/l de salinidad. Casi todas las aguas son del tipo Na-(Mg) / Cl-(SO₄) y de vía evolutiva neutra sulfatada. Se puede relacionar la vía sulfatada con la presencia de importantes yacimientos de azufre al norte de la cuenca. La alta salinidad de los aportes se debe a la redisolución de salmueras residuales de tipo Na-(Mg) / Cl de un antiguo salar recubierto por formaciones volcánicas más recientes. Las napas subterráneas, más arriba en la cuenca, podrían estar salinizadas, lo que no es muy alentador para la prospección de aguas de buena calidad en la cuenca del salar. Las lagunas que se encuentran casi todas pegadas a la orilla norte presentan una excelente correlación con las aportes evaporados por simulación computacional. Las correlaciones son tan precisas que permiten detectar las mezclas entre aportes. Se observa así que, aunque en terreno las lagunas parecen estar alimentadas por una sola vertiente, en realidad reciben también otros aportes más alejados sin conexión aparente.



**SALAR DE LA ISLA
ISL**

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
ISL-1	18/03/96	12 ^H 10	531666	7156148	3951	Manantial corriente
ISL-2	18/03/96	12 ^H 40	531930	7156140	3950	Laguna
ISL-3	18/03/96	12 ^H 55	531781	7156098	3950	Laguna
ISL-4	18/03/96	13 ^H 35	531165	7159612	3951	Manantial difuso
ISL-5	18/03/96	14 ^H 25	531612	7158840	3950	Laguna
ISL-6	18/03/96	15 ^H 02	531234	7159604	3950	Riachuelo que forma laguna
ISL-7	20/03/96	11 ^H 50	534239	7162906	3950	Riachuelo que forma laguna
ISL-8	20/03/96	12 ^H 20	534067	7163448	3950	Napa (calicata)
ISL-9	20/03/96	13 ^H 55	532139	7161492	3951	Manantial corriente
ISL-10	20/03/96	14 ^H 08	532189	7161477	3950	Laguna
ISL-11	20/03/96	14 ^H 35	532964	7161098	3950	Laguna
ISL-12	20/03/96	14 ^H 45	532836	7161115	3950	Napa del salar (ojo)
ISL-13	21/03/96	10 ^H 35	541554	7159964	3951	Manantial corriente
ISL-14	21/03/96	11 ^H 35	541506	7159574	3950	Laguna
ISL-15	21/03/96	11 ^H 46	541485	7159766	3950	Río en el salar
ISL-16	21/03/96	12 ^H 40	543669	7155428	3951	Manantial corriente
ISL-17	21/03/96	12 ^H 55	543598	7155443	3950	Laguna
ISL-18	21/03/96	14 ^H 30	536695	7163035	3952	Manantial corriente termal
ISL-19	21/03/96	15 ^H 15	536550	7162650	3950	Laguna

**SALAR DE LA ISLA
ISL**

NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
ISL-1	26900	21,3	4,4	1,013	7,61	0,455	9800	0,175	0,0231	860	16,9	16,0	24,4	0,108	5840	532	49,0	97,8	253
ISL-2	222000	29,5	na	1,215	6,67	3,35	189000	2,20	0,202	14800	148	322	22,2	1,39	107000	10800	1080	565	5860
ISL-3	108900	23,1	na	1,060	7,33	0,955	50100	0,641	0,0840	2940	38,3	70,8	23,4	0,300	29200	2830	247	201	1240
ISL-4	11230	23,4	na	1,005	7,31	2,23	3620	0,085	0,0330	285	0,020	6,68	15,3	0,049	2240	250	17,6	37,2	57,1
ISL-5	116800	27	2,8	1,065	7,67	2,50	54700	0,863	0,118	3190	17,2	76,3	26,6	0,801	31700	3100	269	260	1270
ISL-6	38500	21,4	5,1	1,019	8,26	0,983	15100	0,172	0,0292	1230	0,98	29,0	18,1	0,480	8900	856	75,6	102	365
ISL-7	69300	18,7	3,8	1,039	7,93	2,01	29000	0,903	0,136	3710	3,34	65,5	35,3	1,95	17000	1750	135	830	656
ISL-8	17000	13,3	4,8	1,009	7,65	0,632	5500	0,287	0,0702	1440	6,70	16,4	17,9	0,704	3380	340	28,5	340	152
ISL-9	25300	16,6	5,1	1,013	7,57	0,688	9300	0,347	0,106	1160	12,6	16,9	33,6	0,160	5380	512	45,7	327	248
ISL-10	57000	18	4,7	1,031	8,05	1,57	23400	0,839	0,135	2660	8,68	36,5	30,8	0,293	13300	1200	113	734	625
ISL-11	146600	12,2	3,0	1,092	7,92	3,80	75600	1,69	0,358	7110	12,9	131	43,1	0,936	43000	3780	347	1880	1840
ISL-12	222000	13,9	1,0	1,203	6,81	2,79	180000	1,75	0,165	12100	96,7	276	8,43	1,01	103000	9700	937	690	5010
ISL-13	44300	12,9	5,0	1,022	7,42	0,470	17500	0,201	0,0402	1440	18,8	31,3	25,7	0,100	10400	934	87,4	128	459
ISL-14	180800	12,5	2,3	1,122	7,25	2,30	104000	1,29	0,128	7830	62,0	183	30,5	0,771	60300	5470	521	710	2770
ISL-15	97100	11,7	4,9	1,053	7,54	0,737	43300	0,637	0,0617	3420	28,8	77,3	18,7	0,370	25100	2330	221	316	1190
ISL-16	22700	16,5	4,3	1,011	7,66	0,962	8020	0,201	0,0302	797	22,6	14,7	27,7	0,067	4850	446	40,3	62,2	223
ISL-17	220000	20,5	0,8	1,204	6,80	4,94	179000	3,00	0,168	15600	183	392	26,3	1,36	101000	10600	1070	453	6030
ISL-18	10140	26,4	4,3	1,005	7,79	0,478	3130	0,117	0,0305	699	9,67	7,04	22,8	0,360	1970	172	16,4	95,4	72,4
ISL-19	164300	10,8	2,7	1,109	7,67	5,51	87700	4,14	0,335	9600	5,90	195	38,4	6,00	51800	4650	438	1200	2050

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.

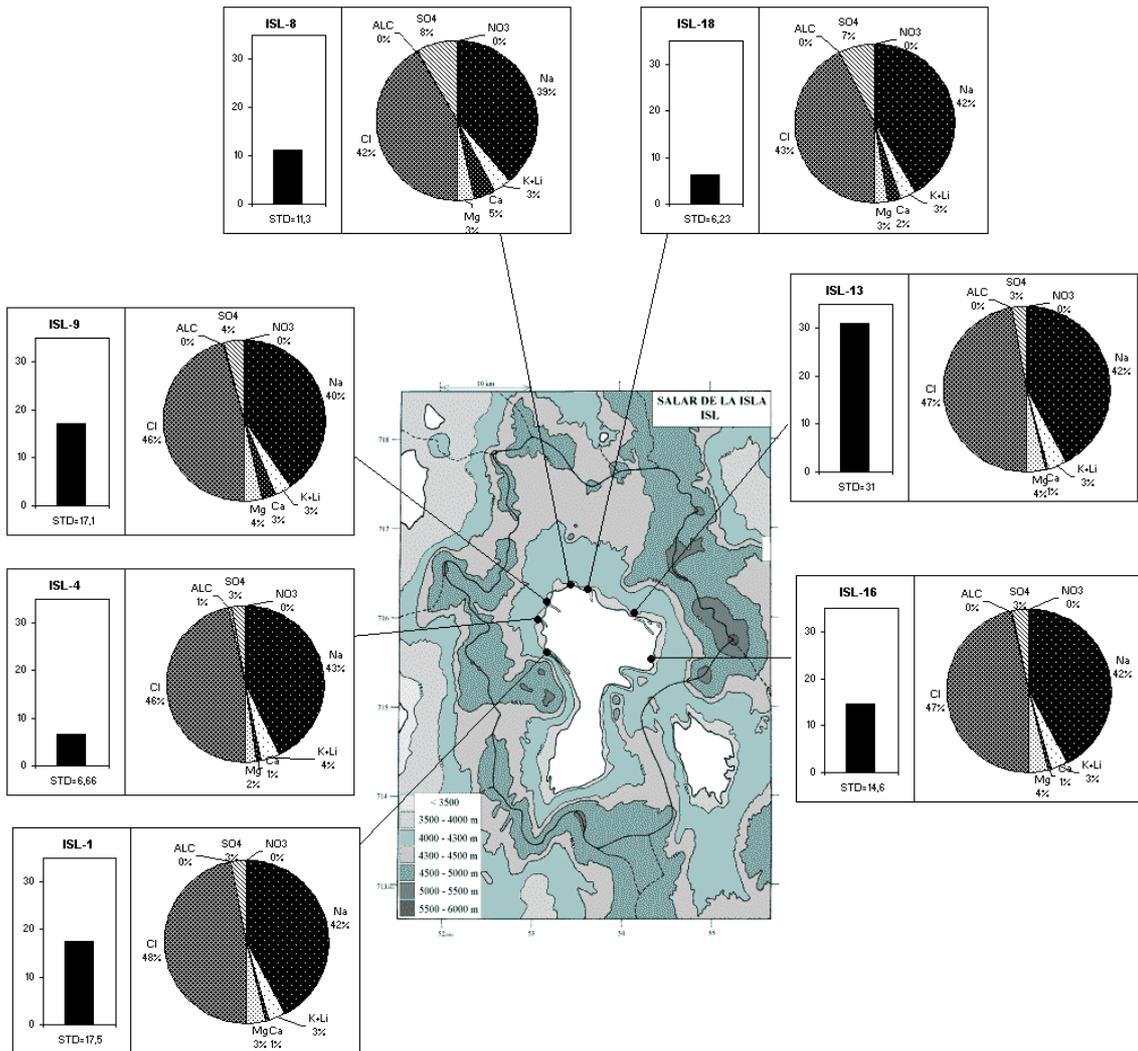
**SALAR DE LA ISLA
ISL**

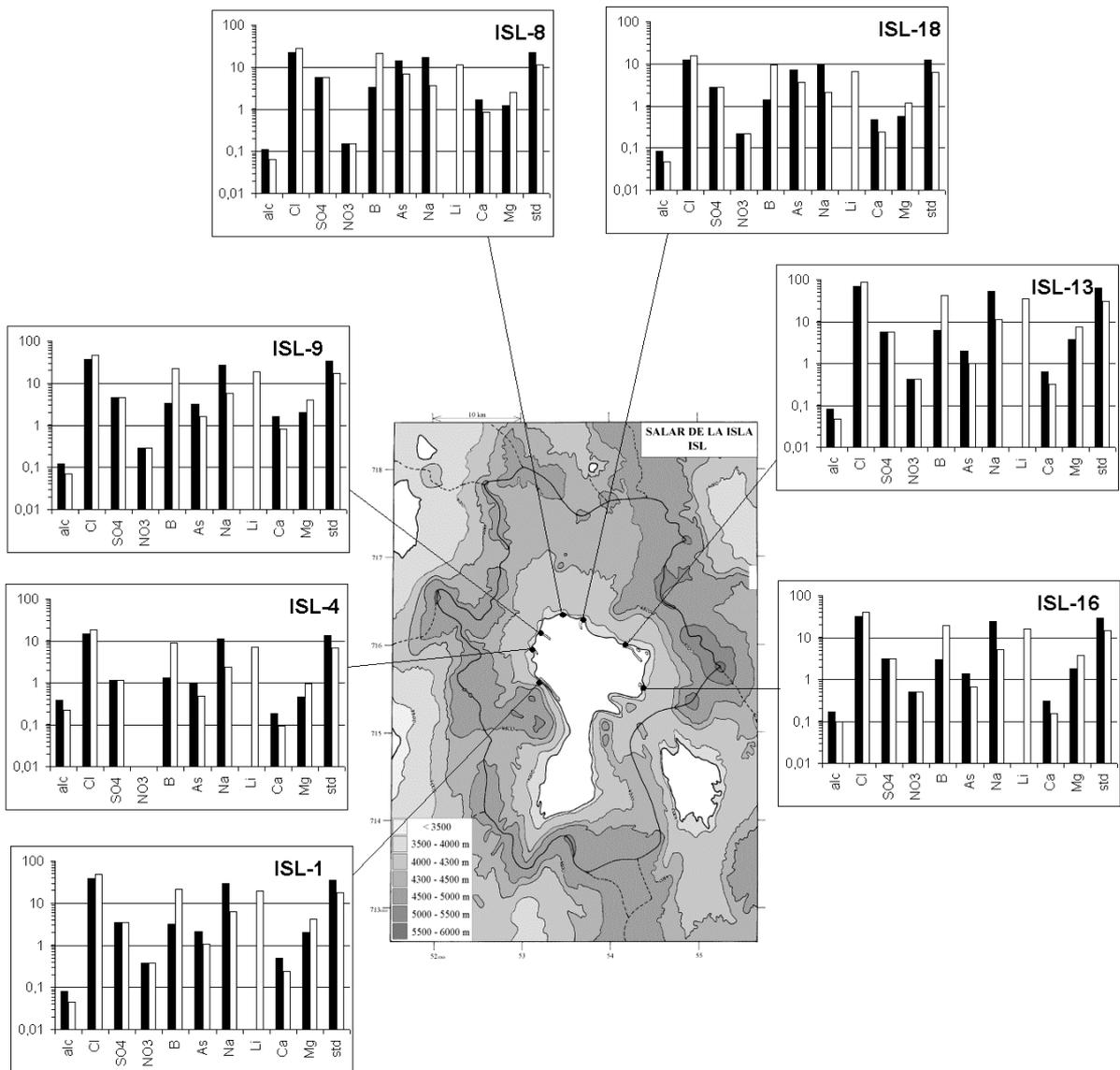
NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF. %
ISL-1	17521	23,4	0,24	0,62	300,3	294,6	1,9
ISL-2	329693	-	-	-	5612	5624	0,2
ISL-3	86916	40,9	0,60	1,7	1490	1473	1,2
ISL-4	6662	134	0,42	7,9	112,7	110,2	2,3
ISL-5	94773	104	3,84	1,9	1616	1609	0,4
ISL-6	26729	28,3	1,44	0,16	454,9	451,6	0,7
ISL-7	53369	73,8	3,12	0,88	899,6	897,3	0,3
ISL-8	11269	34,5	0,30	1,0	189,3	185,7	1,9
ISL-9	17087	37,6	0,36	1,2	290,4	287,1	1,1
ISL-10	42164	61,0	3,12	0,57	713,1	715,1	0,3
ISL-11	134013	94,6	8,28	1,3	2262	2282	0,9
ISL-12	312003	-	-	-	5309	5326	0,3
ISL-13	31046	23,8	0,18	1,1	530,7	524,8	1,1
ISL-14	181647	87,8	2,10	5,3	3099	3087	0,4
ISL-15	76030	23,6	0,42	0,75	1295	1292	0,2
ISL-16	14572	54,2	0,48	1,5	249,7	243,9	2,3
ISL-17	313963	-	-	-	5323	5364	0,8
ISL-18	6229	25,8	0,30	0,48	103,0	103,5	0,5
ISL-19	157959	207	9,96	4,8	2661	2676	0,6

NUMERO	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
ISL- 1	-6,37	-59
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 %





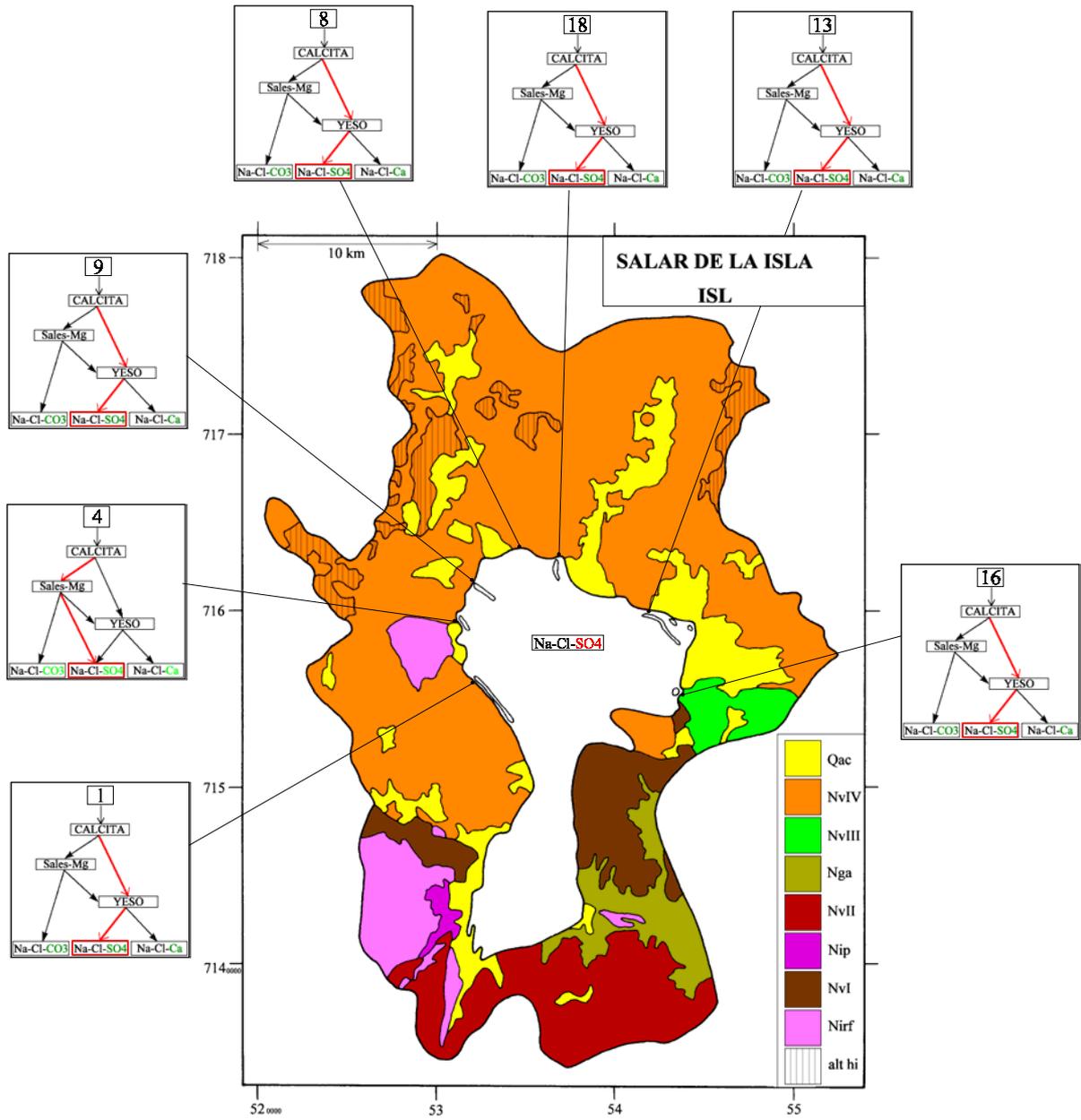
MAPA GEOLOGICO

Y

VIAS EVOLUTIVAS

ISL

- Qac** : *Cuaternario*. Depósitos aluviales y coluviales: bloques, gravas y arenas con cenizas, arcillas y sales.
- NvIV** : *Mioceno sup.* - *Plioceno inf.* Conjunto volcánico IV: estrato-volcanes y conos de escoria debilmente erosionados. Andesitas de dos piroxenos y dacitas de piroxeno y biotita. Ocasionalmente andesitas basálticas de olivino y piroxeno.
- NvIII** : *Mioceno medio* - *Mioceno sup.* Conjunto volcánico III: estrato-volcanes mediana a debilmente erosionados. Andesitas de dos piroxenos, andesitas basálticas de olivino y piroxeno. Escasas dacitas de hornblenda y biotita.
- Nga** : *Mioceno medio*. Gravas de Atacama. Depósitos de gravas y bolones con matriz de arena, localmente consolidados en cemento de carbonatos y sulfatos.
- NvII** : *Mioceno inf.* - *Mioceno medio*. Conjunto volcánico II: estrato-volcanes medianamente erosionados. Andesitas de piroxenos y daciandesitas de hornblenda.
- Nip** : *Mioceno medio*. Ignimbrita Pajonales. Tobas dacíticas de cenizas y cristales (plg, anf, bi, px).
- NvI** : *Oligoceno* - *Mioceno inf.* Conjunto volcánico I: estrato-volcanes rofundamente erosionados. Andesitas de ortopiroxeno y clinopiroxeno con daciandesitas de hornblenda y/o biotita y piroxeno. Ocasionalmente andesitas basálticas de ortopiroxeno y olivino.
- Nirf** : *Mioceno inf.* Ignimbrita Río Frío. Tobas dacíticas ricas en cristales (plg, anf, px, bi).
- alt hi** : alteración hidrotermal.



SALAR DE LAS PARINAS

Introducción

El salar de las Parinas se encuentra en la Tercera Región, en un sector de difícil acceso adyacente a la frontera con Argentina. Partes de su cuenca de drenaje están en territorio argentino. Sus principales características morfológicas y climatológicas son:

- altura: 3987 m
- superficie de la cuenca: 676 km²
- superficie del salar: 40 km²
- superficie de las lagunas: 0,5 - 2 km²
- precipitaciones: 140 mm/año
- evaporación potencial: 1000 mm/año
- temperatura media: 0°C

No se encontró ningún aporte en sectores altos de la cuenca de drenaje. Todos afloran en la orilla del salar donde alimentan lagunas someras y de extensión variable. Es posible que estén secas en años poco lluviosos.

Composición de las aguas y salmueras

Las composiciones de las aguas del salar de las Parinas 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	
PAR-6	8907	Na	/ Cl- (SO4)	SO4 (N)
PAR-1	9317	Na	/ Cl- (SO4)	SO4 (N)
PAR-4	17395	Na	/ Cl- (SO4)	SO4 (N)
<u>LAGUNAS</u>				
PAR-2	36741	Na- (Mg)	/ Cl- (SO4)	SO4
PAR-7	46223	Na	/ Cl- (SO4)	SO4
PAR-3	230278	Na	/ Cl	SO4
PAR-5	333939	Na- (Mg)	/ Cl- (SO4)	SO4

Tabla 1 : Salinidades, tipos químicos y vías evolutivas de aguas del salar de las Parinas.
SO₄ (N) = vía neutra sulfatada.

Hemos encontrado solamente 3 vertientes, dos difusas y una fluyente, y todas con aguas saladas. El aporte más diluido (PAR-6) tiene una salinidad de 8,9 g/l y el más concentrado (PAR-4) de 17,4 g/l. La composición química de todas las aguas, aportes y lagunas, es homogénea, del tipo

Na-(Mg) / Cl - (SO₄), con leves variaciones en las proporciones de Mg y SO₄. Las aguas de aporte y de lagunas tienen concentraciones porcentuales similares. Todas las salmueras del salar de las Parinas contienen más sulfato que calcio por lo que se puede clasificar este salar dentro de los de tipo sulfatado.

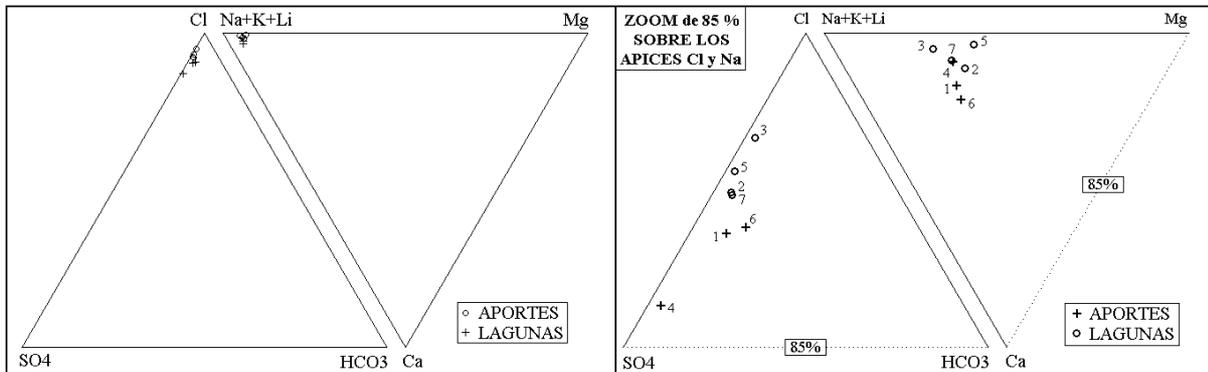


Fig.1: Composición de las aguas y salmueras del salar de las Parinas.

Origen de los componentes disueltos

La mejor relación de equimolaridad entre componentes mayores que se ha encontrado es entre Na y Cl (Fig.2).

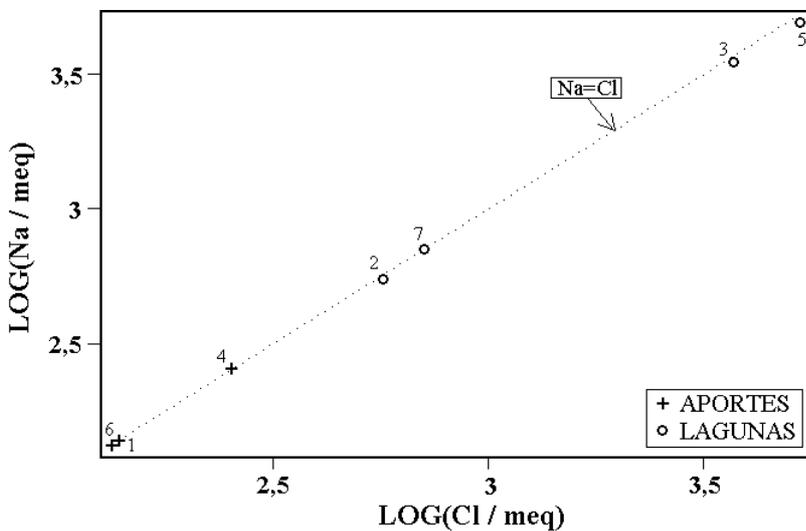


Fig. 2 : Relación entre Na y Cl en aguas del salar de las Parinas.

La igualdad es casi perfecta para las aguas de aporte. Para visualizarla mejor, presentamos en la tabla 2 las concentraciones de Na y Cl en miliequivalentes (o milimoles) por litro:

	Na (meq/l)	Cl (meq/l)	NaCl / STD
PAR-6	132	133	87,0 %
PAR-1	137	139	86,6 %
PAR-4	253	254	85,3 %

Tabla 2: Concentraciones en miliequivalentes por litro de Na y Cl en aguas de aporte del salar de las Parinas

Esta igualdad de concentraciones indica que Na y Cl provienen de la redisolución de cloruro de sodio (halita) de un antiguo salar recubierto por formaciones más recientes. El cloruro de sodio representa el 86 % de la salinidad total de los aportes. Por otra parte, no se observa ninguna tendencia equimolar entre SO₄ y Ca, lo que descarta la asociación de yeso (CaSO₄.2H₂O) con la halita, como ocurre generalmente en las antiguas evaporitas.

Vías evolutivas y relación con la geología

Todas las aguas del salar de las Parinas siguen la vía neutra sulfatada que se encuentra generalmente en terrenos volcánicos con azufre o volcano-sedimentarios. La cuenca de drenaje del salar de las Parinas es principalmente volcánica con una formación sedimentaria bien desarrollada: las Gravas de Atacama. Si esta litología podría reflejar la vía evolutiva sulfatada, no explica, sin embargo, la alta salinidad de los aportes que se debe a la salinización de aguas diluidas por cloruro de sodio de un antiguo salar. La hidroquímica del salar de las Parinas releja parcialmente la geología de la cuenca.

Evolución cuantitativa de aguas

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
<u>PAR-2</u>	8,83	4,48	20200	2020	51,8	27,4	12600	938	51,6	212	379	
PAR-1E	8,40	2,35	19900	2360	42,0	24,9	12500	1070	45,4	177	321	0,017
PAR-6E	8,38	2,58	20000	2100	64,6	24,8	12700	835	36,8	187	312	0,024
PAR-4E	8,44	2,67	18800	3680	42,8	25,1	12500	860	42,4	150	341	0,057
<u>PAR-3</u>	7,56	16,1	132000	8580	276	29,7	80700	5160	273	597	1940	
PAR-4E	7,91	4,53	128000	12300	291	9,40	79200	5860	289	750	2320	0,131
PAR-1E	7,88	3,86	127000	12400	269	9,50	78600	6830	291	908	2060	0,145
PAR-6E	7,86	5,34	127000	12200	406	9,46	79700	5300	233	966	1980	0,158
<u>PAR-5</u>	7,39	23,1	188000	16800	639	21,3	114000	7820	477	606	4060	
PAR-4E	7,65	4,99	189000	14300	410	4,74	116000	8650	427	562	3430	0,189
PAR-6E	7,42	3,65	188000	14100	508	4,76	117000	7830	345	571	2920	0,191
PAR-1E	7,70	5,13	188000	14400	395	4,83	115000	10100	429	574	3030	0,199
<u>PAR-7</u>	8,98	6,34	25100	2530	88,9	33,3	16400	962	49,3	206	447	
PAR-6E	8,35	2,72	25200	2640	81,3	23,8	15900	1050	46,3	225	393	0,016
PAR-1E	8,37	2,43	25000	2970	52,9	23,9	15700	1340	57,2	212	404	0,054
PAR-4E	8,41	2,78	23600	4630	53,9	24,1	15800	1080	53,4	178	429	0,074

Tabla 3 : Comparación de las aguas de aporte evaporadas (PAR-xE) con las salmueras del salar de las Parinas. ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

Veamos ahora la evolución cuantitativa de las aguas de aporte cuando se evaporan. La tabla 3 presenta la composición calculada de las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta la salinidad del agua de la laguna receptora. 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 (PAR-xE) y las aguas de laguna. Se observa una correlación buena a regular, sin anomalías, entre los aportes evaporados y las lagunas. En el sistema lagunar norte, se nota bien la transición de la influencia de las dos vertientes difusas (1 y 4) sobre la composición de las salmueras (PAR-2, 3 y 5), donde PAR-2 esta más cerca de la vertiente (1) y PAR-5 de la vertiente (4).

Calidad de agua

Todas las aguas son de pésima calidad tanto para el consumo humano como para el riego. Además las posibilidades de encontrar grandes cantidades de agua de buena calidad en napas más arriba en la cuenca no son alentadoras. Si los aportes han sido salinizados por antiguas evaporitas, las napas cuenca arriba pueden haberlo sido también.

Balance hídrico

No tenemos ninguna referencia sobre la variabilidad de superficie de las lagunas. Durante nuestra campaña en marzo de 1996 había dos grandes sistemas lagunares:

- una pequeña laguna al norte del salar de aproximadamente 0,03 km², alimentada por las vertientes difusas (1) y (4)
- una gran laguna, más o menos al centro del salar, de 1 a 2 km², alimentada por la vertiente fluyente (6).

Nuestra campaña tuvo lugar justo después de la época de lluvia (diciembre - febrero), por lo que la superficie de las lagunas debe ser superior a su promedio anual. Podemos estimar el balance hídrico de las lagunas basado sobre esta superficie, lo que dará un orden de magnitud probablemente en exceso. No se puede estimar las infiltraciones de la laguna grande por falta de muestra en la parte central. Se utiliza el cloruro como elemento conservativo. Los parámetros considerados son :

	Laguna PAR-2 / 3 / 5	Laguna PAR-7
H _c =	0,9 m/año (1m - 10%(1m))	1 m/año
H _p =	0,14 m/año	0,14 m/año
S =	0,03 km ²	1 km ²
C _{ap} =	7000 mg/l (PAR-(1+4)/2)	---
C _L =	100000 mg/l (PAR-(2+5)/2)	---

Se obtiene para la laguna PAR-2 / 3 / 5 :

$$\text{Volumen de aporte : } V_{ap} = S(H_c - H_p) / (1 - C_{ap} / C_L) = 24\,500 \text{ m}^3/\text{año} = 0,8 \text{ l/s}$$

Volumen de infiltraciones : $V_i = S(H_c - H_p) / (1 - C_L / C_{ap}) = 1700 \text{ m}^3/\text{año} = 0,05 \text{ l/s}$
y para la laguna PAR-7 :

$$\text{Volumen de aporte : } V_{ap} = S(H_c - H_p) = 860\,000 \text{ m}^3/\text{año} = 27 \text{ l/s}$$

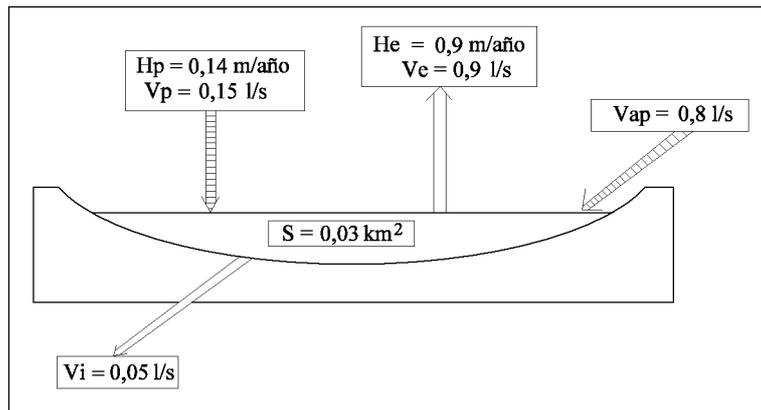


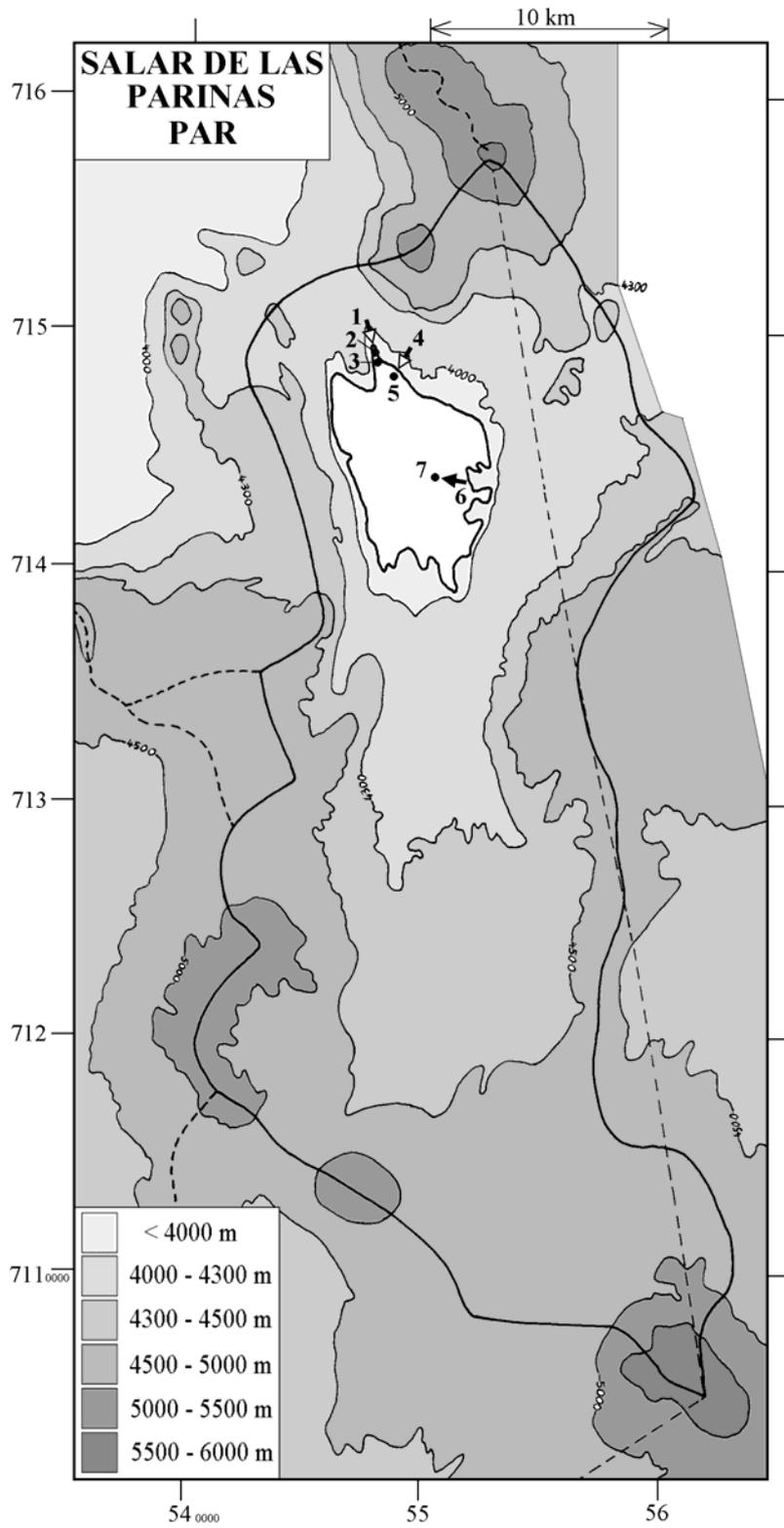
Fig.3 : Balance hídrico muy aproximado de la laguna norte del salar de las Parinas

Entra muy poca agua en el salar de las Parinas. Eso confirma las pocas posibilidades de encontrar grandes cantidades de aguas diluidas en las cercanías del salar.

Conclusiones

El salar de las Parinas no presenta buenas potencialidades para recursos de agua. El agua más diluida que se ha encontrado tiene 8,9 g/l de salinidad. Casi todas las aguas son del tipo Na / Cl- (SO_4) y de vía evolutiva neutra sulfatada. Se puede relacionar la vía sulfatada con la presencia de terrenos sedimentarios (Gravas de Atacama). La alta salinidad de los aportes se debe a la redisolución de halita (NaCl) de un antiguo salar recubierto por formaciones más recientes. Las napas subterráneas de la parte alta de la cuenca, podrían estar salinizadas, lo que no es muy alentador para prospectar agua de buena calidad en esta cuenca. Las lagunas tienen una alimentación muy escasa y podrían secarse rápidamente en caso de sequía o de explotación de napas subterránea cuenca arriba. El sistema ecológico de este salar, ilustrado por su mismo nombre, es frágil.

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



**SALAR DE LAS PARINAS
PAR**

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE	METROS	
PAR-1	17/03/96	12 ^H 25	547488	7149249	3989	Manantial difuso
PAR-2	17/03/96	12 ^H 53	547522	7149101	3987	Laguna
PAR-3	17/03/96	13 ^H 05	547770	7148778	3987	Laguna
PAR-4	17/03/96	14 ^H 20	548801	7148063	3988	Manantial difuso
PAR-5	17/03/96	14 ^H 35	548714	7147971	3987	Laguna
PAR-6	17/03/96	15 ^H 45	550425	7143634	3987	Manantial corriente
PAR-7	17/03/96	15 ^H 55	550410	7143688	3987	Laguna

NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
PAR-1	14770	17,2	0,6	1,007	7,12	2,38	4930	0,284	0,0040	590	14,5	10,5	30,8	0,097	3150	267	11,4	80,2	80,4
PAR-2	50200	23,6	8,6	1,026	8,83	4,48	20200	1,21	0,0483	2020	0,174	51,8	27,4	0,240	12600	938	51,6	212	379
PAR-3	211000	21,2	2,0	1,153	7,56	16,1	132000	6,97	0,352	8580	0,403	276	29,7	1,20	80700	5160	273	597	1940
PAR-4	24600	14	3,9	1,011	6,53	1,64	9020	0,544	0,0072	1740	0,050	20,2	31,1	0,082	5820	407	20,1	78,6	161
PAR-5	219000	21,2	1,0	1,217	7,39	23,1	188000	14,6	0,523	16800	1,17	639	21,3	3,76	114000	7820	477	606	4060
PAR-6	14390	10	6,8	1,006	7,92	3,22	4720	0,341	0,0390	498	17,4	15,4	37,8	0,650	3040	199	8,74	96,6	74,1
PAR-7	60700	15,4	10	1,033	8,98	6,34	25100	1,86	0,141	2530	9,42	88,9	33,3	2,00	16400	962	49,3	206	447

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

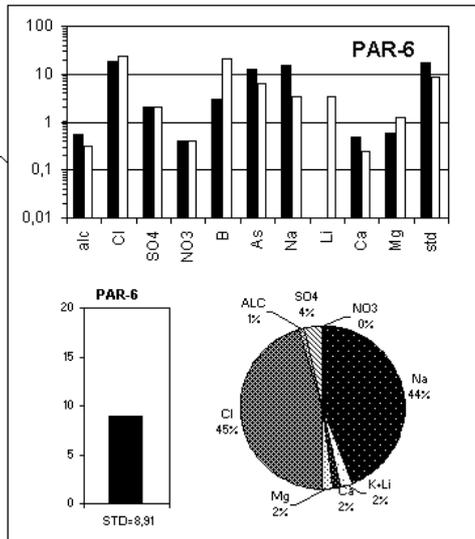
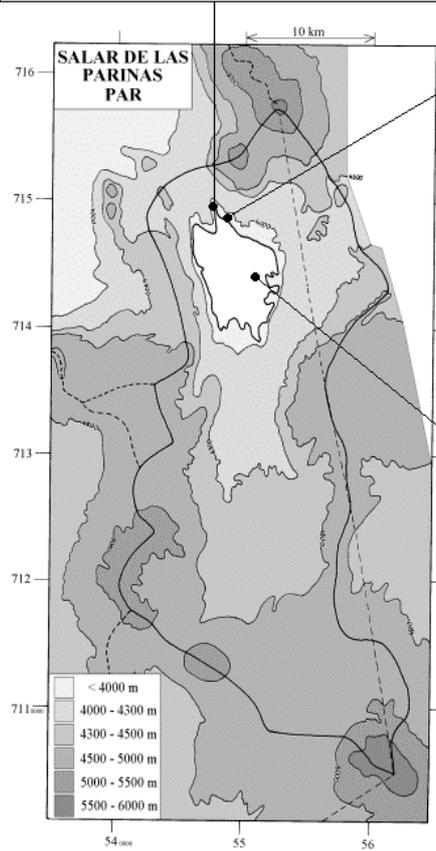
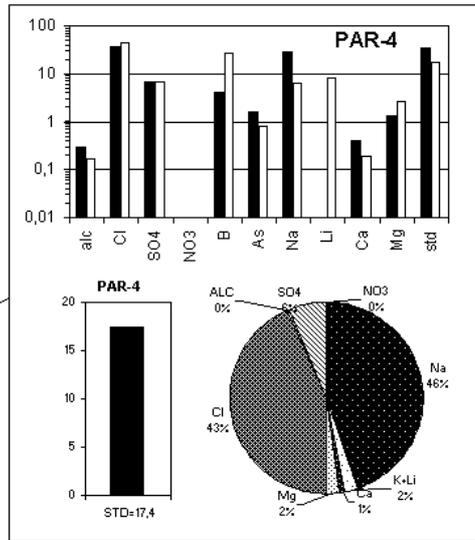
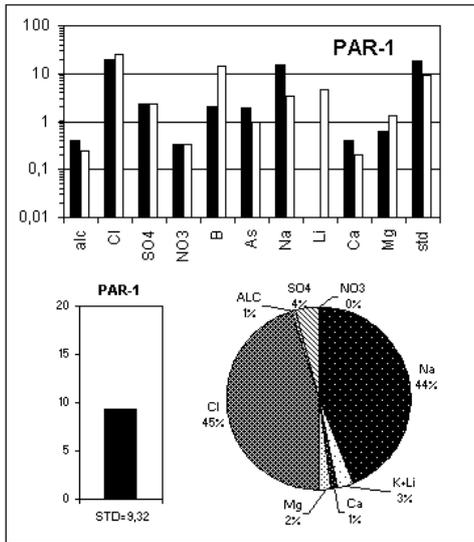
CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF. %	NUMERO	δ ¹⁸ O	δ ² H
PAR-1	9317	144	0,30	14	156,1	153,9	1,4	PAR-6	-7,35	-72
PAR-2	36741	88,5	20,1	0,13	622,2	614,5	1,3	Análisis de oxígeno-18 y deuterio		
PAR-3	230278	-	-	-	3871	3905	0,9			
PAR-4	17395	99,4	0,06	36	283,5	291,8	2,9			
PAR-5	333939	-	-	-	5603	5663	1,1			
PAR-6	8907	187	1,86	3,3	149,3	146,9	1,6			
PAR-7	46223	72,6	20,8	0,08	790,8	767,3	3,0			

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

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

DIF.% = diferencia en %



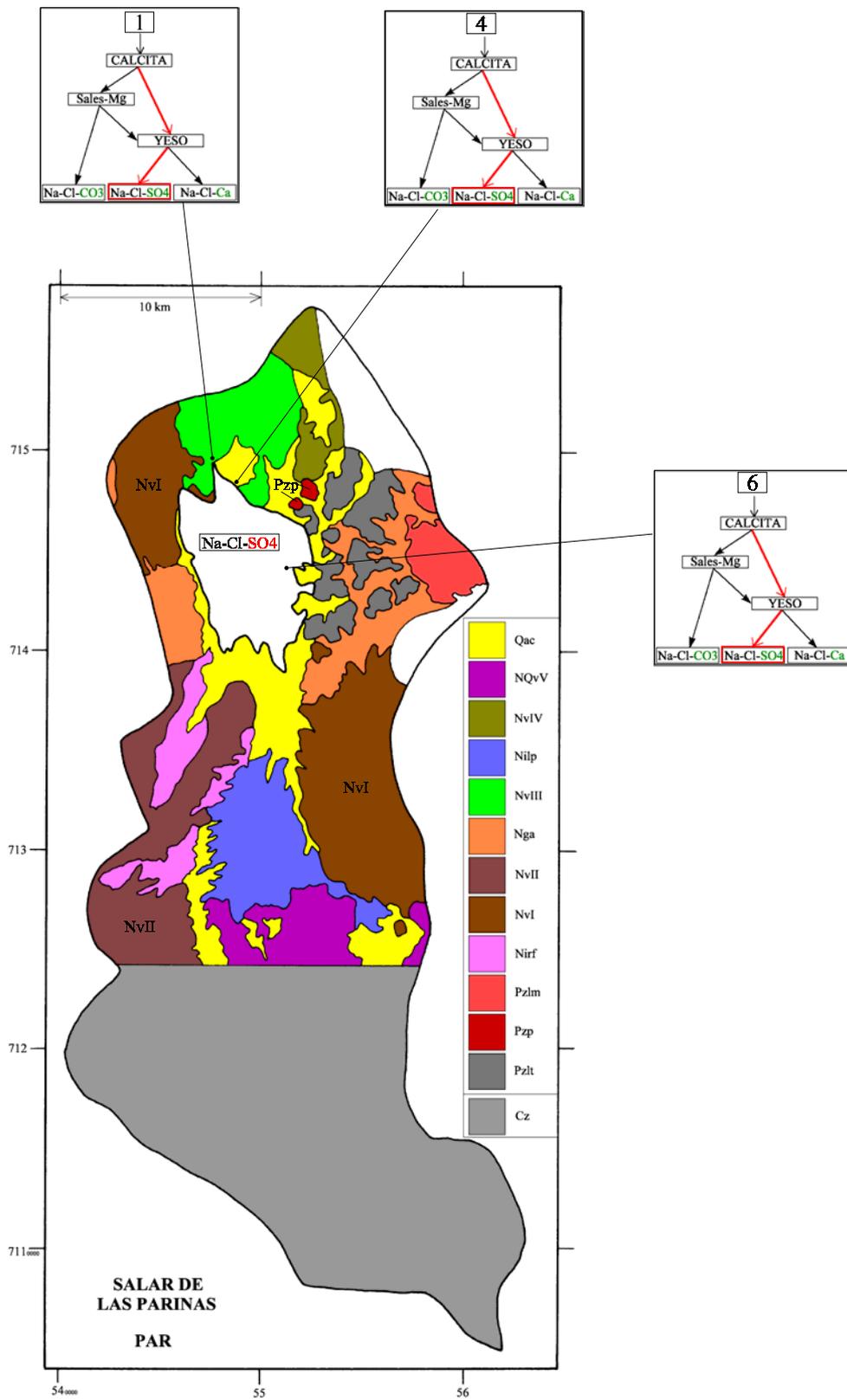
MAPA GEOLOGICO

Y

VIAS EVOLUTIVAS

PAR

- Qac** : *Cuaternario*. Depósitos aluviales y coluviales: bloques, gravas y arenas con cenizas, arcillas y sales.
- NQvV** : *Plioceno sup.* - *Pleistoceno inf.* Conjunto volcánico V: Lavas bien preservadas de andesitas y dacitas de piroxeno y biotita, ocasionalmente hornblenda.
- NvIV** : *Mioceno sup.* - *Plioceno inf.* Conjunto volcánico IV: estrato-volcanes y conos de escoria debilmente erosionados. Andesitas de dos piroxenos y dacitas de piroxeno y biotita. Ocasionalmente andesitas basálticas de olivino y piroxeno.
- Nilp** : *Mioceno sup.* Ignimbrita Las Parinas. Tobas de pómez y cristales (plg, bi, qz).
- NvIII** : *Mioceno medio* - *Mioceno sup.* Conjunto volcánico III: estrato-volcanes mediana a debilmente erosionados. Andesitas de dos piroxenos, andesitas basálticas de olivino y piroxeno. Escasas dacitas de hornblenda y biotita.
- Nga** : *Mioceno medio*. Gravas de Atacama. Depósitos de gravas y bolones con matriz de arena, localmente consolidados en cemento de carbonatos y sulfatos.
- NvII** : *Mioceno inf.* - *Mioceno medio*. Conjunto volcánico II: estrato-volcanes medianamente erosionados. Andesitas de piroxenos y daciandesitas de hornblenda.
- NvI** : *Oligoceno* - *Mioceno inf.* Conjunto volcánico I: estrato-volcanes rofundamente erosionados. Andesitas de ortopiroxeno y clinopiroxeno con daciandesitas de hornblenda y/o biotita y piroxeno. Ocasionalmente andesitas basálticas de ortopiroxeno y olivino.
- Nirf** : *Mioceno inf.* Ignimbrita Río Frío. Tobas dacíticas ricas en cristales (plg, anf, px, bi).
- Pzlm** : *Pérmico* - *Triásico*. Plutón León Muerto. Granodiorita de biotita y anfíbola; allanita y circón como accesorios.
- Pzp** : *Carbonífero* - *Pérmico*. Plutón Parinas. Granito porfídico (plg, feldK, bi).
- Pzlt** : *Carbonífero* - *Pérmico*. Fm. La Tabla. Tobas soldadas y porfidos riolíticos ricos en cristales
- Cz** : *Cenozoico*. Rocas volcánicas: dacitas - andesitas.



SALAR GRANDE (III Región)

Introducción

Hay en Chile dos salares que llevan el nombre de salar Grande. El más conocido ocupa una depresión en la Cordillera de la Costa de la Primera Región. El que nos interesa, se encuentra en la Cordillera de los Andes de la Tercera Región, en un sector de difícil acceso que significaba un viaje de cuatro horas a partir del campamento base, La Ola, de CODELCO - Salvador. El salar es de tipo "playa" con sedimentos salinos recubiertos en la parte sur por un sistema complejo de lagunas superficiales. La parte norte estaba seca en la época de nuestra visita (noviembre de 1995). Sus principales características morfométricas y climatológicas son:

- altura: 3950 m
- superficie de la cuenca: 867 km²
- superficie del salar: 29 km²
- superficie de las lagunas: 0,4 km²
- precipitaciones: 130 mm/año
- evaporación potencial: 1000 mm/año
- temperatura media: -2°C

No hemos tenido tiempo para un estudio detallado, en particular para buscar vertientes cuenca arriba. Solamente hemos podido muestrear un perfil de cuatro puntos a la orilla del salar, una vertiente difusa, dos pozas y una laguna. Toda la orilla sur parece ser una extensa vertiente difusa. Hemos medido la conductividad de muchas aguas de aporte, cuyos valores variaban entre 8000 y 12 000 $\mu\text{mho/cm}$ (salinidades entre 8 y 12 g/l), siendo la vertiente (GRA-1) la menos concentrada que se encontró.

Composición de aguas y salmueras

Las composiciones de las aguas estudiadas en el salar Grande están presentadas en la figura 1, en la tabla 1 y en el diagrama circular. El aporte salado GRA-1 (8,3 g/l) y las lagunas (o pozas) tienen una composición muy similar con fuerte predominancia de Na y Cl. Estos dos componentes constituyen el 80 % de la salinidad de la vertiente difusa.

<u>APORTES</u>	<u>SALINIDAD</u> mg/l	<u>TIPO QUÍMICO</u>		<u>VIA EVOLUTIVA</u>
		Cationes	Aniones	
GRA-1	8277	Na- (Ca) - (Mg)	Cl- (SO4) - (HCO3)	SO4 (N)
<u>LAGUNAS</u>				
GRA-2	20394	Na- (Ca) - (Mg)	Cl- (SO4)	SO4
GRA-4	28955	Na- (Ca) - (Mg)	Cl- (SO4)	Ca
GRA-3	129706	Na- (Mg) - (Ca)	Cl	Ca

Tabla 1 : Salinidades, tipos químicos y vías evolutivas de aguas del salar Grande
SO₄ (N) = vía neutra sulfatada; Ca = vía cálcica.

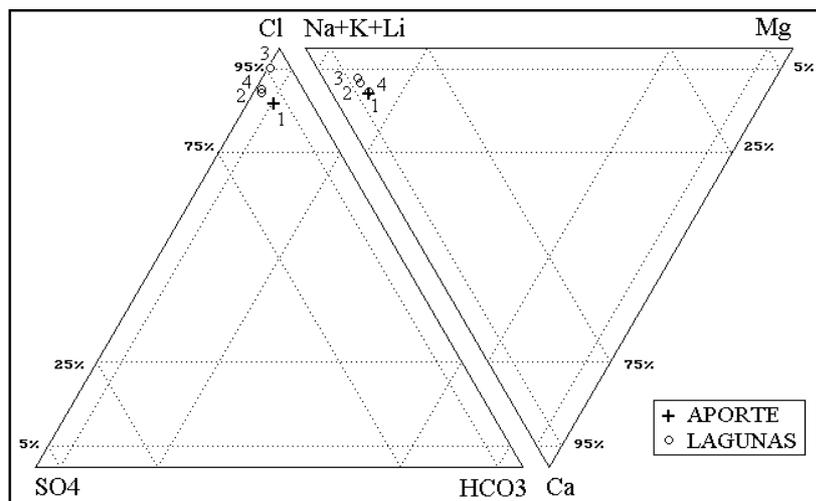


Fig.1: Composición de aguas y salmueras del salar Grande

La laguna (3) y la poza (4) pertenecen al mega-grupo de salmueras cálcicas, mientras que la poza (2) es sulfatada.

Origen de los componentes disueltos

Hay dos posibilidades para explicar la alta salinidad del aporte:

- puede ser el producto de la redisolución de antiguas evaporitas en la cuenca de drenaje.

Se detecta varias tendencias equimolares en la composición de GRA-1: $\text{Na} + \text{Ca} = \text{Cl}$; $\text{Na} + \text{Mg} \cong \text{Cl}$; $\text{Ca} \cong \text{SO}_4$ y también, al límite, $\text{Na} \sim \text{Cl}$.

- puede ser la mezcla de la cuña salina del salar con napas diluidas. La similitud de las composiciones porcentuales del aporte y de las lagunas aboga por esta hipótesis.

Con una sola muestra no podemos zanjar entre las dos alternativas. Por otra parte, nada impide que las dos puedan ser válidas conjuntamente.

Vías evolutivas y relación con la geología

El agua de aporte (1) sigue la vía evolutiva neutra sulfatada. Su trayecto evaporatorio calculado está indicado (Fig. 2) en línea continua y el trayecto real aproximado, en línea puntillada. El descenso inicial de la línea continua en este gráfico, corresponde a la precipitación de calcita por sobresaturación, lo que elimina Ca de la solución. Puesto que la simulación debe realizarse siempre al equilibrio, la precipitación se produce inmediatamente al principio del cálculo. En la realidad, por razones cinéticas, el descenso del calcio es progresivo. Se nota que el trayecto evaporatorio cruza la línea equimolar. El agua de aporte tiene más Ca que SO_4 ; sin embargo, al consumir calcio, la precipitación de la calcita induce la vía evolutiva sulfatada.

El agua de poza (2) pertenece a la misma vía evolutiva sulfatada. Al contrario, las aguas de poza (4) y de laguna (3) pertenecen a la vía cálcica. La salmuera de la laguna, no provendría de la evaporación de la sola vertiente difusa (1). Lo que tenemos aquí podría ser una mezcla de dos tipos de agua: la vertiente desemboca en la laguna cuyo principal aporte viene de otra parte.

La vía sulfatada del aporte refleja terrenos volcánicos con azufre, mientras que la vía cálcica está asociada a terrenos sedimentarios. Disponemos solamente del mapa geológico detallado del sector norte de la cuenca, donde las Gravas de Atacama son la única formación sedimentaria que aparece en el mapa y podría ser responsable de la composición cálcica de la laguna.

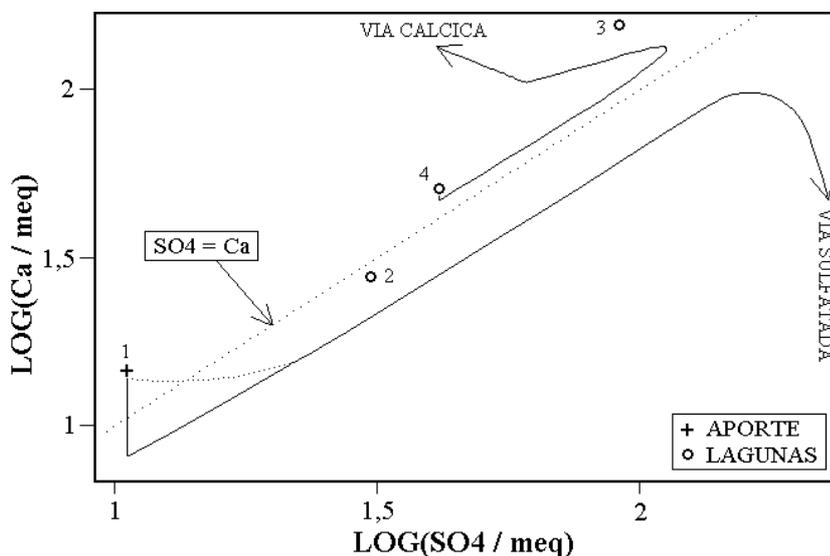


Fig.2 : Relación entre SO_4 y Ca en aguas del Salar Grande con dos trayectos evaporatorios.

Evolución cuantitativa de aguas

Veamos ahora la evolución cuantitativa del agua de aporte cuando se evapora. La tabla 2 presenta la composición calculada del agua de aporte evaporada por simulación computacional hasta la salinidad de las pozas y de la laguna. Los valores de la columna "desviación" son los coeficientes del chi-cuadrado adaptado que miden el grado de semejanza entre la solución de aporte evaporada (GRA-1E) y las lagunas (GRA-x.EQ). Todas las composiciones de las lagunas fueron ajustadas al equilibrio con los minerales que las sobresaturan.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DES.V.
<u>GRA-2.EQ</u>	8,17	1,65	10800	1480	93,9	25,0	6280	485	18,8	481	297	
GRA-1E	8,17	1,73	11000	1340	89,7	30,9	6400	464	19,2	385	327	0,012
<u>GRA-4.EQ</u>	8,05	1,56	15600	1990	120	24,1	8690	614	26,6	920	472	
GRA-1E	8,12	1,99	15600	1900	127	29,9	9090	660	27,3	538	465	0,033
<u>GRA-3.EQ</u>	6,98	3,14	74400	4400	529	14,8	41300	2770	123	2940	1910	
GRA-1E	7,82	6,08	71200	7630	580	19,8	41500	3010	125	1960	2120	0,057

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

Se observa un excelente coeficiente de desviación entre la poza (2) y la vertiente evaporada 1E, lo que indica que esta poza proviene de la evaporación del agua de la vertiente. Los dos otros coeficientes de desviación son todavía buenos pero no tanto como el primero. Observemos detalladamente las composiciones de la laguna (GRA-3.EQ) y de la vertiente evaporada (1E). Los componentes que mas discrepan son SO_4 (54%), Ca (40%), ALC (64%) y Si (30%). Los demás (Na, K, Li, Mg, Cl, B) presentan concentraciones similares entre la vertiente evaporada y la laguna (diferencias entre 0,5% y 10%). El primer grupo corresponde a los componentes involucrados en la precipitación de minerales en el curso de la evaporación (calcita, yeso, silice) mientras que el otro grupo reúne todos los componentes que no precipitan en minerales y que quedan en solución.

Esta situación es difícil de interpretar. De un lado la similitud de composición del grupo de componentes que no precipita sugiere que la salinidad de la vertiente difusa (1) se debería a una contaminación importante del agua de la vertiente por la salmuera de la laguna. Por otro lado, la sistemática discrepancia entre las concentraciones de los componentes que precipitan sugiere que la salmuera no proviene de la sola evaporación del agua de la vertiente. Lo más probable es que varios procesos ocurren conjuntamente.

Calidad de aguas

El agua de aporte no cumple con las normas chilenas de potabilidad o de riego pues contiene 30 veces mas arsénico y 50 veces mas boro que los máximos permitidos además de tener una salinidad muy elevada.

Balance hídrico

Podemos establecer un orden de magnitud del balance hídrico del sistema lagunar del salar. Puesto que hay una gran duda al respecto del principal aporte a la laguna, no se puede estimar las infiltraciones. La evaporación de la laguna corresponde a la evaporación potencial disminuida de 10% para tomar en cuenta la salinidad de la salmuera. Los parámetros considerados son:

- $H_e = (1 - 0,1) = 0,9$ m/año
- $H_p = 0,13$ m/año
- $S = 0,4$ km²

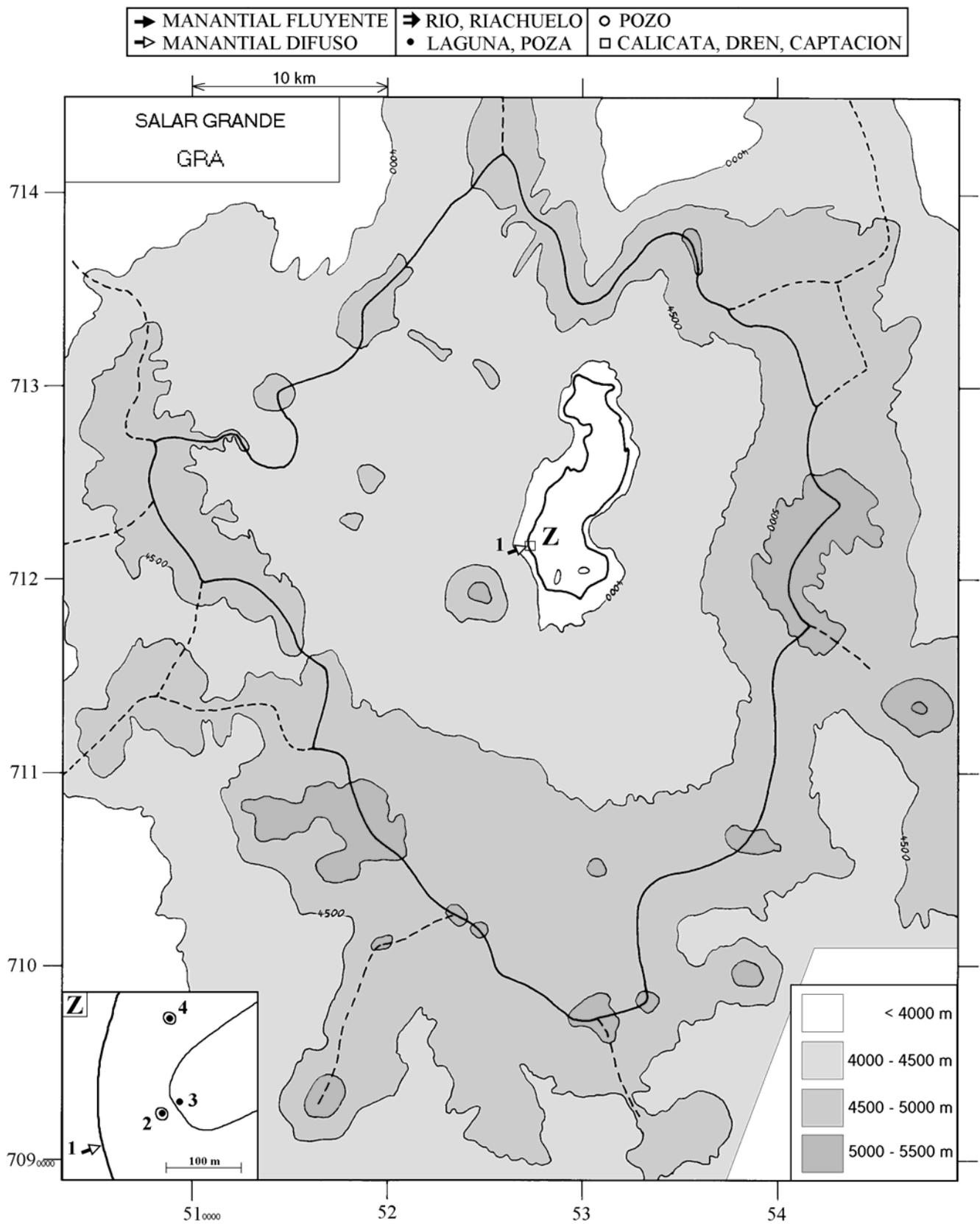
Volumen de aporte : $V_{ap} = S(H_e - H_p) = 300\ 000$ m³/año = 10 l/s

Es un caudal entrante muy bajo, especialmente si se toma en cuenta la extensión de la zona de aporte que alcanza varios kilómetros. Corresponde a un flujo de unos mililitros por segundo y por metro de orilla. Las salmueras del salar pueden fácilmente contaminar las napas diluidas en las orillas. Por otra parte, el volumen de lluvia sobre la cuenca sur es de 1650 l/s, lo que lleva a un coeficiente de escurrimiento de 0,6% (razón entre lo que cae sobre la cuenca y lo que entra superficialmente en el salar). Este valor muy bajo indica que la mayor parte de las precipitaciones se infiltra para alimentar napas subterráneas.

Conclusiones

El único perfil de aguas que hemos estudiado en la orilla del salar Grande es difícil de interpretar. Todas las aguas tienen composiciones porcentuales similares, pero con pequeñas diferencias que inducen dos vías evolutivas distintas. Al evaporarse, la vertiente produce una salmuera sulfatada, mientras que la laguna pertenece a la vía cálcica. Eso sugiere una mezcla del agua de la vertiente con la salmuera de la laguna cuyo principal aporte provendría de otra parte. Sin embargo, la simulación de la evaporación del agua de la vertiente, muestra una gran similitud de las concentraciones, tanto en la solución calculada como en la laguna, de los componentes conservativos que no precipitan como mineral: Na, K, Li, Mg, Cl, B. Eso sugiere una fuerte contaminación del agua de la vertiente por la salmuera de la laguna, lo que explicaría la elevada salinidad de la vertiente.

El caudal superficial entrante en la parte sur del salar es muy escaso: unos 10 l/s. Aparentemente, el salar Grande no presenta buenas potencialidades para recursos de agua. Sin embargo, si la alta salinidad de los aportes a la orilla sur se debe efectivamente a una cuña salina, no se puede excluir la existencia de napas diluidas cuenca arriba.



SALAR GRANDE (III REGION)
GRA

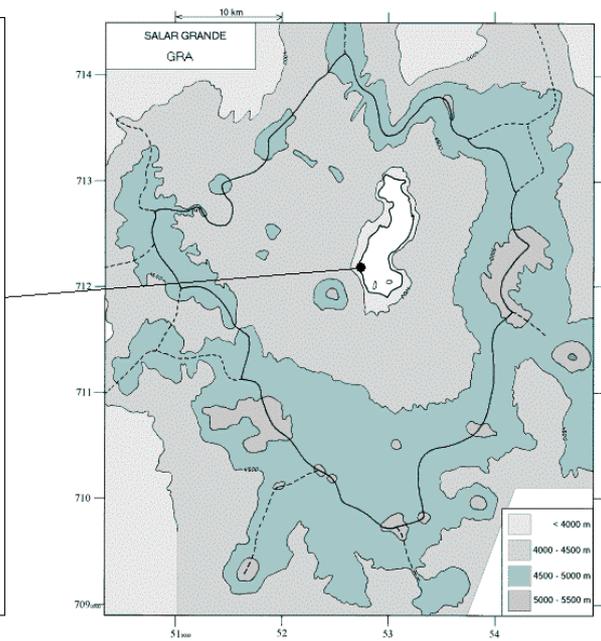
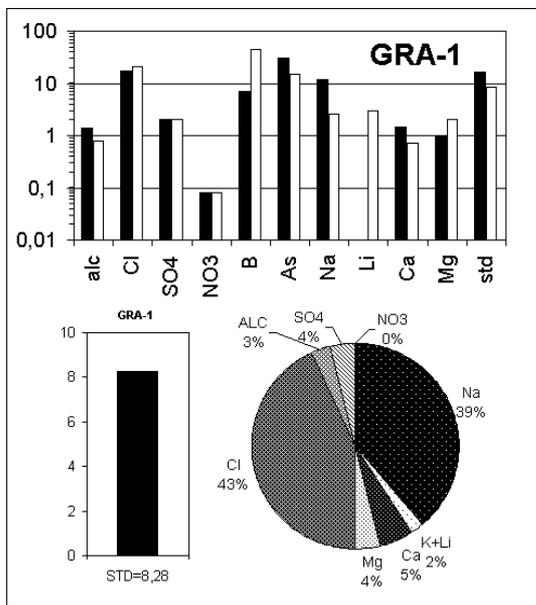
NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
GRA-1	14/11/95	15 ^H 00	527132	7121396	3951	Manantial difuso
GRA-2	14/11/95	15 ^H 30	527236	7121442	3950	Poza de preconcentración
GRA-3	14/11/95	16 ^H 00	527246	7121445	3950	Laguna
GRA-4	14/11/95	16 ^H 30	527208	7121530	3950	Poza de preconcentración

NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
GRA-1	8000	16,7	5,5	1,006	8,10	7,88	4220	0,991	0,202	508	3,60	34,1	31,4	1,5	2390	176	7,29	291	124
GRA-2	18000	17,6	5,8	1,015	8,14	5,46	10800	2,43	0,336	1480	0,022	93,8	40,9	2,6	6260	485	18,8	557	296
GRA-3	106000	18,3	4,3	1,089	7,60	13,2	75300	13,9	0,581	4400	0,732	529	45,6	12	40700	2770	123	3140	1910
GRA-4	35000	16,8	6,2	1,021	7,95	6,29	15600	3,74	0,393	1990	0,038	120	39,8	2,4	8670	614	26,6	1010	471

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
GRA-1	8277	437	11,9	4,4	134,3	137,5	2,4	GRA-1	-5,74	-61
GRA-2	20394	243	10,7	2,1	339,3	341,3	0,6	Análisis de oxígeno-18 y deuterio		
GRA-3	129706	-	-	-	2173	2225	2,4			
GRA-4	28955	293	11,6	3,9	485,9	487,7	0,4			

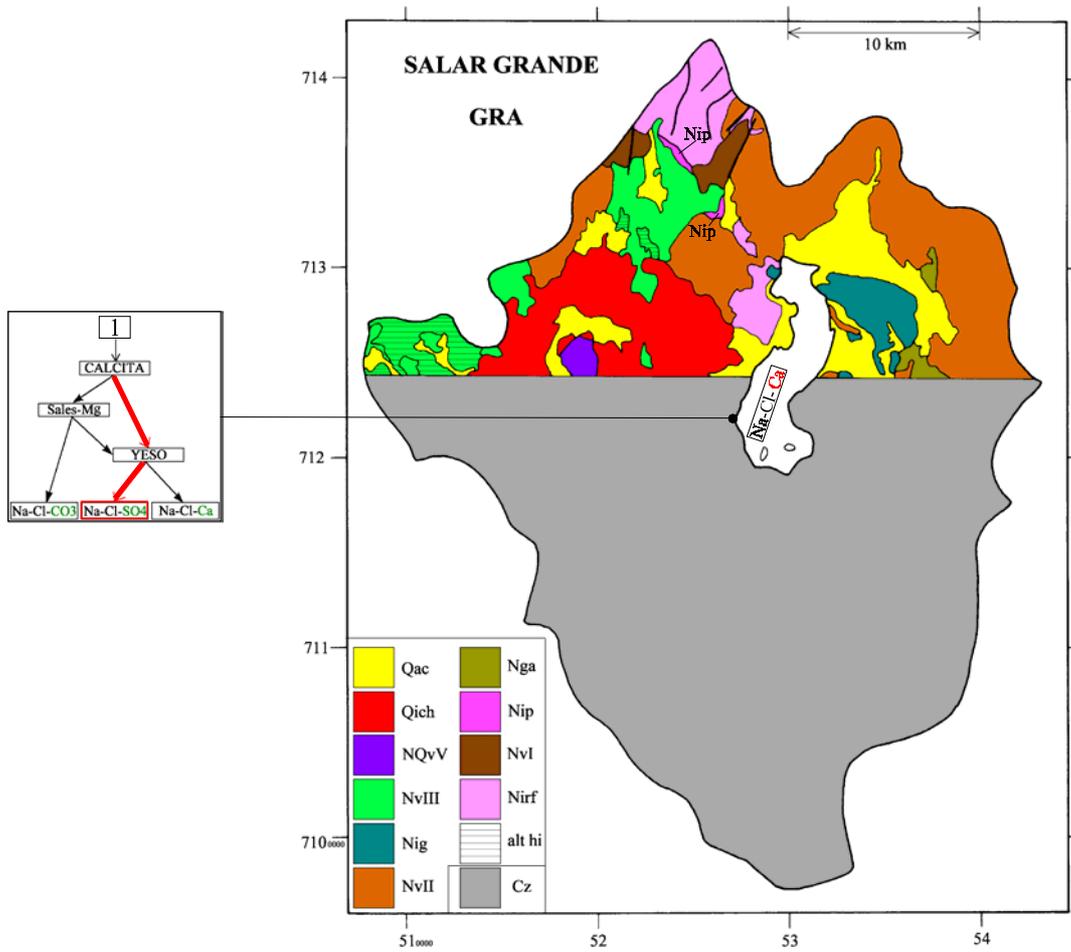
Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.
S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l)
DIF.% = diferencia en %



MAPA GEOLOGICO
Y
VIAS EVOLUTIVAS

GRA

- Qac** : *Cuaternario*. Depósitos aluviales y coluviales: bloques, gravas y arenas con cenizas, arcillas y sales.
- Qich** : *Pleistoceno inf.* Ignimbrita Chato Aislado. Pómez rica en cristales (plg, bi, anf, qz)
- NQvV** : *Plioceno sup. - Pleistoceno inf.* Conjunto volcánico V: Lavas bien preservadas de andesitas y dacitas de piroxeno y biotita, ocasionalmente hornblenda.
- NvIII** : *Mioceno medio - Mioceno sup.* Conjunto volcánico III: estrato-volcanes mediana a debilmente erosionados. Andesitas de dos piroxenos, andesitas basálticas de olivino y piroxeno. Escasas dacitas de hornblenda y biotita.
- Nig** : *Mioceno medio*. Ignimbrita Grande. Tobas de cenizas, pómez y cristales (plg, bi).
- NvII** : *Mioceno inf. - Mioceno medio*. Conjunto volcánico II: estrato-volcanes medianamente erosionados. Andesitas de piroxenos y daciandesitas de hornblenda.
- Nga** : *Mioceno medio*. Gravas de Atacama. Depósitos de gravas y bolones con matriz de arena, localmente consolidados en cemento de carbonatos y sulfatos.
- Nip** : *Mioceno medio*. Ignimbrita Pajonales. Tobas dacíticas de cenizas y cristales (plg, anf, bi, px).
- NvI** : *Oligoceno - Mioceno inf.* Conjunto volcánico I: estrato-volcanes rofundamente erosionados. Andesitas de ortopiroxeno y clinopiroxeno con daciandesitas de hornblenda y/o biotita y piroxeno. Ocasionalmente andesitas basálticas de ortopiroxeno y olivino.
- Nirf** : *Mioceno inf.* Ignimbrita Río Frío. Tobas dacíticas ricas en cristales (plg, anf, px, bi).
- alt hi** : alteración hidrotermal.
- Cz** : *Cenozoico*. Rocas volcánicas: dacitas - andesitas.



SALAR DE INFIELES

Introducción

El salar de Infieles es un pequeño salar ubicado en la Tercera Región al norte del salar de Pedernales. Es una costra de yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) con pocas y pequeñas pozas o "ojos" que parecen más afloramiento de napa que lagunas. Sus principales características morfológicas y climatológicas son:

- altura: 3520 m
- superficie de la cuenca: 293 km²
- superficie del salar: 6,7 km²
- superficie de las lagunas: despreciable
- precipitaciones: 100 mm/año
- evaporación potencial: 1100 mm/año
- temperatura media: 2°C

Hemos encontrado solamente dos vertientes difusas a la orilla este del salar. Aparentemente, no existe ningún aporte cuenca arriba.

Composición de aguas y salmueras

Las composiciones de aguas del salar de Infieles están presentadas en la figura 1 y en la tabla 1. Las dos vertientes tienen la misma composición catiónica; pero su composición aniónica es diferente. La vertiente salobre 1 contiene más bicarbonato y menos cloruro que la vertiente salada 6. La composición de las salmueras presenta una variación continua de su contenido porcentual de sulfato: conforme se van concentrando, la proporción de sulfato disminuye. La solución menos concentrada (2) y con más sulfato pertenece al mega-grupo de salmueras sulfatadas (con más sulfato que calcio). Al contrario, las tres otras salmueras con menos sulfato son del mega-grupo de salmueras cálcicas. En un área muy restringida, existen los dos grandes tipos de salmueras neutrales.

<u>APORTES</u>	<u>SALINIDAD</u> mg/l	<u>TIPO QUÍMICO</u>		<u>VIA EVOLUTIVA</u>
		Cationes	Aniones	
INF-1	1677	Na- (Ca) - (Mg)	Cl- (HCO3) - (SO4)	SO4 (A)
INF-6	8575	Na- (Ca) - (Mg)	Cl- (SO4)	SO4 (N)
<u>POZAS</u>				<u>MEGA-GRUPO</u>
INF-2	12710	Na- (Ca) - (Mg)	Cl-SO4	SO4
INF-5	20199	Na- (Ca) - (Mg)	Cl- (SO4)	Ca
INF-4	75700	Na- (Mg) - (Ca)	Cl- (SO4)	Ca
INF-3	318743	Na- (Mg) - (Ca)	Cl	Ca

Tabla 1 : Salinidades, tipos químicos y vías evolutivas de aguas del salar de Infieles
 SO_4 (A) = vía alcalina sulfatada; SO_4 (N) = vía neutra sulfatada.

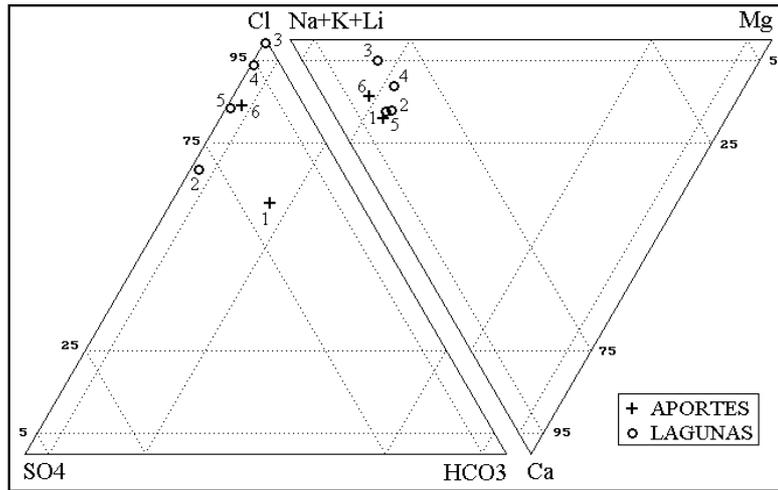


Fig.1: Composición de aguas y salmueras del salar de Infieles.

Origen de los componentes disueltos

Las mejores relaciones de equimolaridad entre componentes mayores de las aguas de aporte son entre Na vs Cl y Ca vs SO₄ (Fig.2). La suma de los cuatro componentes corresponde al 74% de la salinidad de INF-1 y al 90% de la de INF-6. Eso sugiere que la alta salinidad de los dos aporte se debe a la redisolución por aguas diluidas de halita y de yeso de antiguas evaporitas. Es poco probable que se trate de una cuña salina o de una pre-evaporación de napa diluida, puesto que las salmueras del salar son cálcicas, y los aportes sulfatados.

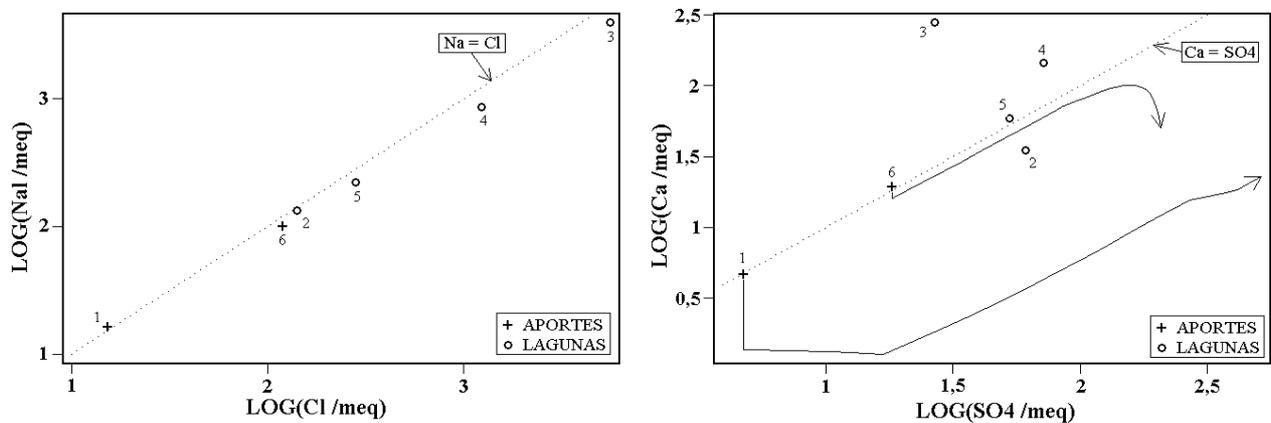


Fig.2 : Relaciones Na versus Cl y Ca versus SO₄ en aguas del salar de Infieles.

Vías evolutivas y relación con la geología

Las dos aguas de aporte siguen vías evolutivas sulfatadas: alcalina sulfatada para INF-1 y neutra sulfatada para INF-6. Estas vías son consistentes con la geología de la cuenca constituida por formaciones volcánicas con azufre. Se observa la presencia de sectores en la cuenca con fuerte alteración hidrotermal. El problema es la presencia de salmueras cálcicas en el salar, las que no provienen de la evaporación de los aportes encontrados. En la figura 2 aparecen los trayectos

evaporatorios que siguen los aportes al evaporarse. La salmuera más concentrada no tiene relación con los aportes. Salmueras cálcicas que corresponden a la vía evolutiva cálcica se encuentran sobre todo asociadas a terrenos sedimentarios, ausentes de la cuenca de Infieles que es exclusivamente volcánica.

Evolución cuantitativa de aguas

Veamos ahora la evolución cuantitativa de las aguas de aporte cuando se evaporan. La tabla 2 presenta la composición calculada de todas las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta la salinidad de las diversas lagunas. 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 (INF-xE) y las salmueras (INF-x.EQ). Todas las composiciones de las salmueras fueron ajustadas al equilibrio con los minerales que las sobresaturan.

<u>NUMERO</u>	<u>PH</u>	<u>ALC</u>	<u>CL</u>	<u>SO4</u>	<u>B</u>	<u>SI</u>	<u>NA</u>	<u>K</u>	<u>LI</u>	<u>CA</u>	<u>MG</u>	<u>DESV.</u>
<u>INF-2.EQ</u>	8,08	1,21	4980	2920	72,2	29,3	3120	267	16,0	642	309	
INF-6E	8,10	1,24	6350	1330	68,0	31,9	3500	371	19,6	474	248	0,093
INF-1E	8,58	4,13	5270	2270	102	32,6	3820	344	18,8	58,8	237	0,317
<u>INF-5.EQ</u>	7,98	1,18	9920	2530	96,2	28,3	5120	528	31,2	1120	457	
INF-6E	8,04	1,46	10200	2130	109	31,0	5610	595	31,4	748	397	0,026
INF-1E	8,52	4,99	8480	3650	164	31,7	6140	552	30,2	90,4	364	0,343
<u>INF-4.EQ</u>	7,82	3,34	43100	3460	348	21,8	20100	2170	126	2800	2480	
INF-6E	7,89	4,30	40100	5690	429	24,9	22100	2340	124	1790	1560	0,072
INF-1E	8,27	10,9	32000	13800	601	26,1	23200	2090	114	317	1300	0,480
<u>INF-3.EQ</u>	5,91	3,24	194000	1230	941	4,57	93700	9590	531	5310	10400	
INF-6E	6,74	4,30	181000	9750	1670	7,85	99800	10600	560	1230	7070	0,475
INF-1E	6,61	3,87	165000	27300	2050	8,67	98500	10700	587	548	6680	0,717

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

Se observa primero que la evaporación del aporte más diluido (1) produce una samuera (1E) sin relación con las que existen en el salar. Los coeficientes de desviación son malos. El aporte evaporado (6E) tiene buena concordancia con la solución del salar más proxima (5) y menos concentrada. Pero al alejarse de la vertiente, y concentrarse las salmueras, su correlación con (6E) se vuelve menos buena, y, para la salmuera más concentrada (3) ya no hay relación (desviación = 0,475). Eso traduce la mezcla de la vertiente sulfatada (6) con soluciones cálcicas del salar.

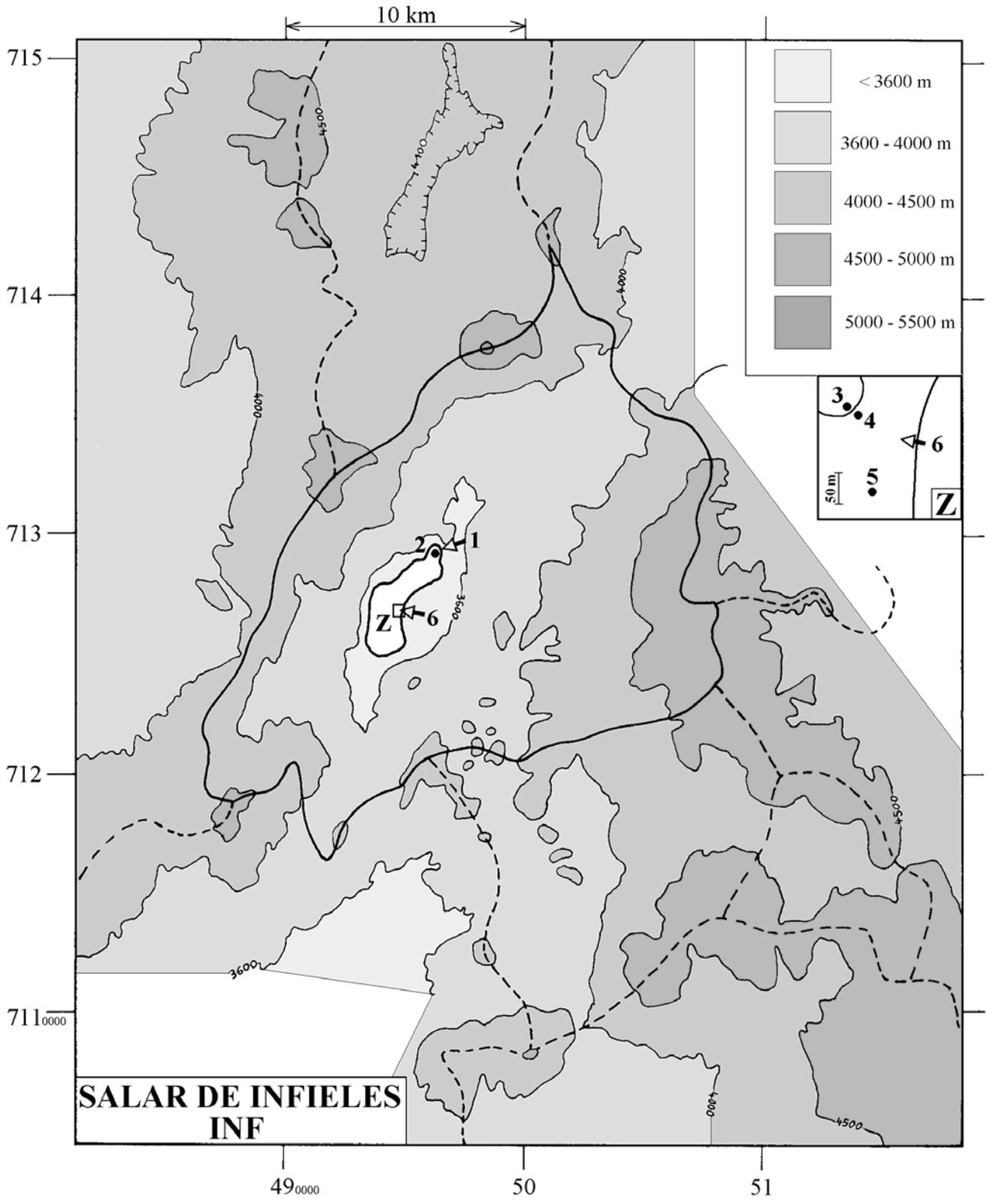
Calidad de aguas

Ninguna de las dos aguas de aporte cumple con las normas chilenas de potabilidad o de riego. La vertiente salobre (1) contiene 3 veces más de salinidad y 10 veces más arsénico que la norma de potabilidad y una cantidad de boro que no la hace adecuada para riego.

Conclusiones

El salar de Infielos no presenta potencialidades alentadoras como fuente de recursos de agua. No tiene casi ningún agua superficial, y su alimentación se hace por vertientes difusas salobres o saladas a lo largo de su orilla oriental. La salinidad elevada de los aportes se debe probablemente a la redisolución de antiguas evaporitas por debajo de las formaciones volcánicas. Cuenca arriba, las napas podrían también estar afectadas por esta contaminación. El interés de este salar reside en la anomalía que constituye la composición cálcica de sus salmueras en un ambiente volcánico desprovisto de terrenos sedimentarios.

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



**SALAR DE INFIELES
INF**

SALAR DE INFIELES
INF

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
INF-1	06/11/95	14 ^H 50	496636	7129310	3520	Manantial difuso
INF-2	06/11/95	15 ^H 15	496615	7129310	3520	Laguna
INF-3	06/11/95	15 ^H 30	495022	7127106	3520	Laguna
INF-4	06/11/95	16 ^H 00	495031	7127101	3520	Poza de preconcentración
INF-5	06/11/95	16 ^H 30	495050	7126976	3520	Poza de preconcentración
INF-6	06/11/95	17 ^H 00	495128	7127053	3520	Manantial difuso

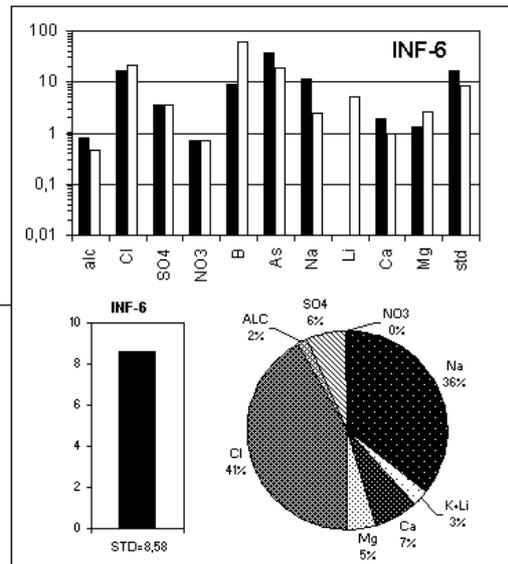
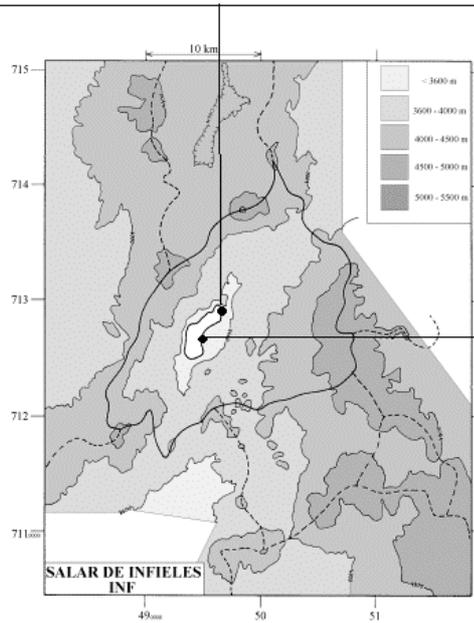
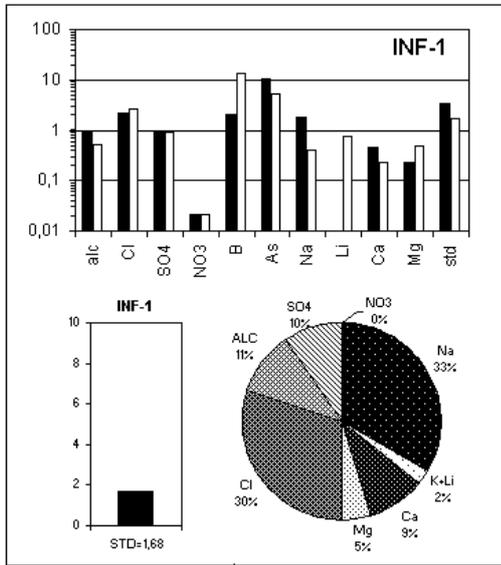
NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
INF-1	1820	23,5	5,8	1,001	7,90	5,23	543	0,497	0,303	227	0,905	10,2	42,3	0,54	370	34,3	1,87	93,4	29,2
INF-2	10800	21,7	5,6	1,010	8,02	3,97	5040	3,26	0,782	2920	0,136	72,2	55,7	3,85	3080	267	16,0	698	309
INF-3	200000	19	0,3	1,209	6,66	19,2	197000	20,0	17,9	1290	454	939	17,6	47,0	92000	9580	530	5650	10400
INF-4	67400	19,4	4,1	1,055	7,70	8,88	43700	7,73	3,91	3460	163	348	34,7	19,4	19800	2170	126	2920	2480
INF-5	17800	18	5,0	1,015	7,92	3,64	9940	2,23	1,54	2520	72,5	96,2	39,8	5,50	5110	528	31,2	1170	457
INF-6	8100	15,5	4,5	1,006	7,50	4,49	4220	1,53	0,850	875	31,6	44,8	36,7	1,90	2280	244	12,9	385	163

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	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
INF-1	1677	307	3,66	5,3	24,31	25,27	3,9	INF-1	-2,17	-43
INF-2	12710	184	7,32	2,1	203,3	206,8	1,7	INF-2	na	na
INF-3	318743	-	-	-	5457	5593	2,5	INF-3	na	na
INF-4	75700	276	19,5	6,2	1283	1314	2,4	INF-4	na	na
INF-5	20199	159	6,36	2,3	336,0	337,4	0,4	INF-5	na	na
INF-6	8575	263	2,04	11	139,8	142,2	1,8	INF-6	-3,37	-51

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

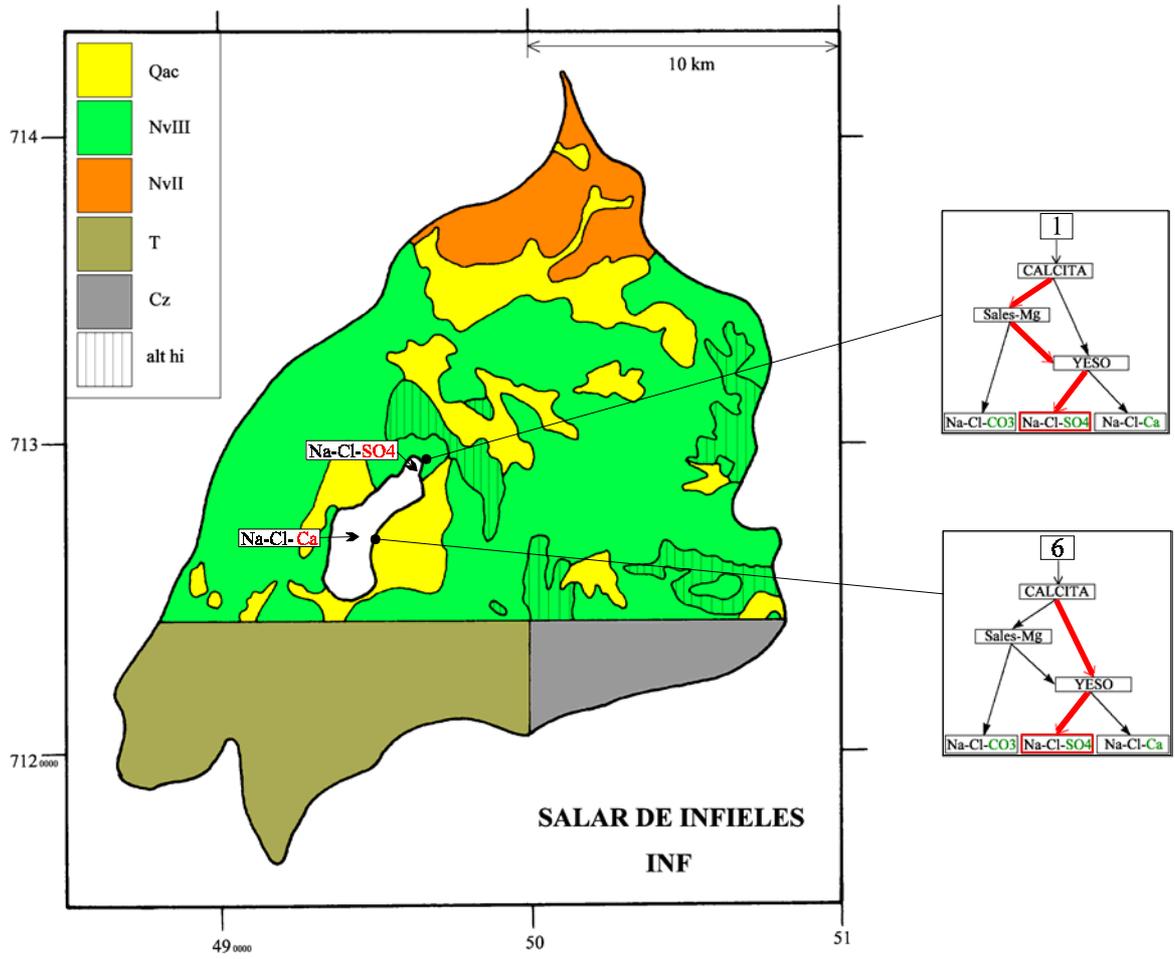
Análisis de oxígeno-18
y deuterio



MAPA GEOLOGICO Y VIAS EVOLUTIVAS

INF

- Qac** : *Cuaternario*. Depósitos aluviales y coluviales: bloques, gravas y arenas con cenizas, arcillas y sales.
- NvIII** : *Mioceno medio - Mioceno sup.* Conjunto volcánico III: estrato-volcanes mediana a debilmente erosionados. Andesitas de dos piroxenos, andesitas basálticas de olivino y piroxeno. Escasas dacitas de hornblenda y biotita.
- NvII** : *Mioceno inf. - Mioceno medio.* Conjunto volcánico II: estrato-volcanes medianamente erosionados. Andesitas de piroxenos y daciandesitas de hornblenda.
- T** : *Terciario*. Coladas, brechas y tobas andesíticas a riolíticas.
- Cz** : *Cenozoico*. Rocas volcánicas: dacitas - andesitas.
- alt hi** : alteración hidrotermal.



SALAR DE PEDERNALES

Introducción

La cuenca del salar de Pedernales es la cuenca cerrada más extensa de la III Región. El salar mismo es también el más grande de esta región. Como ocurre con todas las grandes cuencas, esta se caracteriza por importantes variaciones morfológicas, climatológicas y geológicas. La geología de la cuenca es una mezcla de terrenos sedimentarios, de formaciones volcánicas y de rocas plutónicas. El salar es una costra de yeso y halita con pocas y pequeñas lagunas generalmente pegadas a las orillas. Las lagunas al nor-este son profundas “ojos” en la costra de sal. Las demás son superficiales. Alvarez (1984) presentó un estudio del salar mediante imágenes Landsat. Las principales características morfométricas y climatológicas del salar son:

- altura de salar: 3370 m
- superficie de la cuenca: 3620 km²
- superficie del salar: 335 km²
- superficie de las lagunas: 0,6 km²
- precipitaciones: 100 mm/año (salar) - 150 mm/año (cuenca oriental)
- evaporación potencial: 1200 mm/año (salar)
- temperatura media: 4°C (salar)

La cuenca de Pedernales es la fuente de abastecimiento en agua para la división Salvador de CODELCO-Chile. La empresa bombea aguas salobres de napas cerca del salar y capta aguas diluidas en sectores altos de la cuenca. El salar se encuentra pegado al límite occidental de la cuenca. En su extremo nor-oeste, unos 200 metros solamente lo separan de la cuenca del río Salado, el que escurre hacia el Pacífico que es su nivel de base. En la década de los '30, se perforó un túnel por el cual se vierte salmuera desde el salar a este río; por lo tanto, estrictamente hablando, la cuenca de Pedernales ya no es una cuenca cerrada desde hace 60 años. El caudal en esa salida (PUN-19) fue medido en 51 l/s el 13 de noviembre de 1995.

Composición de las aguas

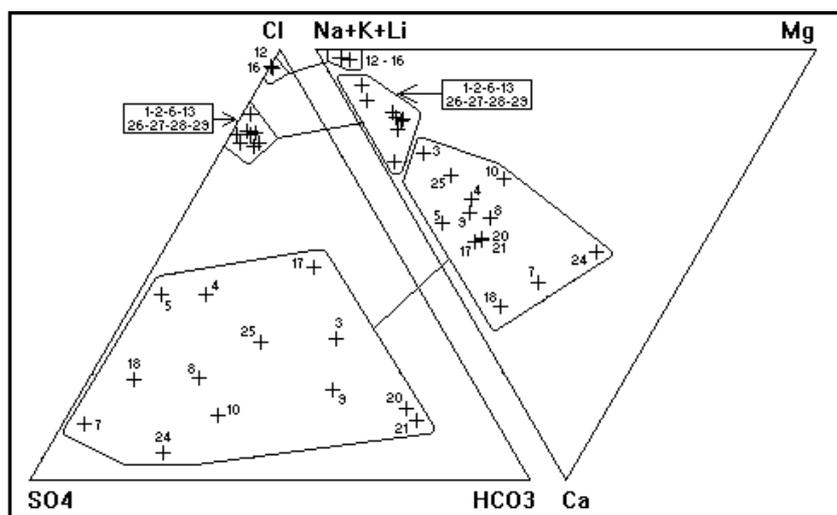


Fig.1 : Composición de las aguas de aporte al salar de Pedernales.

Presentamos la composición de las aguas de Pedernales en la figura 1 y en la tabla 1.

	<u>SALINIDAD</u> (mg/l)	<u>TIPO QUÍMICO</u>		<u>VÍA EVOLUTIVA</u>
		CATIONES	ANIONES	
<u>APORTES DILUIDOS</u>				
PED-9	84.9	Na-Ca- (Mg)	/ HCO ₃ -SO ₄ - (Cl)	CO ₃
PED-20	147.4	Na-Ca- (Mg)	/ HCO ₃ - (Cl) - (SO ₄)	CO ₃
PED-21	151	Na-Ca- (Mg)	/ HCO ₃ - (SO ₄) - (Cl)	CO ₃
PED-8	173.3	Na-Ca- (Mg)	/ SO ₄ - (Cl) - (HCO ₃)	SO ₄ (N)
PED-25	205	Na-Ca- (Mg)	/ SO ₄ -Cl-HCO ₃	SO ₄ (A)
PED-18	457.4	Ca-Na- (Mg)	/ SO ₄ - (Cl) - (HCO ₃)	SO ₄ (N)
PED-24	510.1	Ca-Mg- (Na)	/ SO ₄ - (HCO ₃) - (Cl)	SO ₄ (N)
PED-3	656.5	Na- (Ca) - (Mg)	/ HCO ₃ -Cl- (SO ₄)	CO ₃
PED-17	746.4	Na-Ca- (Mg)	/ Cl-HCO ₃ - (SO ₄)	SO ₄ (N)
PED-5	1023	Na-Ca- (Mg)	/ SO ₄ -Cl	SO ₄ (N)
PED-7	1104	Ca-Na- (Mg)	/ SO ₄ - (Cl)	SO ₄ (N)
PED-4	1354	Na-Ca- (Mg)	/ SO ₄ -Cl- (HCO ₃)	SO ₄ (N)
PED-10	1442	Na-Ca- (Mg)	/ SO ₄ -HCO ₃ - (Cl)	SO ₄ (N)
<u>APORTES SALOBRES</u>				
PED-1	2230	Na-Ca	/ Cl- (SO ₄)	Ca
PED-2	2393	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl- (SO ₄) - (HCO ₃)	SO ₄ (N)
PED-27	2651	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl- (SO ₄) - (HCO ₃)	SO ₄ (N)
PED-26	2672	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl- (SO ₄)	SO ₄ (N)
PED-29	2685	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl- (SO ₄)	SO ₄ (N)
PED-28	3084	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl- (SO ₄)	SO ₄ (N)
PED-13	3208	Na- (Ca)	/ Cl- (SO ₄)	SO ₄ (N)
PED-6	4366	Na- (Ca)	/ Cl- (SO ₄)	SO ₄ (N)
<u>APORTES SALADOS</u>				
PED-16	15175	Na- (Mg)	/ Cl	SO ₄ (N)
PED-12	79743	Na	/ Cl	SO ₄ (N)
<u>SALMUERAS</u>				
PED-22A	10761	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl	Ca
PED-22	30800	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl	Ca
PED-23	62287	Na- (Mg)	/ Cl	SO ₄
PED-14	115753	Na	/ Cl- (SO ₄)	SO ₄
PED-11	220834	Na	/ Cl	SO ₄
PED-19	321617	Na	/ Cl	SO ₄
PED-15	326744	Na	/ Cl	SO ₄

Tabla 1: Salinidades, tipos químicos y vías evolutivas de las aguas del salar de Pedernales: CO₃ = vía carbonatada ; SO₄ (A) = vía alcalina sulfatada
SO₄ (N) = vía neutra sulfatada ; Ca = vía cálcica.

Se observa en la figura 1 la existencia de tres grupos de aguas de aporte bien diferenciados :

- aguas cuyos puntos se encuentran diseminados en la mitad inferior del triángulo de aniones, es decir donde dominan SO_4 o HCO_3 sobre Cl. Se nota en el triángulo de cationes que son las aguas que más calcio tienen.

- aguas cuyos puntos se encuentran agrupados más cerca del vertice de cloruro. Tienen más sodio y menos calcio que las aguas del grupo anterior.

- dos aguas muy cercas de los vertices Cl y Na.

Los tres grupos de agua de aporte se relacionan rigurosamente con las salinidades como se puede ver en la tabla 1. El primer grupo, donde predominan SO_4 o HCO_3 , corresponde a aguas diluidas o levemente salobres (85 - 1442 mg/l STD); el segundo grupo, más clorurado, esta constituido de aguas salobres (2230 - 4366 mg/l); las dos aguas con Na y Cl dominantes son saladas (15 000 - 79700 mg/l). Geograficamente las aguas diluidas del primer grupo se ubican en sectores elevados del sur y del oeste de la cuenca, con excepción de la vertiente (18) que se encuentra en la cuenca pacífica colindante. Hemos muestreado esta vertiente por estar muy cerca del límite de cuenca y provenir de una napa que debe también alimentar el salar por el norte (ver el mapa de ubicación). Además, no se encontró ninguna vertiente fluyente en este sector de la cuenca misma del salar. Las aguas salobres se encuentran más cerca del salar con la notable excepción del río Juncal (2) y una vertiente termal (1) en uno de sus afluentes.

Las salmueras más concentradas son de tipo Na / Cl con SO_4 superior a Ca. Pertenecen a la vía evolutiva sulfatada. Pero existen dos aguas de laguna al sur-oeste del salar (22a y 22) que son de tipo Na-(Ca)-(Mg) / Cl y que pertenecen a la vía cálcica.

Origen de las sales disueltas

La figura 2 muestra las relaciones Na versus Cl y Ca versus SO_4 .

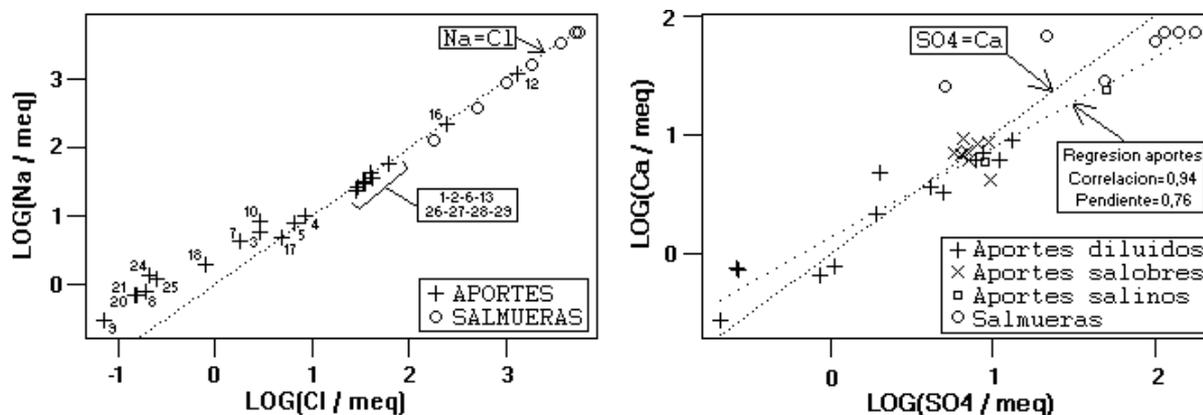


Fig.2 : Relaciones Na/Cl y Ca/ SO_4 en las aguas y salmueras del salar de Pedernales.

Se observa en la relación Na/Cl que a partir de la concentración en Cl de PED-17 (173 mg/l) los puntos representativos de las aguas de aporte se alinean a lo largo de la recta equimolar Na = Cl. Se repite la misma distribución que en los diagramas triangulares. Las aguas de aporte salobres y saladas se encuentran muy cerca de la recta equimolar. Eso indica una importante contribución de cloruro de sodio en las aguas salobres por redisolución de halita (NaCl) o de salmueras de tipo Na/Cl. Las aguas diluidas cuyos puntos se encuentran por encima de la recta equimolar deben probablemente su composición química a la alteración de rocas de la cuenca de drenaje.

La relación Ca/SO₄ es más difícil de interpretar. La mayoría de los aportes diluidos (9 sobre 13) se encuentran cerca de la recta equimolar Ca = SO₄. Es posible que se trate de una coincidencia, pero no se puede descartar una contribución, aun leve, del yeso (CaSO₄·2H₂O) en la composición de las aguas diluidas. Es difícil atribuir este (hipotético) yeso a antiguas evaporitas, pues las aguas afectadas son muy diluidas, como por ejemplo PED-9 con 85 mg/l STD. Se puede adelantar la hipótesis de un origen eólico del yeso. Los vientos dominantes soplan del oeste. La cuenca de Pedernales colinda con las cuencas del Valle Central donde abunda el yeso en antiguas costras de sales, en particular en los yacimientos salitreros. En este caso debería también observarse una contaminación de aguas diluidas en nitrato. Es efectivamente lo que ocurre, como se puede apreciar en la figura 3. Las concentraciones porcentuales más altas en NO₃ se observan en las aguas más diluidas (ver también el cuadro de análisis). Parece entonces que los aportes eólicos proveen parte de los componentes disueltos en las aguas más diluidas de Pedernales. La concentración relativa en NO₃ baja cuando aumenta la salinidad, lo que refleja la uniformidad de los aportes eólicos en toda la cuenca. Si NO₃ es constante, entonces la razón NO₃ / STD tiene que bajar cuando STD aumenta.

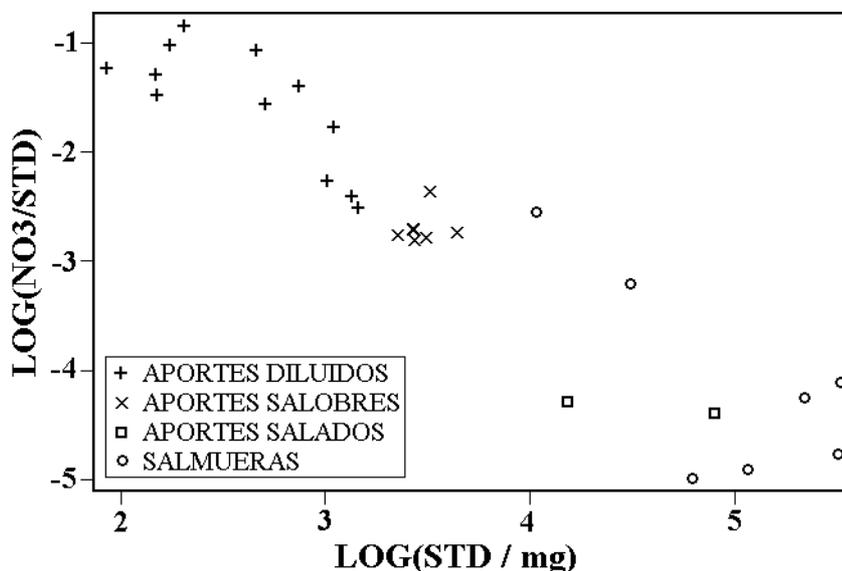


Fig.3 : Concentraciones de NO₃ relativas a la salinidad en las aguas de Pedernales.

Hasta aquí hemos solamente tratado de la relación Ca/SO₄ en las aguas de aporte diluidas. En lo que se refiere a los aportes salobres, se puede observar en la figura 2 que sus puntos se amontonan cerca de la recta equimolar, en particular las aguas de napa (26, 28 y 29), en la orilla sur del salar. En estos casos, puesto que las concentraciones son más elevadas, es muy probable que se trata de la redisolución de yeso de antiguas evaporitas. Ya hemos visto que había una contribución de halita en la composición de las aguas salobres. Es muy común que haya yeso asociado a la halita.

Las dos aguas saladas PED-16 (15 g/l) y PED-12 (79 g/l) son muy similares a las salmueras. La figura 4 muestra por ejemplo la relación porcentual del litio (el componente más conservativo) en todas las aguas de Pedernales.

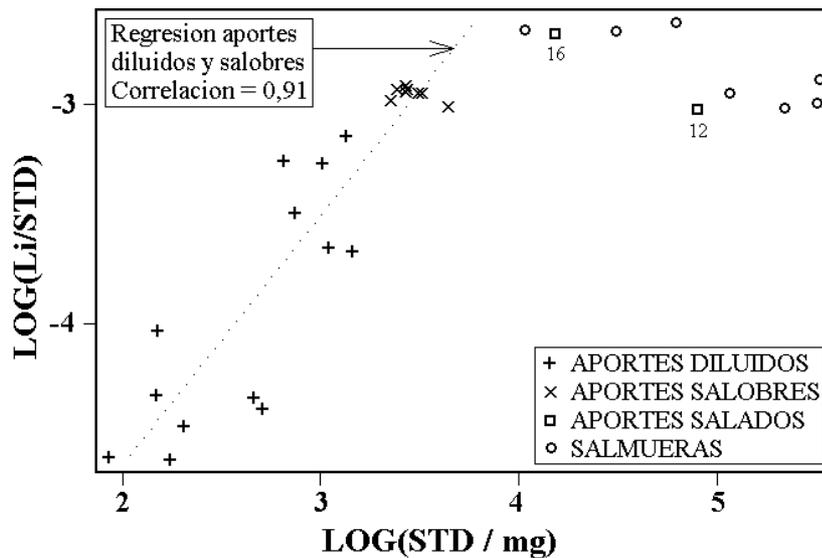


Fig.4 : Concentraciones de Li relativas a la salinidad en las aguas de Pedernales.

Se nota que los dos aportes salados tienen las mismas composiciones relativas en Li que las salmueras del salar. Podría entonces tratarse de cuñas salinas lixiviadas hacia el salar.

Vías evolutivas y relación con la geología

Las vías evolutivas están indicadas en la tabla 1 y en el mapa geológico. Cuatro aportes diluidos (9, 20, 21 y 3), asociados a rocas volcánicas, siguen la vía carbonatada cuando se evaporan. Esta buena adecuación a la geología indica que los componentes disueltos en estas aguas provienen en su mayor parte de la alteración de las rocas volcánicas. Las demás aguas diluidas siguen todas la vía neutra sulfatada, con excepción de PED-25 que sigue la vía alcalina sulfatada. La vía neutra sulfatada refleja terrenos sedimentarios o volcánicos con azufre. Formaciones sedimentarias existen en la cuenca de Pedernales (ver mapa geológico) y varias aguas de aporte diluidas de vía sulfatada están asociadas con ellas (4, 7, 10, 18, 25). Pero también hay aguas diluidas asociadas con rocas volcánicas, sin notable azufre, que siguen la vía neutra sulfatada, como por ejemplo PED-8 ubicada muy cerca de PED-9 de vía carbonatada. En tales casos, la vía neutra sulfatada podría reflejar el supuesto aporte de yeso eólico. Un adición de sulfato de calcio en un agua aumenta su concentración en calcio sin cambiar la de los carbonatos. Si el agua es muy diluida, poco calcio adicional puede ser suficiente para revertir la razón CO_3 / Ca y pasar a una vía evolutiva sulfatada.

Los aportes salobres siguen casi todos la vía neutra sulfatada, lo que es normal puesto que estas aguas han redissuelto yeso de antiguas evaporitas en formaciones más profundas de la cuenca. Estas aguas no reflejan la geología superficial de la cuenca. La vertiente termal PED-1 es la sola agua que sigue la vía neutra cálcica. No tiene influencia sobre las napas río abajo puesto que se vierte en el río Juncal.

Evolución cuantitativa de aguas

Veamos ahora la evolución cuantitativa de las aguas de aporte cuando se evaporan. La tabla 2 presenta la composición calculada de todas las aguas de aporte evaporadas por simulación

computacional hasta la salinidad de la salmuera subterránea PED-19 vertida por el túnel afuera del salar. Las demás aguas de lagunas presentan características similares. 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 (PED-xxE) y PED-19.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
PED-19	7,25	6,60	192000	4760	365	2,07	115000	4180	326	1200	2840	
PED-6E	7,38	4,82	168000	10300	657	6,89	104000	4630	332	940	2990	0,212
PED-28E	6,94	4,64	180000	9740	1110	5,84	101000	7610	427	841	7140	0,370
PED-2E	6,84	3,82	165000	10400	1340	7,05	95400	7240	431	940	5060	0,385
PED-29E	6,96	4,56	172000	11100	1140	6,41	98400	7040	436	815	6360	0,387
PED-26E	6,97	4,46	171000	13000	1130	6,45	99700	6990	450	717	5890	0,409
PED-13E	7,58	6,82	165000	22600	620	6,86	106000	6600	415	488	3600	0,418
PED-27E	7,03	4,60	163000	23700	1090	6,79	101000	6730	424	457	5850	0,552
PED-5E	7,31	6,23	154000	24700	861	7,52	93400	8830	369	502	6600	0,571
PED-17E	6,96	6,55	150000	26800	1470	8,64	95800	3410	157	626	10900	0,730
PED-1E	6,20	2,15	180000	957	1820	6,52	96700	8730	413	9030	2180	0,763
PED-4E	7,35	9,45	164000	36400	667	5,99	80100	14200	518	311	18300	0,873
PED-18E	7,53	7,67	71600	49100	573	12,8	74300	11100	50,5	768	13000	1,080
PED-7E	7,35	11,3	74100	135000	636	9,88	36500	11500	142	289	40300	1,330
PED-25E	7,60	19,4	36500	60600	1540	16,2	64900	17600	28,3	843	11400	1,490
PED-3E	10,1	1110	130000	24200	857	34,0	112000	14200	462	0,219	0,934	1,510
PED-8E	7,55	10,1	37000	94700	701	15,4	49300	26200	22,5	605	19800	1,630
PED-10E	7,48	18,3	68900	143000	1160	10,9	34300	30300	205	108	32600	1,660
PED-24E	7,51	6,88	12000	207000	325	13,3	28900	6010	33,0	381	43500	1,730
PED-21E	10,2	1440	58300	36300	858	42,5	91400	28600	154	0,343	1,02	1,830
PED-20E	10,1	1380	52800	33500	820	40,8	96900	18500	65,7	0,353	1,00	1,890
PED-9E	8,57	17,0	47800	58000	627	20,5	63700	51900	40,1	91,2	161	1,910

Tabla 2 : Comparación de las aguas de aporte evaporadas con la salmuera subterránea PED-19 del salar de Pedernales. El espacio entre 27E y 5E separa las aguas salobres evaporadas (6E - 27E) de las aguas diluidas (5E - 9E) evaporadas. ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

Se observa que las aguas evaporadas que mejor se asemejan a la salmuera del salar son las aguas de aporte salobres, y en particular la vertiente PED-6. Los coeficientes de desviación no son excelentes, pero las aguas diluidas evaporadas se alejan mucho más de la salmuera. Si se compara en detalle las concentraciones de PED-6 con las de la salmuera 19, se nota que el componente mayor que más discrepa es el sulfato. Si no fuera por el, el coeficiente de desviación estaría mucho más bajo. La principal fuente de alimentación en sales del salar proviene de napas cerca de las orillas sur y este del salar, ellas mismas alimentadas por aportes del sector oriental de la cuenca (río Juncal). Las aguas diluidas del sur y del oeste de la cuenca no contribuyen de manera significativa a los aportes en sales del salar. Pero las aguas diluidas pueden mezclarse con aguas salobres del este de la cuenca sin modificar notablemente la composición química de estas últimas.

Datos isotópicos

En la figura 5 está representada la relación entre $\delta^{18}\text{O} \text{ ‰}$ y $\delta^2\text{H} \text{ ‰}$ de las aguas de aporte. 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 puntos se disponen por debajo de la recta meteórica y paralelamente a ella. Dos puntos se diferencian :

- PED-10 es netamente más enriquecida en ^{18}O y ^2H . Tratándose de una vertiente difusa, este enriquecimiento podría reflejar la evaporación del agua al fluir muy lentamente. Se puede observar en el mapa de ubicación y en la tabla de análisis que PED-10 es el agua más salobre (1400 mg/l) de las que se ubican más arriba en la cuenca. Las demás tienen salinidades comprendidas entre 85 mg/l (PED-9) y 510 mg/l.

- PED-20 se encuentra casi encima de la recta meteórica. Esta agua de napa es muy similar en *todos* sus parámetros físico-químicos a la vecina agua de napa PED-21. Obviamente se trata de la misma napa. La gran diferencia entre las composiciones isotópicas de las dos muestras no se explica.

Seguimos entonces la discusión sin tomar en cuenta estos dos puntos. No se observa ninguna correlación entre la salinidad y la composición isotópica de las aguas diluidas y salobres (excluyendo las aguas saladas 12 y 16). La distribución de los puntos no corresponde entonces a una línea de evaporación. No se diferencian las aguas diluidas de las aguas salobres por su composición isotópica.

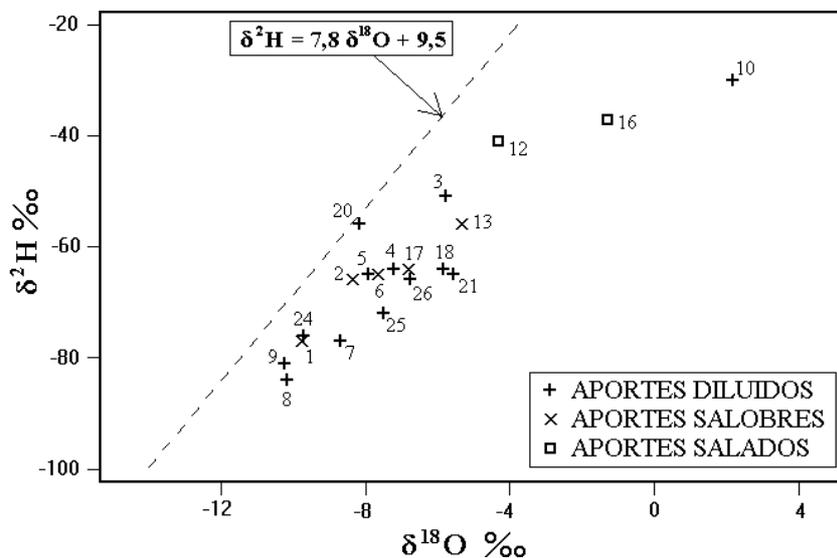


Fig.5 : Composición isotópica $\delta^2\text{H}$ versus $\delta^{18}\text{O}$ de las aguas de aporte al salar de Pedernales.

Podría tratarse de una línea de mezcla de dos tipos de aguas cuyos polos se encontrarían a los dos extremos de la línea de puntos. Las napas diluidas del sector sur-oeste de la cuenca (8, 9, 24, 25) podrían representar el polo diluido, pues son las menos concentradas en isotopos pesados. El polo pesado estaría representado por las vertientes saladas (12) y (16). Sin embargo, este modelo es muy difícil de interpretar hidrogeológicamente y es del todo inconsistente con los resultados hidroquímicos. Las aguas saladas (12) y (16) se encuentran 1000 m más abajo que las napas del sur y arinconadas al norte de la cuenca. Además, hemos vistos que son cuñas salinas del salar lentamente lixiviadas. Por otra parte, el estudio hidroquímico sugiere que el salar es alimentado en sales por aguas que provienen del sector oriental de la cuenca, y que otras aguas mucho más diluidas bajan de los sectores sur y oeste. Si hubiera mezcla, ella ocurriría entre estos dos grupos de aguas, lo que justamente no se observa en las composiciones isotópicas.

Aguas tan diluidas como PED-9 (85 mg/l) son casi seguramente aguas de precipitación que han alterado rocas superficiales. PED-9 sigue la vía evolutiva carbonatada en un ambiente volcánico, lo que indica un origen atmosférico para HCO_3 . Como pueden entonces haberse enriquecido estas aguas en isótopos pesados? Una posible explicación es que las precipitaciones en la cuenca de Pedernales ocurren mayormente como nieves. La cubierta de nieve se evapora durante el día enriqueciéndose en isótopos pesados. En climas templados la condensación nocturna, compensa en gran parte este aumento. Pero en climas áridos como el del norte de Chile, la condensación es mínima. Entonces, el agua de nieve que se infiltra puede estar enriquecida en ^{18}O y ^2H . Este mecanismo puede dar cuenta de la similitud de las composiciones isotópicas de las aguas diluidas y de las aguas salobres. Las aguas salobres serían aguas diluidas que han redissuelto sales evaporíticas como NaCl , lo que no modifica su composición isotópica.

El aporte salado más concentrado (PED-12 con 79,7 g/l) tiene una composición isotópica más liviana que el aporte menos salado (PED-16 con 15,2 g/l). Sin embargo, los dos son más enriquecidos en ^{18}O y ^2H que las aguas de aporte diluidas y salobres (con la única excepción de la vertiente difusa PED-10). La hidroquímica sugiere que las dos vertientes difusas son salmueras (es decir aguas evaporadas) de la cuña salina mezcladas con aguas diluidas que fluyen hacia el salar. Además, tratándose de vertientes difusas, puede ocurrir cierta evaporación al escurrirse lentamente estas soluciones. Es obvio que la composición isotópica resultante no puede interpretarse de manera simple y directa.

Calidad de agua

Las seis aguas diluidas captadas por CODELCO - Salvador (8, 9, 20, 21, 24, 25) son las que tienen de lejos la mejor calidad para cualquier uso. La concentración de todos sus componentes es netamente por debajo de la norma chilena. Las demás aguas diluidas o levemente salobres (18, 3, 17, 5, 7, 4, 10) están justo al límite o sobrepasan levemente las normas en uno o dos componentes. Podrían ser aprovechadas, en particular mezclándolas con aguas de excelente calidad. Las aguas salobres no son aprovechables para uso doméstico o riego.

Balance salino

No disponemos de suficientes datos para establecer los balances hídricos de las lagunas someras de Pedernales. Además, las lagunas de la orilla nor-este no son someras, sino profundos “ojos” en la costra de sal. Las fórmulas del balance hídrico no se aplican en tal caso. Podemos hacer una tentativa para estimar el efecto del drenaje artificial de la salmuera del salar afuera de la cuenca.

	<u>Sector occidental</u>	<u>Sector oriental</u>
Concentración promedio de Cl (g/l) :	0,62	2,9
Superficie de la sub-cuenca (m^2) :	1600×10^6	1600×10^6
Altura de precipitación (m/año) :	0,1	0,15
Volumen de precipitación ($\text{m}^3/\text{año}$) :	160×10^6	240×10^6
Agua que entra al salar ($\text{m}^3/\text{año}$):	$160 \times 10^6 \times E$	$240 \times 10^6 \times E$
Cl que entra al salar (ton/año):	$99\ 200 \times E$	$696\ 000 \times E$

Hemos visto que hay dos tipos de aguas de aportes: aguas diluidas que se encuentran al sur y al oeste de la cuenca y aguas salobres que vienen del este de la cuenca. Utilizamos el cloruro como elemento conservativo. Con un caudal de 51 l/s y una concentración de 192 g/l de cloruro (PED-19), el flujo de Cl que sale del salar es de 9800 g/s o 309 000 ton/año. Veamos si los aportes pueden compensar esta perdida. El parámetro E es el coeficiente de escurrimiento, es decir el porcentaje de agua que entra en la parte superficial del salar en relación a la cantidad total de agua que cae sobre la cuenca. La cantidad total de cloruro que entra en la parte superficial del salar es $795\,200 \times E$ ton/año. Esta cantidad compensa las perdidas cuando $795\,200 \times E = 309\,000$, o sea para un coeficiente de escurrimiento *por lo menos* igual a 0,39. Es un valor muy elevado que si fuera real produciría un gran lago en Pedernales (El coeficiente de escurrimiento en la cuenca del lago Chungará es de 0,25). A pesar de las grandes imprecisiones del calculo, eso sugiere que el salar de Pedernales esta disolviendose lentamente. No es posible calcular su tasa de reducción. Por eso deberiamos disponer de estimaciones de las cantidades de halita y de salmuera presentes en el salar. Solamente se puede predecir que poco a poco los ojos se van a multiplicar y agrandar. Estas estimaciones pueden dar una gruesa idea de las proporciones relativas de agua y sales disueltas que entran por cada sub-cuenca del salar :

Sector:	<u>Occidental</u>	<u>Oriental</u>
Aguas	40 %	60%
Sales	12 %	88 %

Conclusiones

El salar de Pedernales recibe dos tipos de aguas :

- aguas diluidas de napas al sur y al oeste de la cuenca
- aguas salobres que provienen del sector oriental de la cuenca y entran al salar por sus orillas sur y este.

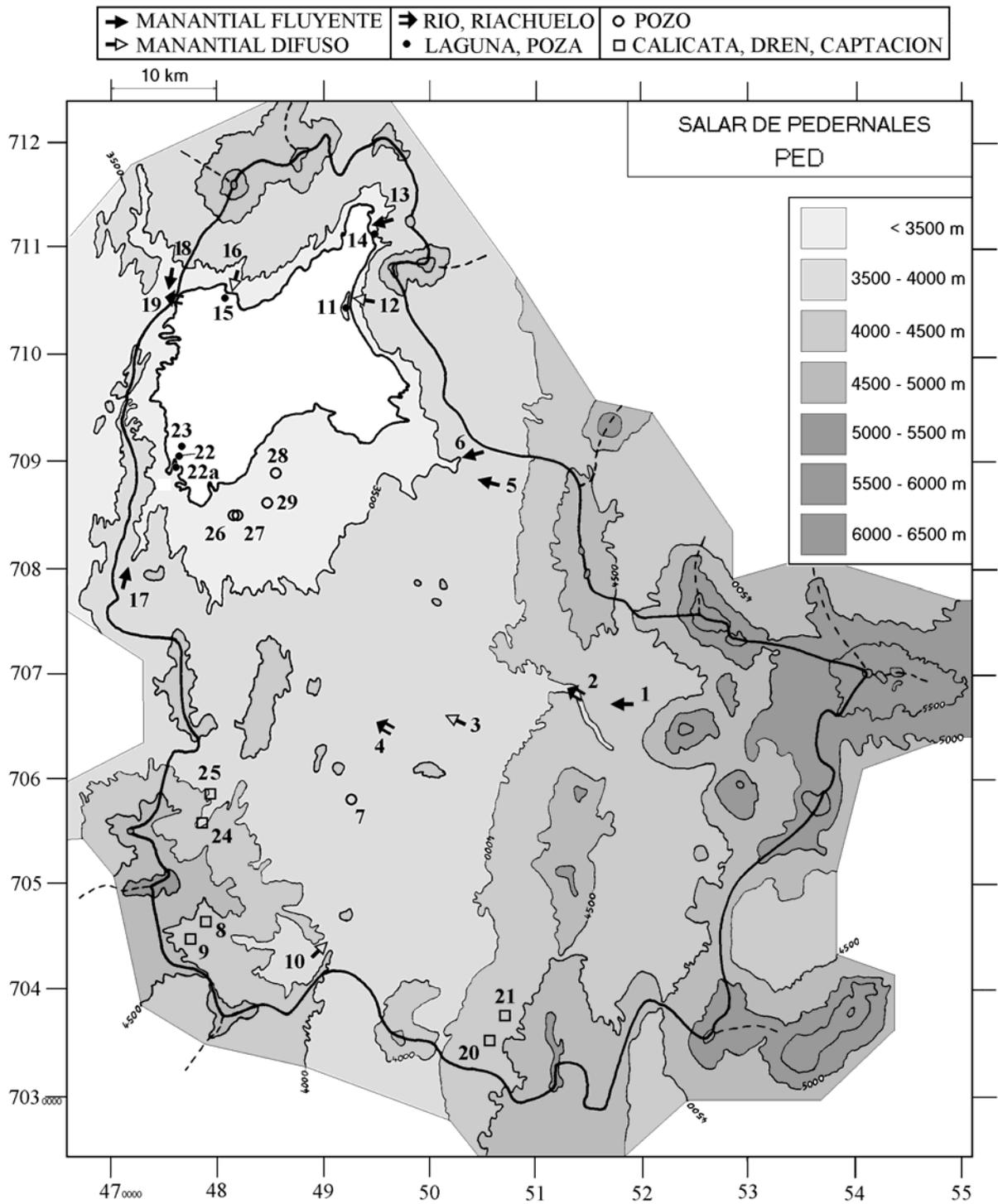
La salinidad elevada de las aguas de aporte salobres proviene de la redisolución de sales evaporíticos antiguos (halita y yeso). Se sospecha también un aporte de componentes eólicos en las aguas diluidas (SO_4 y NO_3). La mayor parte de las aguas diluidas y todas las salobres siguen la vía evolutiva sulfatada. La relación con la compleja geología no es evidente, y de todos modos no contempla las contribuciones por antiguas evaporitas o aportes eólicos.

La hidroquímica del salar está controlada por las aguas de aporte salobres que aportan más del 80 % de las sales disueltas. El río Juncal drena gran parte de las aguas del sector oriental; se infiltra cuenca abajo en una napa subterránea que alimenta el salar por su orilla sur.

Referencias y estudios anteriores

Alvarez, E. 1984. Exploración del salar de Pedernales (Atacama) mediante imágenes Lansat procesadas por computador. Rev. Geol. Chile, 21, 77-97.

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.



SALAR DE PEDERNALES
PED

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM ESTE NORTE	ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
PED-1	05/11/95	12 ^H 30	518123 7067954	4100	Manantial termal corriente
PED-2	05/11/95	15 ^H 00	513342 7068219	3990	Río Juncal
PED-3	05/11/95	15 ^H 50	501122 7065635	3710	Vegas de Leoncito
PED-4	05/11/95	16 ^H 50	495621 7065175	3650	Río La Ola (ojo)
PED-5	07/11/95	12 ^H 00	504811 7088897	3600	Manantial corriente
PED-6	07/11/95	13 ^H 00	503441 7090502	3505	Manantial corriente
PED-7	09/11/95	10 ^H 15	492399 7058042	3695	Napa (pozo proyecto Esperanza)
PED-8	09/11/95	12 ^H 00	479834 7045382	4070	Captación Pastos Largos Norte
PED-9	09/11/95	12 ^H 00	479834 7045382	4070	Captación Pastos Largos Oeste
PED-10	09/11/95	14 ^H 30	489661 7044247	3880	Manantial difuso
PED-11	10/11/95	13 ^H 00	492670 7104684	3370	Laguna
PED-12	10/11/95	13 ^H 30	492670 7104984	3370	Manantial difuso
PED-13	10/11/95	16 ^H 00	494380 7111854	3372	Manantial corriente
PED-14	10/11/95	16 ^H 30	494410 7112235	3370	Laguna
PED-15	10/11/95	18 ^H 00	480200 7106480	3370	Laguna
PED-16	10/11/95	18 ^H 15	480280 7106520	3370	Manantial difuso
PED-17	11/11/95	10 ^H 30	471907 7079280	3580	Manantial corriente
PED-18	11/11/95	13 ^H 00	475898 7107389	3400	Manantial corriente (Agua Helada)
PED-19	11/11/95	14 ^H 00	475695 7105224	3370	Napa tunel de drenaje
PED-20	15/11/95	11 ^H 00	505967 7035922	4200	Captación Tambarillo
PED-21	15/11/95	11 ^H 45	507018 7037207	4250	Captación Río Negro
PED-22A	17/11/95	11 ^H 00	475898 7090223	3370	Poza artificial evaporada
PED-22	17/11/95	12 ^H 00	476062 7090471	3370	Poza de preconcentración
PED-23	17/11/95	13 ^H 00	476486 7091498	3370	Poza de preconcentración
PED-24	19/11/95	10 ^H 00	478720 7056321	3990	Captación Potrero Grande
PED-25	19/11/95	11 ^H 00	478780 7058971	4000	Captación Tordillo
PED-26	19/11/95	15 ^H 30	482138 7085063	3380	Napa (pozos Codelco 5, 6, 7)
PED-27	19/11/95	16 ^H 00	482378 7085031	3380	Napa (pozo Codelco 6)
PED-28	19/11/95	16 ^H 30	485662 7088776	3380	Napa (pozo Codelco B1)
PED-29	19/11/95	17 ^H 00	485030 7086110	3390	Napa (pozo Codelco B2)

**SALAR DE PEDERNALES
PED**

NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
PED-1	2190	40,2	4,5	1,001	7,66	0,528	1000	1,78	0,136	311	3,88	11,6	65,5	1,02	547	48,9	2,31	188	12,2
PED-2	2500	19,7	na	1,002	8,40	2,57	1060	0,999	0,109	275	nd	10,1	41,4	0,951	623	46,9	2,80	143	32,8
PED-3	537	21,3	na	1,000	8,60	3,93	102	0,089	0,110	92,6	nd	1,46	29,1	0,216	130	11,1	0,361	43,7	10,6
PED-4	1170	21,6	na	1,001	8,16	2,77	306	0,201	0,170	419	5,35	1,24	25,2	0,0720	225	26,5	0,965	143	34,3
PED-5	913	12,8	4,5	1,001	7,52	0,718	228	0,037	0,0173	381	5,59	1,59	26,1	0,116	183	13,1	0,548	125	9,84
PED-6	4430	16	5,0	1,003	7,88	1,33	2170	0,487	0,0817	455	7,94	9,18	35,8	0,440	1330	59,4	4,27	172	38,4
PED-7	867	10,2	na	1,000	7,26	0,683	64,3	0,074	0,0585	636	18,5	0,551	18,4	0,0057	100	10,0	0,243	179	35,2
PED-8	140	6,7	7,4	1,000	7,61	0,436	6,85	nd	0,0133	51,2	16,6	0,130	22,3	0,0055	18,1	4,85	0,004	15,7	3,69
PED-9	58,5	7,2	7,2	1,000	7,28	0,363	2,49	0,004	0,0095	9,98	4,98	0,087	21,6	0,0067	6,97	2,70	0,002	5,69	1,07
PED-10	975	22,6	4,4	1,001	7,85	6,08	103	0,129	0,193	527	4,45	1,73	12,0	0,408	192	47,7	0,305	124	55,9
PED-11	200000	19,3	1,9	1,146	7,50	8,74	129000	15,0	1,62	6610	12,5	321	29,1	17,0	78000	2580	213	1440	1880
PED-12	76000	9,9	0,6	1,054	7,40	4,79	46500	5,45	0,948	2370	3,27	122	26,7	6,00	28300	895	75,6	481	673
PED-13	3210	11,7	5,0	1,002	8,05	1,55	1430	0,196	0,0892	461	13,8	5,90	38,1	0,638	982	57,1	3,59	84,6	31,1
PED-14	107000	24,1	3,6	1,080	8,10	7,78	63500	4,02	1,99	8300	1,42	169	46,2	12,0	38900	1830	130	1480	892
PED-15	200000	16,5	0,4	1,206	7,20	6,53	193000	7,71	0,633	5500	25,7	317	10,9	5,70	117000	5200	423	1470	3300
PED-16	13600	13	8,1	1,011	9,15	1,67	8700	0,695	0,319	430	0,794	23,7	31,4	0,0455	5130	426	31,6	119	182
PED-17	660	4,8	0,5	1,000	7,40	3,47	173	0,449	0,306	95,5	29,7	2,02	8,76	0,0121	111	3,95	0,236	97,4	12,6
PED-18	382	8,9	7,3	1,000	7,77	0,560	28,4	0,054	0,0411	198	38,9	0,227	25,6	0,0100	43,2	4,38	0,021	72,2	5,20
PED-19	200000	9	1,2	1,206	7,25	6,60	192000	14,7	0,863	4760	5,46	365	2,07	6,78	115000	4180	326	1200	2840
PED-20	106	9,3	7,0	1,000	8,56	1,11	5,57	0,013	0,0133	13,1	7,44	0,249	12,0	0,0240	16,2	1,96	0,007	15,0	2,31
PED-21	109	8,7	6,8	1,000	8,36	1,18	5,25	0,011	0,0123	12,8	4,98	0,238	13,4	0,0180	16,1	2,58	0,014	15,2	2,38
PED-22A	10200	11	9,2	1,008	7,18	3,83	6210	2,83	1,19	245	30,6	15,6	21,6	0,103	3040	175	23,3	505	253
PED-22	24600	23	6,8	1,022	7,71	3,12	18100	7,72	1,59	1040	19,2	49,0	28,8	0,330	8740	477	66,5	1350	731
PED-23	53500	19,7	4,3	1,043	8,07	7,77	35900	9,19	0,840	2300	0,645	166	26,9	5,40	20100	1660	148	565	979
PED-24	393	7,6	6,5	1,000	7,51	1,66	7,60	na	0,0199	235	13,8	0,205	17,8	0,0350	30,6	3,79	0,021	65,8	27,7
PED-25	161	9	6,8	1,000	7,75	0,683	8,95	0,022	0,0547	41,3	29,6	0,378	27,3	0,0100	28,1	4,30	0,007	13,3	3,47
PED-26	2600	9,7	na	1,002	7,64	2,13	1250	0,959	0,0846	305	5,24	9,46	30,2	0,691	711	50,4	3,25	135	42,5
PED-27	2660	7,6	na	1,002	8,80	2,60	1180	0,943	0,0868	341	5,33	9,30	30,2	0,624	711	48,1	3,03	125	41,8
PED-28	3120	10,2	na	1,002	7,85	1,58	1450	1,25	0,0994	387	5,10	10,3	27,7	0,588	817	61,4	3,44	166	57,6
PED-29	2680	8	na	1,002	7,00	1,70	1260	1,03	0,0917	334	4,23	9,53	28,8	0,0801	699	50,8	3,15	145	45,9

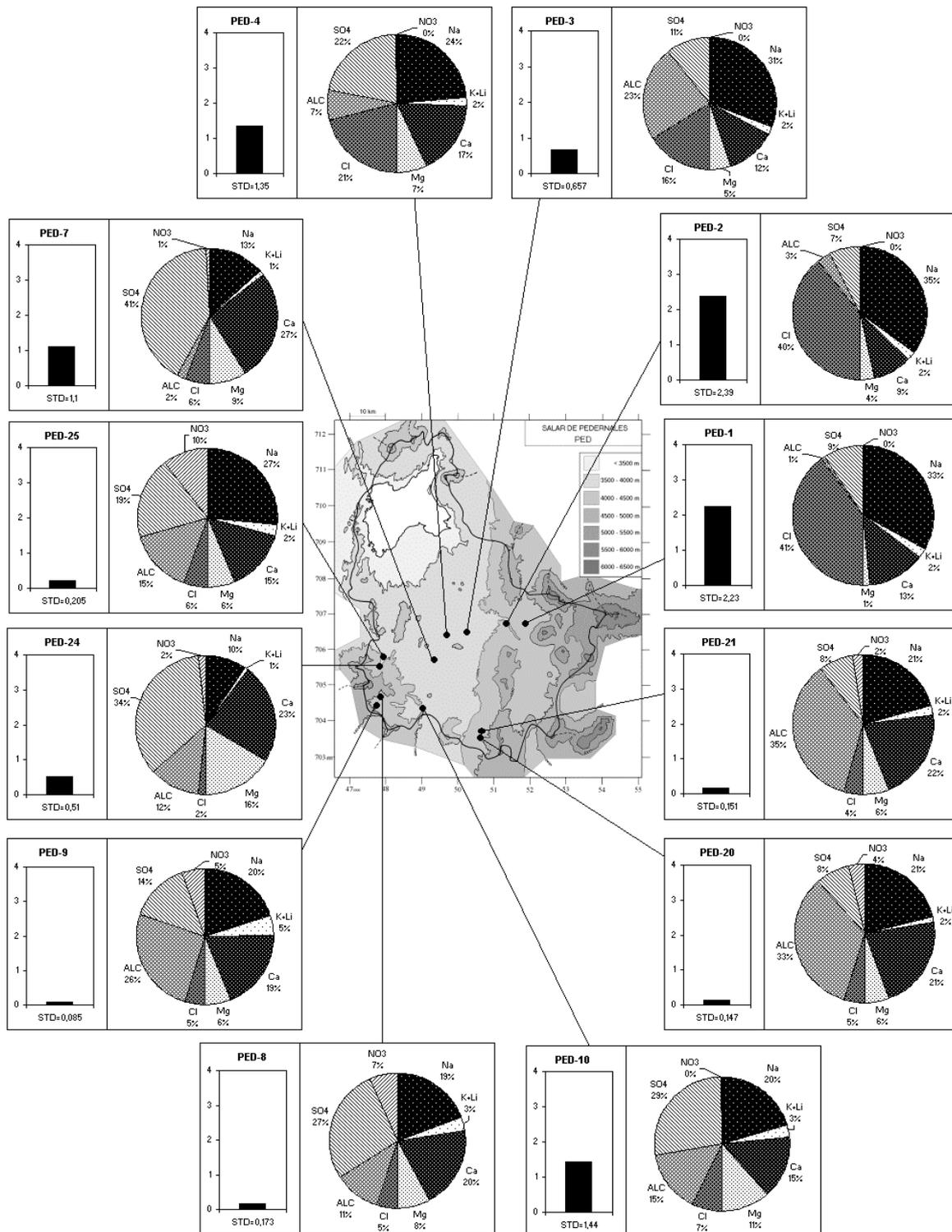
T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l.
CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

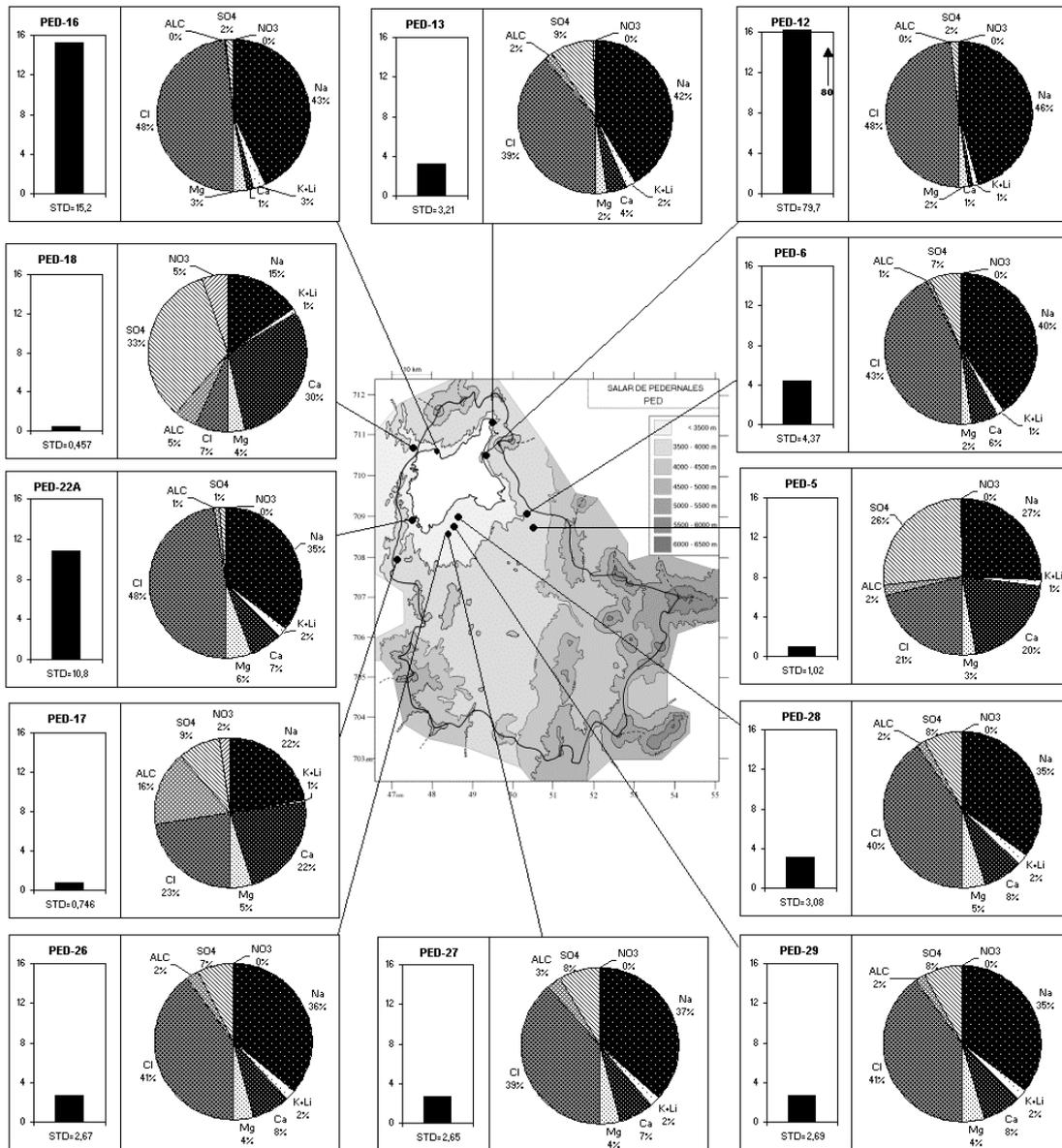
SALAR DE PEDERNALES
PED

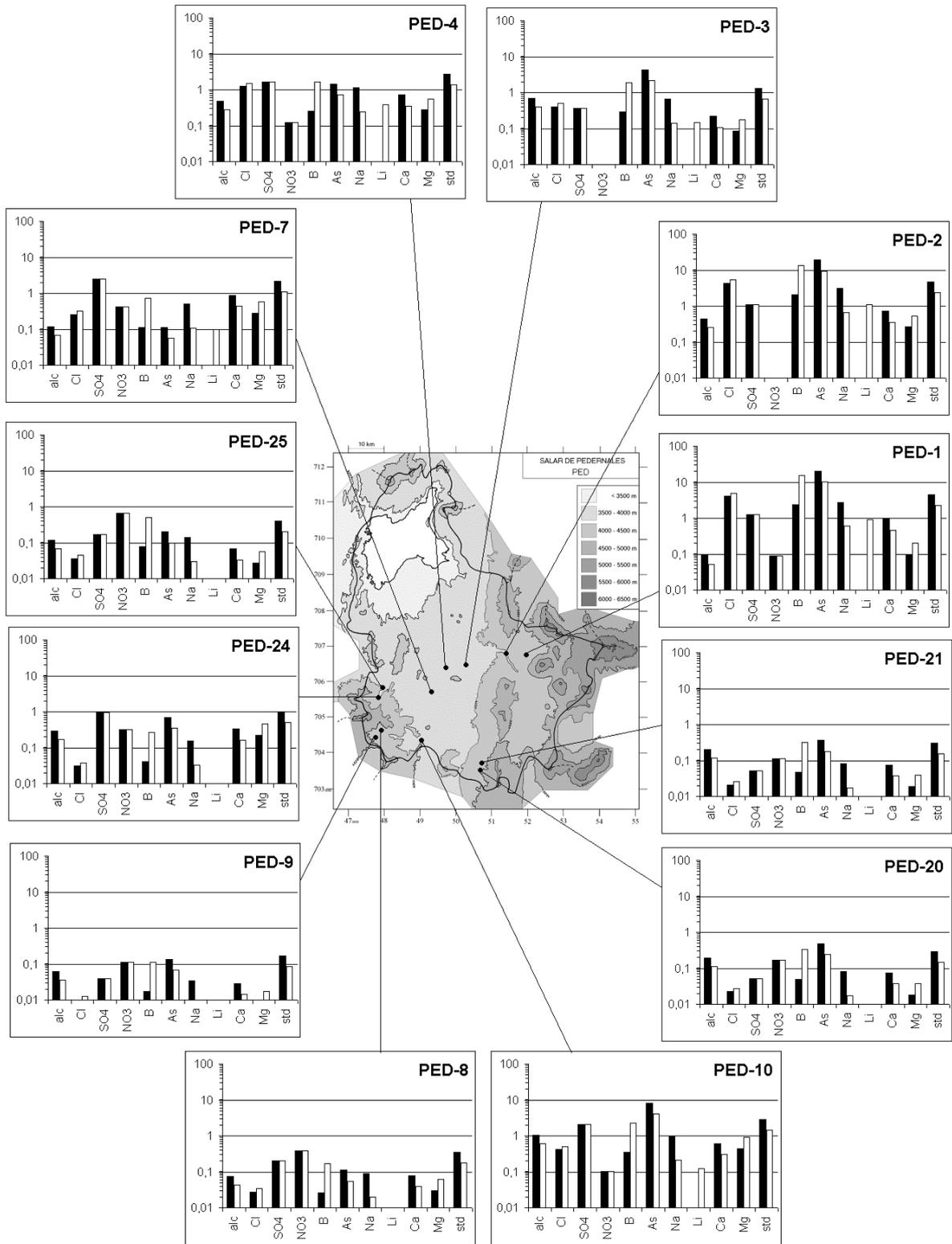
NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF. %	NUMERO	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
PED-1	2230	26,0	0,36	0,66	35,77	35,27	1,4	PED-1	-9,79	-77
PED-2	2393	134	5,34	0,75	38,54	38,19	0,9	PED-2	-8,36	-66
PED-3	656,5	217	8,52	0,79	9,036	8,731	3,4	PED-3	-5,76	-51
PED-4	1354	159	3,90	1,6	20,53	20,20	1,6	PED-4	-7,23	-64
PED-5	1023	43,1	0,18	2,2	15,43	15,18	1,6	PED-5	-7,93	-65
PED-6	4366	76,3	0,84	1,4	71,78	71,94	0,2	PED-6	-7,66	-65
PED-7	1104	41,4	0,12	4,0	16,47	16,03	2,7	PED-7	-8,70	-77
PED-8	173,3	26,4	0,06	1,4	1,997	1,963	1,7	PED-8	-10,17	-84
PED-9	84,93	22,0	0,0	2,4	0,7443	0,7215	3,1	PED-9	-10,22	-81
PED-10	1442	361	4,44	7,0	20,37	20,02	1,7	PED-10	2,18	-30
PED-11	220834	-	-	-	3713	3787	2,0	PED-11	na	na
PED-12	79743	264	2,70	12	1343	1364	1,6	PED-12	-4,34	-41
PED-13	3208	89,7	1,02	1,2	51,46	51,67	0,4	PED-13	-5,36	-56
PED-14	115753	199	23,9	1,4	1903	1971	3,5	PED-14	na	na
PED-15	326744	-	-	-	5609	5572	0,7	PED-15	na	na
PED-16	15175	13,9	3,42	0,01	259,3	255,6	1,4	PED-16	-1,30	-37
PED-17	746,4	210	0,42	18	10,86	10,81	0,5	PED-17	-6,76	-66
PED-18	457,4	33,6	0,18	1,1	6,023	6,107	1,4	PED-18	-5,84	-64
PED-19	321617	-	-	-	5468	5516	0,9	PED-19	na	na
PED-20	147,4	64,7	1,08	0,35	1,694	1,659	2,1	PED-20	-8,15	-56
PED-21	151,0	69,5	0,72	0,62	1,722	1,674	2,8	PED-21	-5,55	-65
PED-22A	10761	231	0,90	22	185,8	184,4	0,8	PED-22A	na	na
PED-22	30800	157	5,70	3,3	529,2	535,0	1,1	PED-22	na	na
PED-23	62287	286	19,0	2,4	1047	1066	1,8	PED-23	na	na
PED-24	510,1	101	0,30	6,2	6,990	6,997	0,1	PED-24	-9,71	-76
PED-25	205,0	41,1	0,12	1,5	2,281	2,272	0,4	PED-25	-7,48	-72
PED-26	2672	127	0,66	4,8	42,90	43,78	2,0	PED-26	-6,82	-64
PED-27	2651	126	8,34	0,35	42,25	43,09	2,0	PED-27	na	na
PED-28	3084	92,1	0,84	2,1	50,59	50,62	0,07	PED-28	na	na
PED-29	2685	103	0,12	18	43,15	44,23	2,5	PED-29	na	na

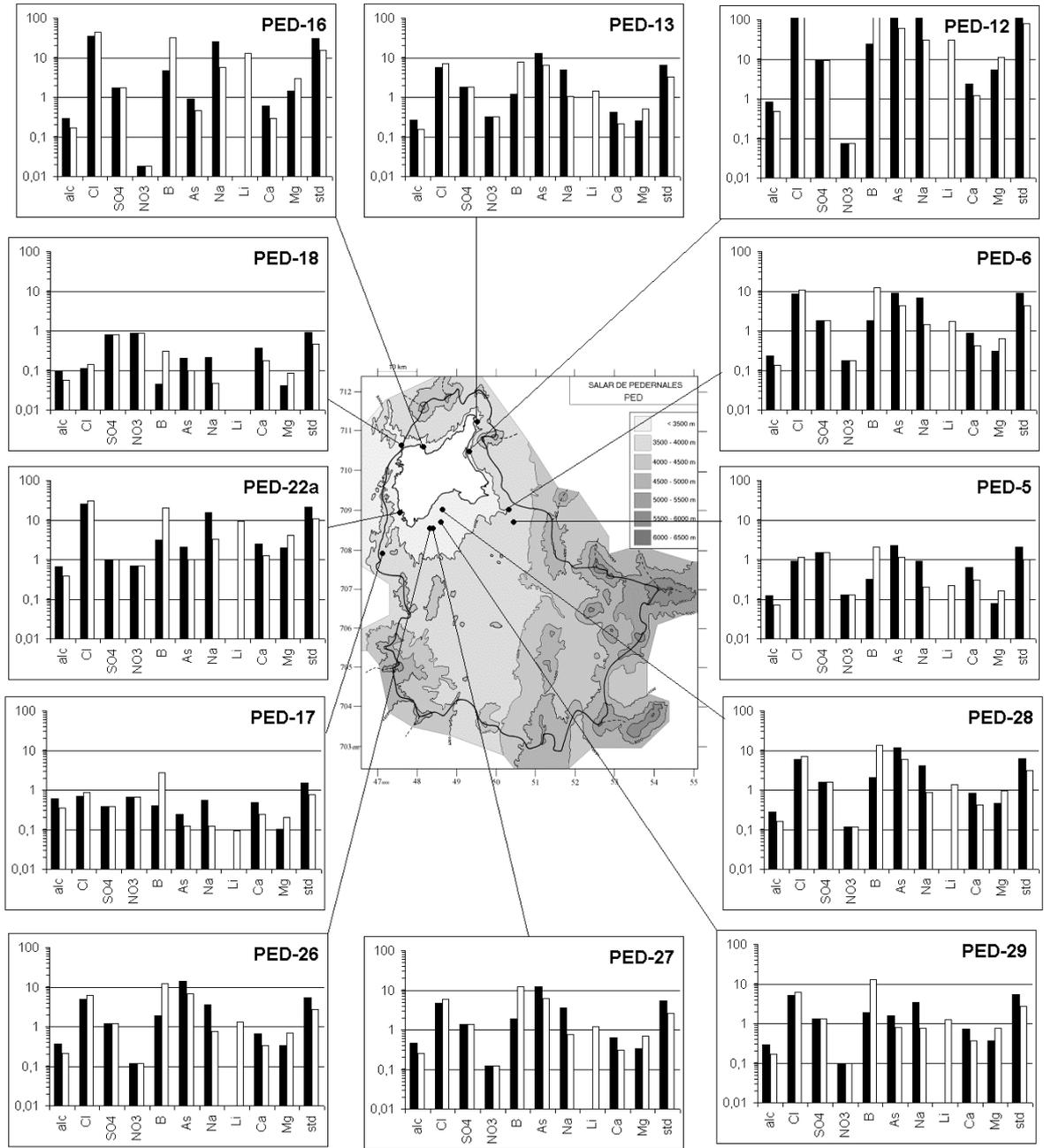
Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.
S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l)
DIF.% = diferencia en %

Análisis de oxígeno-18
y deuterio









MAPA GEOLOGICO Y VIAS EVOLUTIVAS

PED

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

Cz : *Cenozoico*. Rocas volcánicas: dacitas - andesitas.

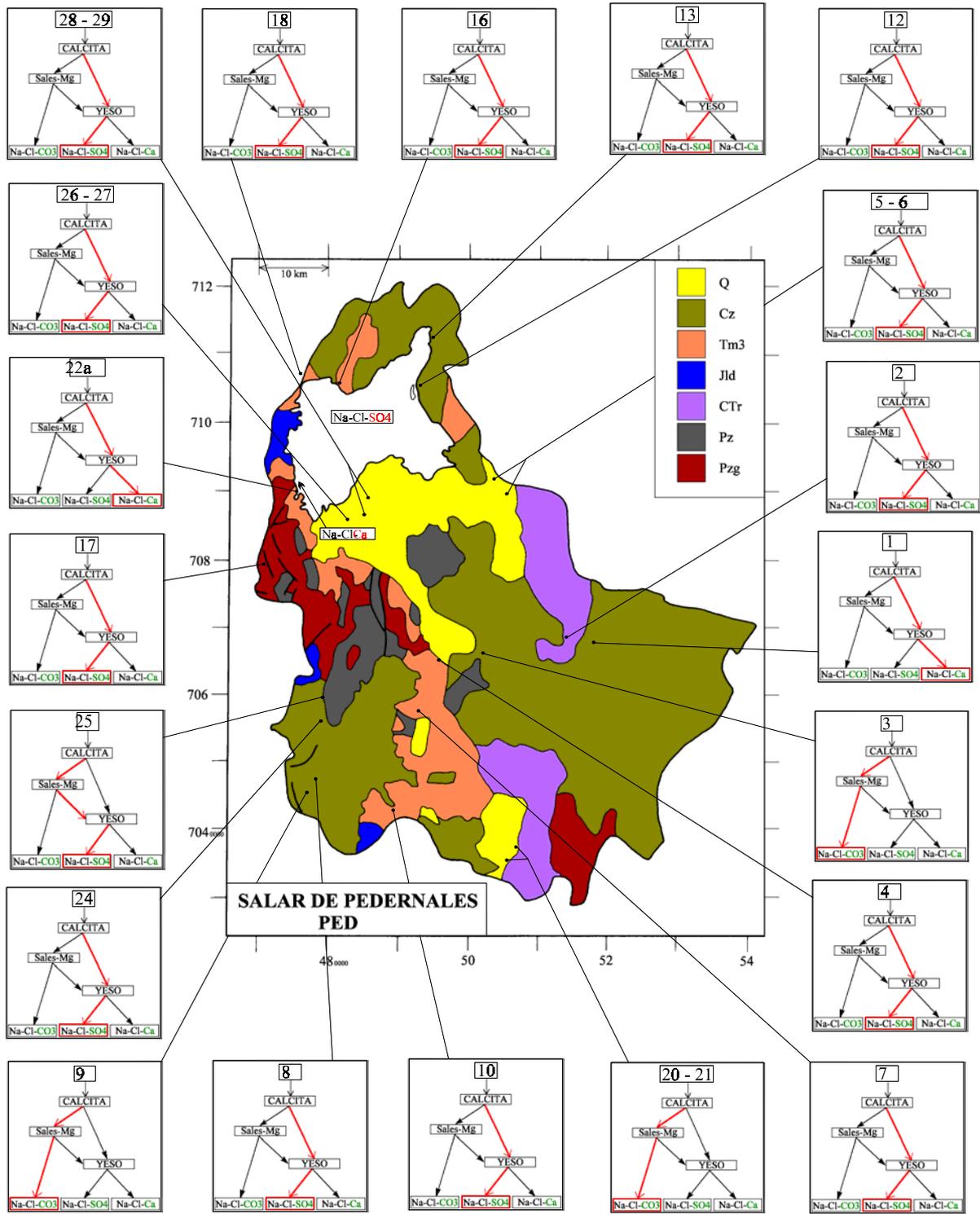
Tm3 : *Mioceno*. Gravas de Atacama. Gravas, arenas y limos subordinados, localmente con litificación incipiente e intercalaciones de ignimbritas.

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

CTR : *Carbonífero - Triásico (?)*. Tobas, brechas, coladas e ignimbritas principalmente riolíticas y dacíticas, con intercalaciones de sedimentitas clásticas. Cuerpos hipabisales dacíticos y riolíticos asociados.

Pz : *Paleozoico (?)*. Metareniscas, pizarras, filitas, esquistos, metabasitas, serpentinitas, gneisses y anfíbolitas.

Pzg : *Paleozoico*. Rocas plutónicas e hipabisales.



SALAR DE LA LAGUNA

Introducción

El salar de la Laguna es un pequeño salar ubicado en la Tercera Región al este del salar de Pedernales. Sus principales características morfométricas y climatológicas son:

- altura: 3494 m
- superficie de la cuenca: 400 km²
- superficie del salar: 0,55 km²
- superficie de las lagunas: 0,3-0,55 km²
- precipitaciones: 120 mm/año
- evaporación potencial: 1100 mm/año
- temperatura media: 3°C

La superficie de la cuenca es muy grande en relación al salar mismo. Es un salar de tipo "playa" con sedimentos salinos recubiertos por una laguna salada de extensión variable con la época del año. Hemos encontrado una vertiente corriente muy cuenca arriba (700 m por encima del salar) y dos vertientes difusas a la orilla de la laguna. La vertiente corriente forma un riachuelo que se infiltra mas abajo alimentando napas subterráneas.

Composición de aguas y salmueras

Las composiciones de aguas del salar de la Laguna 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	
LGN-5	3288	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl- (SO4) - (HCO3)	SO4 (N)
LGN-1	3998	Ca-Na- (Mg)	/ SO4-Cl	SO4 (N)
LGN-3	9107	Na-Ca- (Mg)	/ Cl-SO4	SO4 (N)
<u>LAGUNAS</u>				<u>MEGA-GRUPO</u>
LGN-2	8126	Na-Ca- (Mg)	/ Cl-SO4	SO4
LGN-4	20430	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl-SO4	SO4

Tabla 1 : Salinidades, tipos químicos y vías evolutivas de aguas del salar de La Laguna
SO₄ (N) = vía neutra sulfatada.

Las tres vertientes son salobres y tienen composiciones distintas. Notamos la alta concentración en Ca y SO₄ de la vertiente 1. Las lagunas pertenecen al mega-grupo de salmueras sulfatadas.

Origen de los componentes disueltos

Se ha encontrado las siguientes relaciones equimolares entre los componentes mayores de los aportes (ver diagramas circulares y figura 2):

- las vertientes difusas (1 y 3) tienen $\text{Na}+\text{Mg} \sim \text{Cl}$ y $\text{Ca} \sim \text{SO}_4$. Los cinco componentes representan más del 90 % de la salinidad total.
- la vertiente fluyente (5) tiene $\text{Na} \sim \text{Cl}$ y $\text{Ca} \sim \text{SO}_4$ con una proporción de 76 % de la salinidad total para esos cuatro componentes.

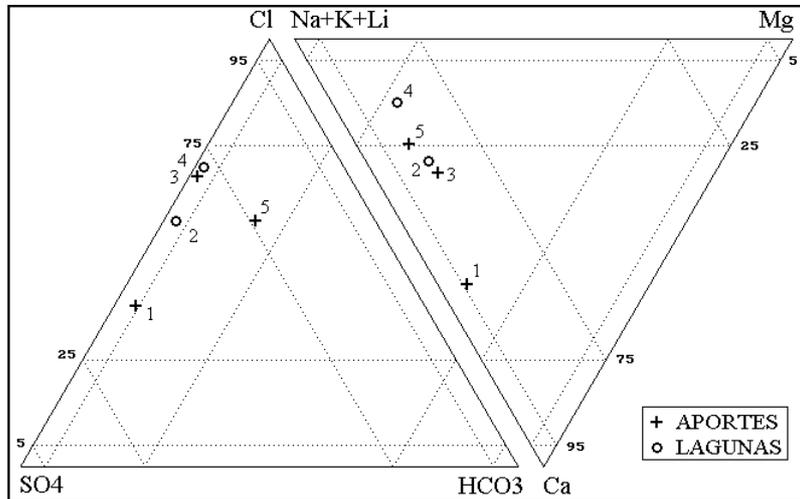


Fig.1: Composición de aguas y salmueras del salar de la Laguna.

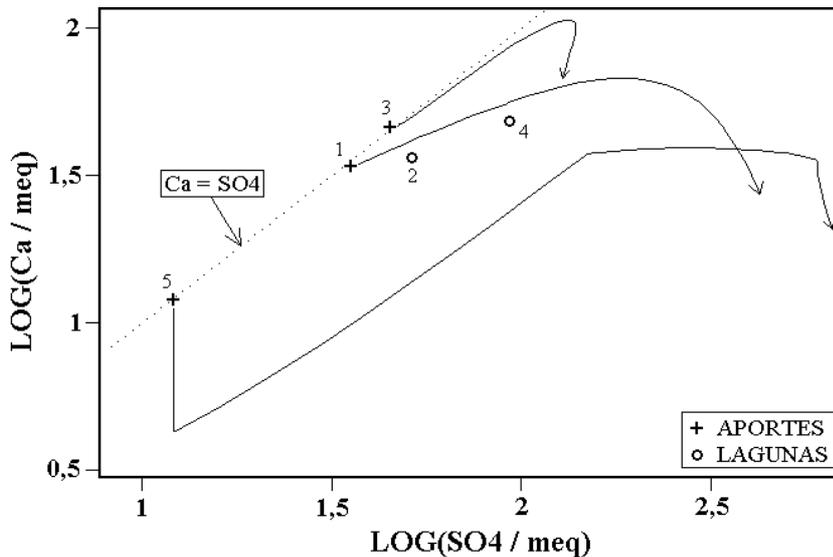


Fig.2 : Relación SO_4 versus Ca en aguas del salar de la Laguna con los trayectos evaporatorios hacia la vía sulfatada.

Esto sugiere que la salinidad elevada de los aportes se debe a la redisolución de antiguas evaporitas (con halita: NaCl y yeso: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) o salmueras residuales ($\text{Na}-\text{Mg} / \text{Cl}$) por debajo de las formaciones volcánicas.

Vías evolutivas y relación con la geología

Todas las aguas siguen la vía evolutiva neutra sulfatada que refleja terrenos volcánicos con azufre. Se presenta en la figura 2 los trayectos evaporatorios de las tres vertientes, mostrando el enriquecimiento del sulfato en desmedro del calcio. No hay incompatibilidad con la geología exclusivamente volcánica de la cuenca. Sin embargo no tenemos datos sobre las concentraciones de azufre en los volcanes. La composición sulfatada de las lagunas es coherente con la vía evolutiva sulfatada.

Evolución cuantitativa de aguas

Veamos ahora la evolución cuantitativa de las aguas de aporte cuando se evaporan. La tabla 2 presenta la composición calculada de todas las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta la salinidad de las diversas lagunas. 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 (LGN-xE) y las lagunas (LGN-x.EQ). Todas las composiciones de las lagunas fueron ajustadas al equilibrio con los minerales que las sobresaturan.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
<u>LGN-2.EQ</u>	8,05	0,986	2600	2460	60,7	29,9	1640	138	7,84	675	196	
LGN-1E	8,00	0,854	2780	2170	56,3	32,5	1590	209	8,32	775	153	0,028
LGN-5E	8,28	1,99	3030	1780	99,2	32,7	2110	187	13,2	205	192	0,192
<u>LGN-4.EQ</u>	8,07	2,10	8220	4220	186	28,6	5100	497	23,9	793	535	
LGN-1E	8,00	1,81	8670	3380	175	31,0	4940	651	25,9	981	476	0,020
LGN-5E	8,16	3,20	7670	4510	252	31,4	5360	475	33,4	482	486	0,047
LGN-3E	7,95	1,92	9460	2900	205	30,8	4780	348	24,0	1170	626	0,047

Tabla 2 : Comparación de las aguas de aporte evaporadas con las lagunas del salar de la Laguna. ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

La vertiente difusa 1, a la orilla sur, constituye la principal alimentación del salar. El coeficiente de desviación es bajo para las dos muestras de lagunas.

Calidad de aguas

Ningún agua de aporte cumple con las normas chilenas de potabilidad o de riego. Todas son de pésima calidad. Se caracterizan por su contenido muy alto en arsénico: 32 veces mas que la norma para la vertiente fluyente (5), y 127 veces mas para la vertiente difusa (1). El boro esta en exceso para uso en riego

Balance hídrico

Podemos establecer un orden de magnitud del balance hídrico de la laguna del salar asumiendo que su alimentación proviene de la vertiente difusa 1 y que su superficie promedia es de 0,4 km². Se utiliza el cloruro como elemento conservativo. Los parámetros considerados son :

- $H_e = 1,1 \text{ m/año}$
- $H_p = 0,12 \text{ m/año}$
- $S = 0,4 \text{ km}^2$
- $C_{ap} = 792 \text{ mg/l}$
- $C_L = 8240 \text{ mg/l}$

Volumen de aporte : $V_{ap} = S(H_e - H_p)/(1 - C_{ap}/C_L) = 434\,000 \text{ m}^3/\text{año} = 14 \text{ l/s}$

Volumen de infiltraciones : $V_i = S(H_e - H_p)/(1 - C_L/C_{ap}) = 42\,000 \text{ m}^3/\text{año} \sim 1,5 \text{ l/s}$

El caudal entrante de 14 l/s es mínimo. Las precipitaciones aportan 1500 l/s. El coeficiente de escurrimiento es extremadamente bajo: 0,01. Eso significa que la casi totalidad de las aguas que caen sobre la cuenca se infiltran en formaciones profundas sin llegar hasta el salar.

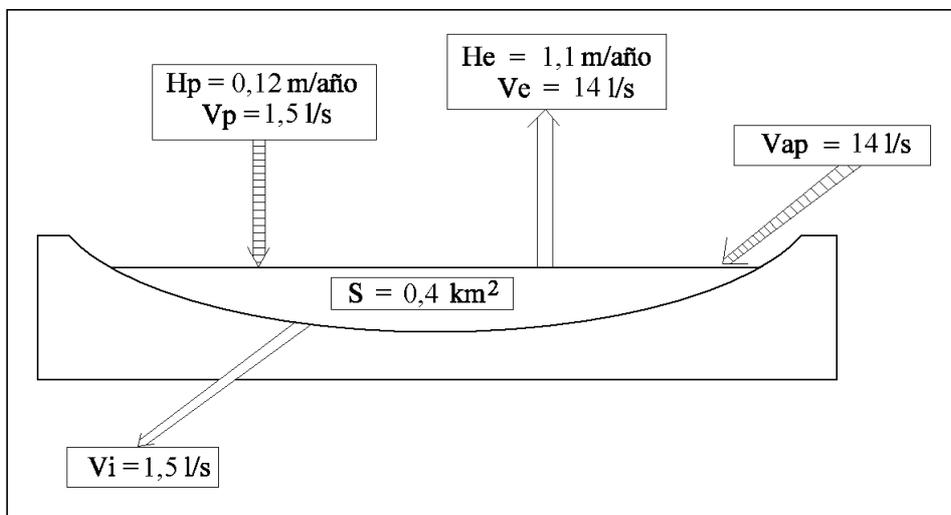
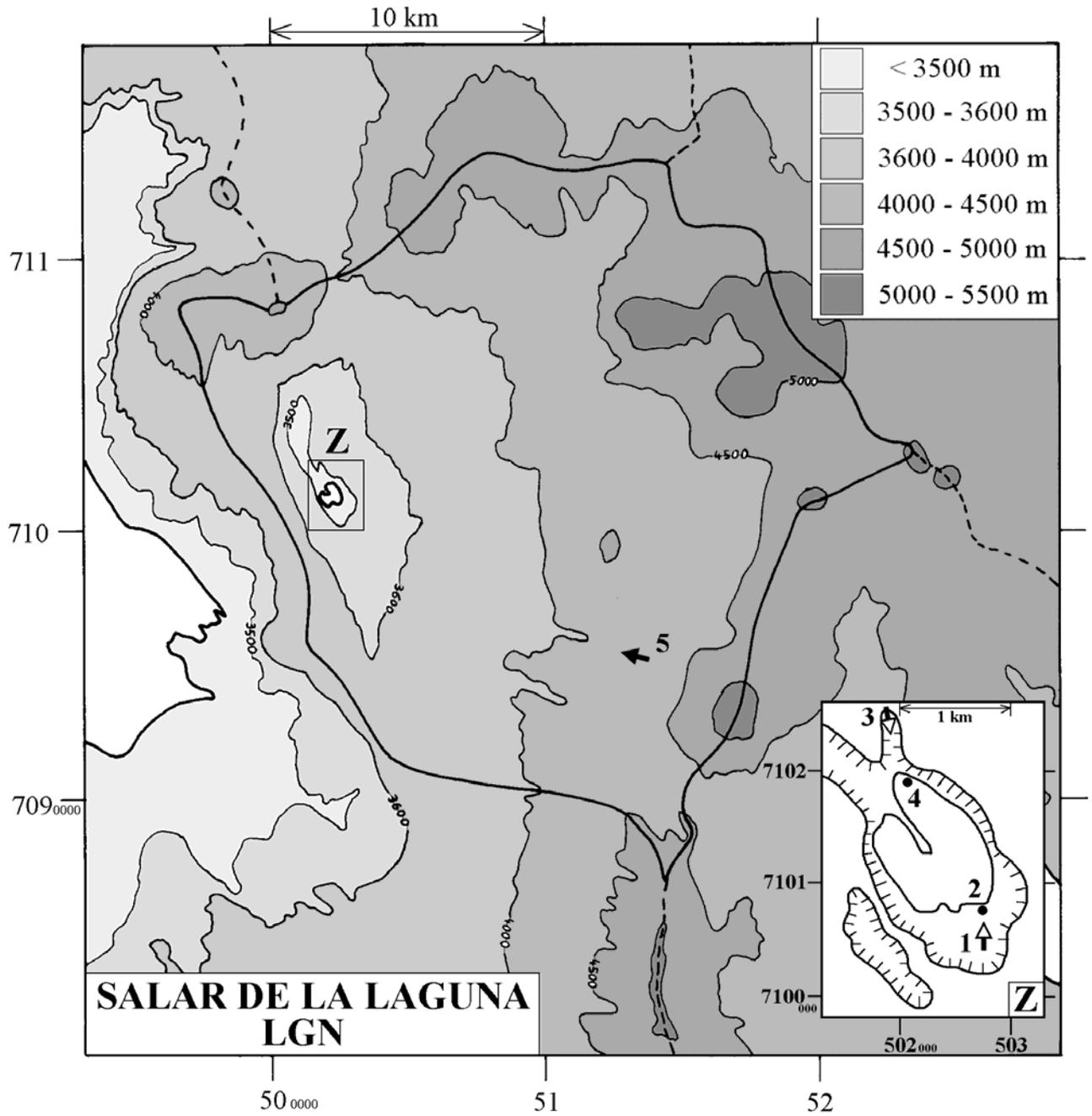


Fig.3 : Balance hídrico de la laguna del salar de la Laguna.

Conclusiones

La cuenca del salar de la Laguna no presenta buenas potencialidades de recursos de agua. Las aguas diluidas están contaminadas por evaporitas antiguas y salmueras residuales. Tenemos aquí un buen ejemplo de salinización muy arriba de la cuenca. Las napas subterráneas pueden ser también salobres. El contenido en arsénico de todas las aguas es particularmente elevado, así como el boro. Todas las aguas siguen la vía evolutiva neutra sulfatada en buen acuerdo con la composición sulfatada de la laguna.

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



**SALAR DE LA LAGUNA
LGN**

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
LGN-1	07/11/95	15 ^H 30	502698	7100692	3495	Manantial difuso
LGN-2	07/11/95	15 ^H 45	502698	7100800	3494	Laguna
LGN-3	07/11/95	16 ^H 15	501862	7102407	3496	Manantial difuso
LGN-4	07/11/95	16 ^H 40	502011	7101966	3494	Laguna
LGN-5	11/11/95	17 ^H 00	512964	7095641	4200	Manantial corriente

NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
LGN-1	2910	18,6	5,5	1,002	8,10	2,75	792	0,742	0,556	1710	37,7	16,0	31,1	6,36	451	59,4	2,37	678	43,5
LGN-2	6300	17,7	7,0	1,007	8,36	3,38	2620	3,28	0,438	2480	0,57	60,6	47,6	9,66	1620	138	7,84	730	196
LGN-3	7600	18,7	4,5	1,007	8,03	2,77	3550	4,35	0,565	2160	21,9	76,6	52,4	5,10	1770	130	8,95	926	234
LGN-4	16400	19,2	5,2	1,016	8,27	6,05	8240	12,5	0,679	4460	1,58	186	45,9	12,8	5080	497	23,9	974	535
LGN-5	2770	20,7	4,2	1,002	6,62	9,30	1020	2,40	0,714	580	5,33	32,3	44,2	1,58	669	61,0	4,30	240	62,5

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.

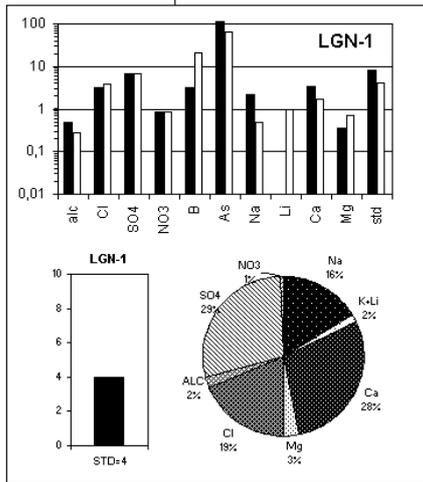
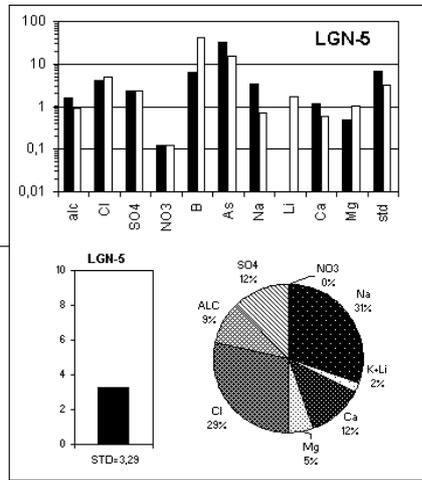
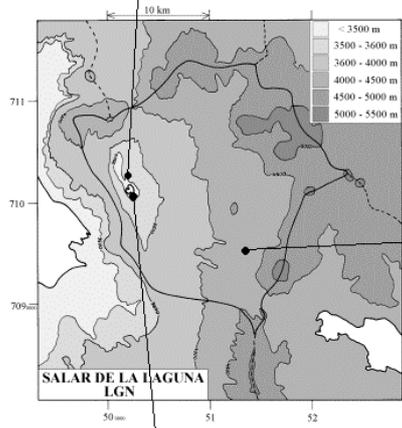
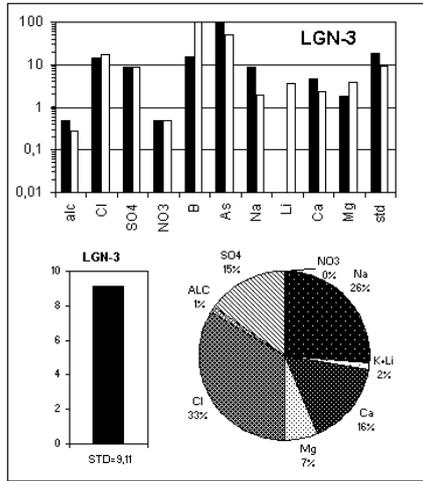
NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF. %	NUMERO	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
LGN-1	3998	145	6,00	1,6	58,84	61,26	4,0	LGN-1	-4,71	-50
LGN-2	8126	124	9,36	0,70	127,8	128,9	0,8	LGN-2	na	na
LGN-3	9107	114	5,04	1,4	146,9	148,1	0,8	LGN-3	-2,25	-38
LGN-4	20430	152	12,4	0,92	329,7	331,1	0,4	LGN-4	na	na
LGN-5	3288	565	0,48	180	48,40	50,07	3,4	LGN-5	-5,26	-53

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

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

DIF.% = diferencia en %

Análisis de oxígeno-18
y deuterio



MAPA GEOLOGICO Y VIAS EVOLUTIVAS

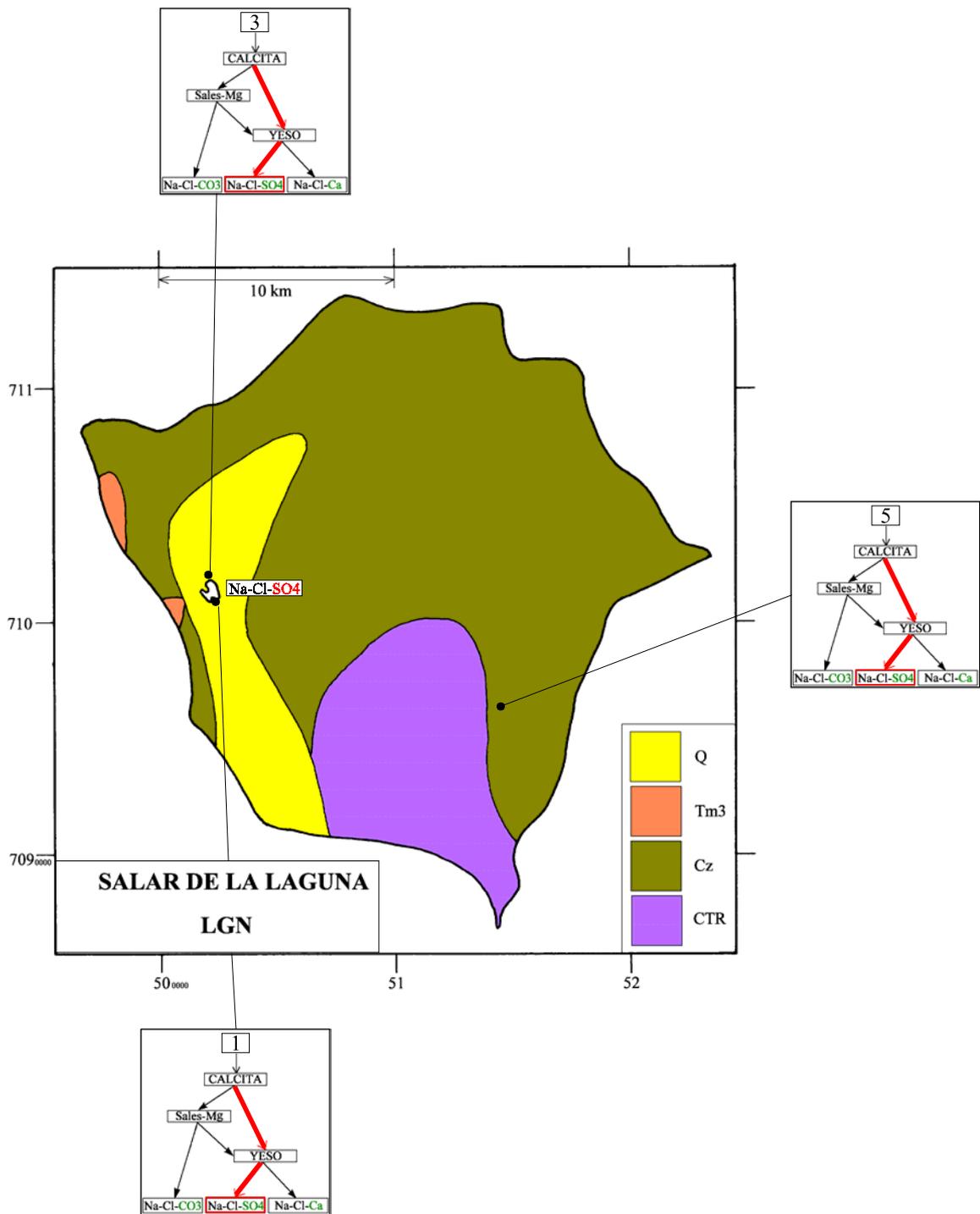
LGN

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

Tm3 : *Mioceno*. Gravas de Atacama. Gravas, arenas y limos subordinados, localmente con litificación incipiente e intercalaciones de ignimbritas.

Cz : *Cenozoico*. Rocas volcánicas: dacitas - andesitas.

CTR : *Carbonífero - Triásico (?)*. Tobas, brechas, coladas e ignimbritas principalmente riolíticas y dacíticas, con intercalaciones de sedimentitas clásticas. Cuerpos hipabisales dacíticos y riolíticos asociados.



SALAR DE PIEDRA PARADA

Introducción

El salar de Piedra Parada se encuentra en la Cordillera Andina de la Tercera Región en un sector de difícil acceso. Sus principales características morfométricas y climatológicas son:

- altura: 4150 m
- superficie de la cuenca: 388 km²
- superficie del salar: 28 km²
- superficie de las lagunas: 0,2 - 2(?) km²
- precipitaciones: 140 mm/año
- evaporación potencial: 1000 mm/año
- temperatura media: -2°C

No se encontró ningún aporte en sectores altos de la cuenca de drenaje. Todos están pegados a la orilla del salar donde alimentan un complejo sistema de lagunas someras y de extensión muy variable. Es un salar de tipo "playa" con sedimentos superficiales ricos en yeso. No tenemos suficientes datos para estimar balances hídricos.

Composición de las aguas y salmueras

Los tipos químicos de las aguas del salar de Piedra Parada están presentados en la figura 1 y en la tabla 1.

APORTES	SALINIDAD mg/l	TIPO QUÍMICO		VIA EVOLUTIVA
		Cationes	Aniones	
PIE-13	2908	Na- (Mg) - (Ca)	/ Cl- (SO4) - (HCO3)	SO4 (N)
PIE-11	2984	Na-Ca- (Mg)	/ Cl-SO4	SO4 (N)
PIE-1	3000	Na- (Mg) - (Ca)	/ Cl- (SO4)	SO4 (N)
PIE-8	3170	Na- (Mg)	/ Cl- (SO4) - (HCO3)	SO4 (A)
PIE-4	6483	Na- (Mg)	/ Cl- (SO4)	SO4 (A)
LAGUNAS				
PIE-3	6793	Na- (Mg) - (Ca)	/ Cl- (SO4)	SO4
PIE-14	10101	Na- (Mg)	/ Cl- (SO4)	SO4
PIE-10	14484	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl-SO4	SO4
PIE-7	18024	Na- (Mg)	/ Cl- (SO4)	SO4
PIE-5	20992	Na- (Mg) - (Ca)	/ Cl- (SO4)	SO4
PIE-2	22626	Na- (Mg)	/ Cl- (SO4)	SO4
PIE-12	31826	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl- (SO4)	SO4
PIE-6	33499	Na- (Mg)	/ Cl- (SO4)	SO4
PIE-9	82326	Na- (Mg)	/ Cl- (SO4)	SO4

Tabla 1 : Salinidades, tipos químicos y vías evolutivas de aguas del salar de Piedra Parada.
SO₄ (N) = vía neutra sulfatada. SO₄ (A) = vía alcalina sulfatada.

Hemos encontrado 4 vertientes difusas y una fluvente, todas de aguas salobres. El aporte más diluido tiene una salinidad de 2,9 g/l y el más concentrado 6,5 g/l. Se puede distinguir en los diagramas triangulares dos tipos de aporte:

- las vertientes difusas (1), (4), (8), (13) se agrupan cerca del tipo Na-(Mg) / Cl-(SO₄), con leves variaciones en su contenido de Ca y HCO₃.

- la única vertiente fluvente (11) es de tipo Na-Ca-(Mg) / Cl-SO₄.

No hemos encontrado salmueras muy concentradas. El rango de salinidad de las lagunas se extiende desde 6,8 g/l hasta 82,3 g/l. Sus composiciones reflejan la de los aportes:

- la mayor parte de las lagunas es del mismo tipo Na-(Mg) / Cl-(SO₄) que el de los aportes difusos.

- las lagunas (10) y (12), al extremo este del salar, son del tipo Na-(Ca)-(Mg) / Cl-(SO₄), parecido al de la vecina vertiente fluvente (11).

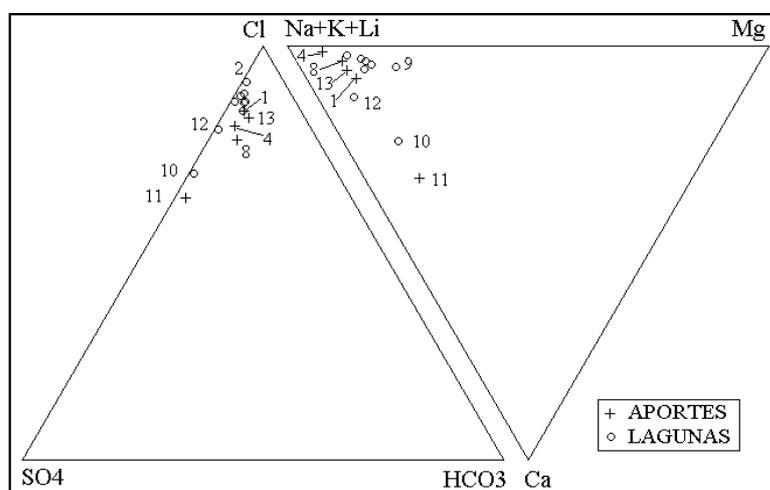


Fig.1: Composición de aguas y salmueras del salar de Piedra Parada.

Todas las salmueras del salar de Piedra Parada contienen más sulfato que calcio por lo que se puede clasificar este salar dentro de los de tipo sulfatado.

Origen de los componentes disueltos

La mejor relación de equimolaridad entre componentes mayores que se haya encontrado es entre Na+Mg y Cl (Fig.2). Se nota sin embargo que los aportes (4) y (8) de la orilla oeste se alejan un poco de la recta equimolar. Los aportes que más se acercan a la recta son los que se encuentran en el sector oriental del salar (11), (1) y (13). La alta salinidad de los aportes se debe probablemente a la disolución de salmueras residuales de tipo Na-Mg / Cl de un antiguo salar recubierto por formaciones volcánicas más recientes. El porcentaje de Na+Mg+Cl en los aportes difusos es de 75 - 80 %. Para la vertiente fluvente (11), este porcentaje baja a 57 %. El agua de esta vertiente (11) es la que tiene a la vez las concentraciones porcentuales en Ca y SO₄ más elevadas y más cercanas a la equimolaridad (ver diagramas circulares) correspondiendo la suma de Ca+SO₄ al 36% de su salinidad total. Parece entonces que el agua de esta vertiente ha redissuelto también yeso (CaSO₄.2H₂O).

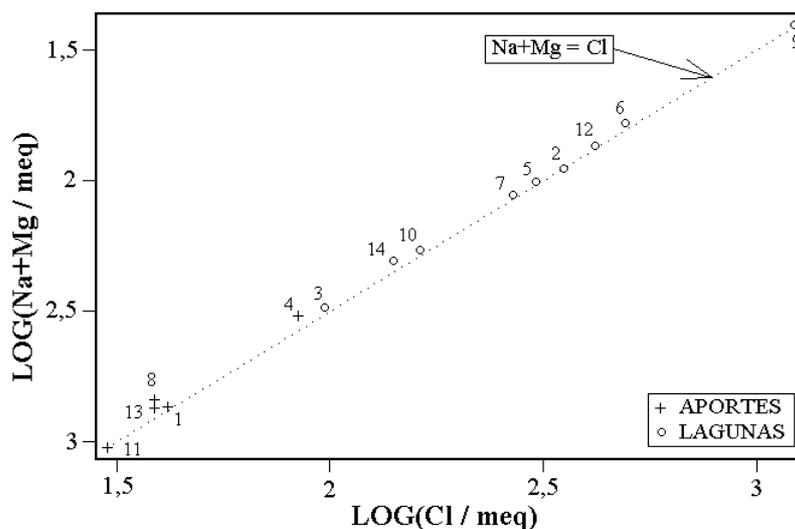


Fig.2 : Relación entre Na+Mg y Cl en aguas del salar de Piedra Parada

Vías evolutivas y relación con la geología

Todos los aportes siguen la vía sulfatada: alcalina sulfatada al extremo oeste (4 y 8) y neutra sulfatada al este (1, 11, 13). No disponemos del mapa geológico detallado; solamente se sabe que la cuenca es volcánica. En el norte chileno, las vías sulfatadas reflejan generalmente rocas volcánicas con azufre, lo que puede ser el caso de Piedra Parada. Sin embargo, la salinidad elevada de los aportes se debe probablemente a la redisolución de antiguas evaporitas y salmueras residuales recubiertas por formaciones volcánicas superficiales más modernas.

Evolución cuantitativa de aguas

Veamos ahora la evolución cuantitativa de las aguas de aporte cuando se evaporan. La tabla 2 presenta la composición calculada de todas las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta la salinidad de las diversas lagunas. 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 (PIE-xE) y las lagunas (PIE-x.EQ). Todas las composiciones de las lagunas fueron ajustadas al equilibrio con los minerales que las sobresaturan.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
<u>PIE-2.EQ</u>	8,27	1,87	12500	1430	60,8	15,3	6760	516	23,9	305	717	
PIE-1E	8,22	1,93	11700	2190	82,8	30,5	6930	574	23,2	324	495	0,087
PIE-13E	8,46	3,23	11600	2180	77,0	30,8	7270	560	22,7	104	439	0,190
PIE-11E	7,99	1,11	10600	3550	71,5	30,6	5700	687	17,3	1050	652	0,266
PIE-8E	8,52	4,58	10500	3020	132	31,1	7030	817	27,1	83,5	345	0,356
PIE-4E	8,63	4,63	10800	2790	82,7	31,4	7320	901	30,4	50,9	212	0,459
<u>PIE-14.EQ</u>	8,74	4,13	5000	960	29,5	26,6	3180	193	10,2	28,2	228	
PIE-13E	8,52	2,53	5070	956	33,7	32,5	3180	245	9,95	61,7	196	0,070
PIE-4E	8,71	3,88	4690	1220	36,0	33,0	3190	393	13,2	27,0	112	0,114
PIE-8E	8,62	3,61	4580	1320	57,4	32,8	3070	357	11,8	40,6	168	0,117
PIE-1E	8,32	1,61	5120	961	36,3	32,2	3040	252	10,2	157	217	0,210
PIE-11E	7,99	0,701	3960	2380	26,8	32,2	2140	258	6,49	838	244	0,476

<u>PIE-12.EQ</u>	8,05	1,95	14800	4370	172	24,2	9080	779	29,0	1010	477	
PIE-11E	7,99	1,43	15300	4260	103	29,5	8230	993	25,0	1160	942	0,083
PIE-1E	8,17	2,20	16200	3050	115	29,4	9640	799	32,2	440	689	0,110
PIE-13E	8,41	3,56	16100	3040	107	29,7	10100	781	31,7	142	602	0,274
PIE-8E	8,48	5,30	14600	4210	183	30,1	9800	1140	37,8	114	470	0,282
PIE-4E	8,59	5,13	15000	3890	115	30,3	10200	1260	42,4	67,7	282	0,392
<u>PIE-10.EQ</u>	8,06	1,02	5800	2790	54,0	25,9	3330	302	10,8	819	336	
PIE-11E	7,99	0,816	5900	2750	39,9	31,8	3180	384	9,66	914	364	0,022
PIE-1E	8,28	1,70	7060	1330	50,1	31,7	4190	347	14,0	206	299	0,217
PIE-13E	8,51	2,81	7000	1320	46,5	32,0	4390	339	13,7	71,5	270	0,363
PIE-8E	8,59	3,88	6330	1820	79,5	32,3	4240	493	16,4	53,3	220	0,409
PIE-4E	8,68	4,11	6490	1680	49,9	32,5	4420	544	18,3	34,1	142	0,503
<u>PIE-6.EQ</u>	8,28	3,01	17700	2890	148	23,6	10000	856	41,3	340	994	
PIE-1E	8,16	2,27	17400	3260	123	29,1	10300	855	34,5	470	737	0,032
PIE-13E	8,40	3,64	17300	3260	115	29,4	10800	836	33,9	152	642	0,094
PIE-11E	7,99	1,51	16500	4430	111	29,2	8870	1070	27,0	1180	1020	0,177
PIE-8E	8,47	5,48	15700	4510	196	29,8	10500	1220	40,5	122	501	0,179
PIE-4E	8,58	5,26	16100	4170	123	30,0	10900	1350	45,4	71,9	299	0,329
<u>PIE-5.EQ</u>	8,34	2,63	10800	1750	108	19,7	6140	552	27,2	224	562	
PIE-1E	8,23	1,88	10700	2000	75,6	30,8	6330	524	21,2	298	452	0,053
PIE-13E	8,48	3,16	10600	1990	70,3	31,1	6640	512	20,8	95,3	403	0,125
PIE-8E	8,54	4,42	9580	2760	120	31,4	6420	746	24,8	76,8	318	0,181
PIE-11E	7,99	1,04	9530	3380	64,5	30,9	5140	620	15,6	1030	588	0,286
PIE-4E	8,64	4,51	9820	2550	75,5	31,6	6690	823	27,8	47,2	197	0,329
<u>PIE-9.EQ</u>	8,04	3,94	43000	8600	278	18,9	22700	2050	103	1220	3380	
PIE-11E	7,94	3,69	42900	7660	291	23,4	23100	2790	70,3	1440	2650	0,039
PIE-1E	7,99	3,99	42500	7990	302	23,5	25300	2090	84,5	1120	1800	0,049
PIE-13E	8,22	5,69	42400	7990	282	23,7	26600	2050	83,1	371	1540	0,183
PIE-8E	8,29	9,63	38400	11100	482	24,4	25700	2990	99,3	296	1180	0,300
PIE-4E	8,41	8,03	39400	10200	303	24,5	26800	3300	111	170	680	0,442

Tabla 2 : Comparación de las aguas de aporte evaporadas con las lagunas del salar de Piedra Parada. ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

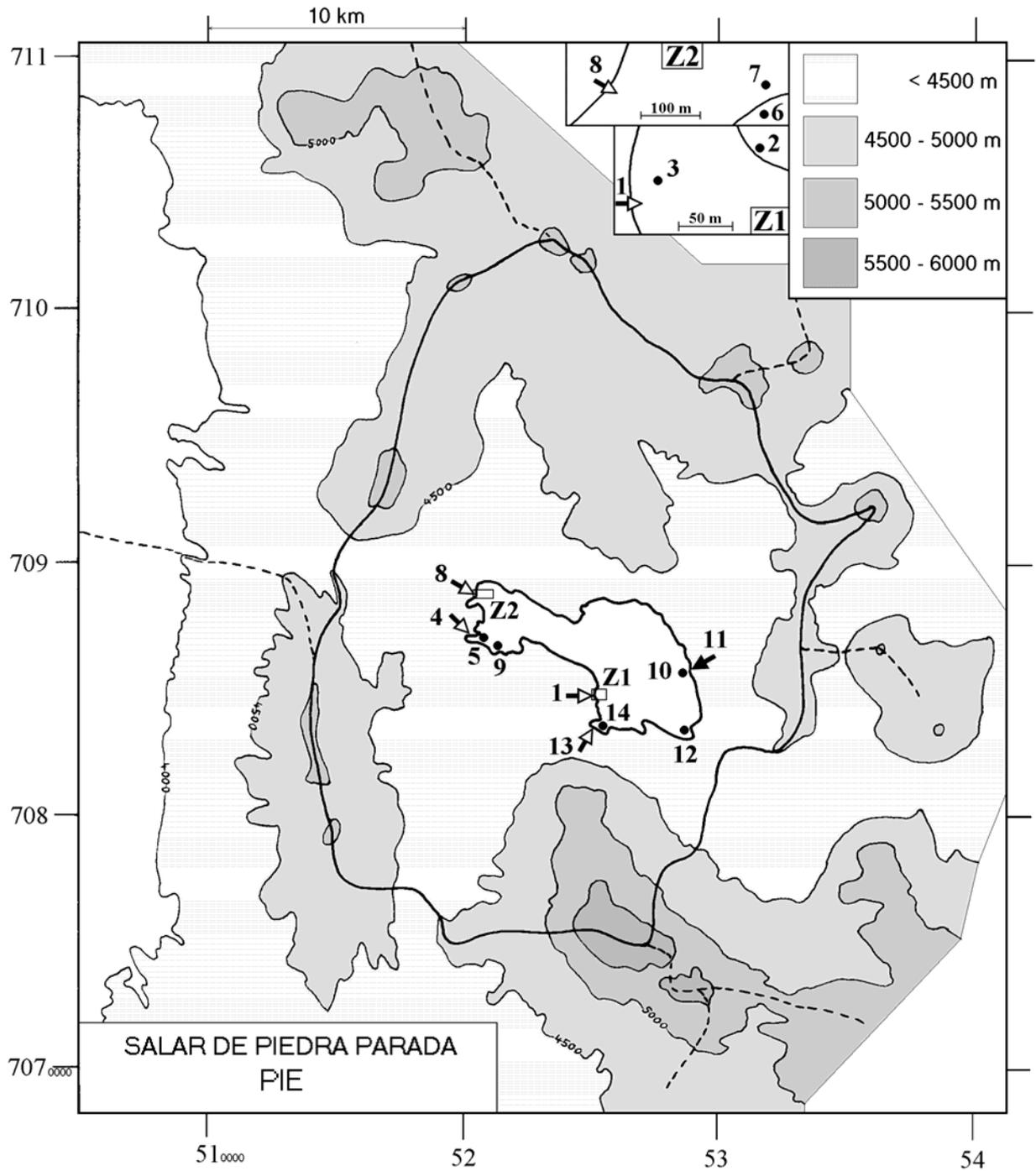
Las aguas de lagunas al este del salar (PIE-2, 14, 12, 10) provienen de la evaporación de aportes vecinos (PIE-1, 13, 11) con coeficientes de desviación mínimos. Al contrario, ninguna de las lagunas del oeste del salar (PIE-6, 5, 9) tiene relación con las vertientes que parecen alimentarlas (PIE-4 y 8). Por ejemplo, la laguna (5) parece provenir de la evaporación de la lejana vertiente (1) (desviación = 0,053) y no de la muy vecina vertiente 4 (desviación = 0,329). Los aportes del este del salar parecen controlar la composición de todas las aguas superficiales. Las vertientes difusas de la orilla oeste no tienen mucha influencia. Las lagunas occidentales podrían estar conectadas a las vertientes orientales por canales temporales en época de lluvia.

Calidad de agua

Todas las aguas de aporte son de mala calidad para uso potable y agrícola. Las salinidades son demasiado elevadas y los contenidos en boro y arsénico muy por encima de las normas.

Conclusiones

La cuenca del salar de Piedra Parada no tiene potencialidades alentadoras para encontrar importantes recursos de agua diluida. Todos los aportes son salobres debido a una probable disolución de salmueras residuales y sales evaporíticas de un antiguo salar recubierto por formaciones volcánicas más recientes. Aunque existen vertientes a todo alrededor del salar, la alimentación principal proviene del sector oriental de la cuenca.



**SALAR DE PIEDRA PARADA
PIE**

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
PIE-1	16/11/95	11 ^H 00	525108	7084626	4150	Manantial difuso
PIE-2	16/11/95	11 ^H 20	525180	7084660	4150	Laguna
PIE-3	16/11/95	11 ^H 40	525120	7084640	4150	Poza de preconcentración
PIE-4	16/11/95	12 ^H 30	520451	7087311	4150	Manantial difuso
PIE-5	16/11/95	13 ^H 00	520606	7087350	4150	Laguna
PIE-6	16/11/95	13 ^H 30	521292	7089182	4150	Laguna
PIE-7	16/11/95	13 ^H 45	521300	7089215	4150	Poza de preconcentración
PIE-8	16/11/95	14 ^H 45	521043	7089209	4150	Manantial difuso
PIE-9	16/11/95	15 ^H 00	521250	7086560	4150	Laguna
PIE-10	16/11/95	16 ^H 00	528900	7086030	4150	Laguna
PIE-11	16/11/95	16 ^H 15	528950	7086285	4152	Manantial corriente
PIE-12	16/11/95	16 ^H 30	528834	7083460	4150	Laguna
PIE-13	16/11/95	16 ^H 45	525020	7083455	4151	Manantial difuso
PIE-14	16/11/95	17 ^H 00	525449	7083245	4150	Laguna

SALAR DE PIEDRA PARADA
PIE

NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
PIE-1	2800	7,1	6,2	1,002	7,60	2,02	1480	0,658	0,0154	277	0,017	10,5	11,6	1,13	879	72,7	2,94	76,6	62,7
PIE-2	23300	7,7	1,1	1,017	8,30	3,68	12500	6,02	0,146	1430	0,081	60,8	15,3	4,00	6760	516	23,9	341	717
PIE-3	7500	5	7,5	1,005	8,85	3,37	3460	1,73	0,286	575	0,055	21,3	10,9	3,74	2020	174	6,84	128	183
PIE-4	2500	1,3	0,0	1,004	7,26	4,06	3000	2,35	0,253	778	0,011	23,0	26,2	0,156	2040	251	8,47	27,3	84,8
PIE-5	17700	15	6,0	1,016	8,37	10,9	10800	8,47	2,40	1750	0,081	108	19,7	10,4	6120	551	27,2	390	561
PIE-6	25600	16	6,0	1,025	8,25	7,46	17500	10,4	1,78	2890	0,056	148	28,8	20,5	10200	856	41,3	429	994
PIE-7	15900	17	6,5	1,013	8,83	5,49	9550	3,92	0,472	1410	0,054	65,3	16,8	5,20	5430	504	21,6	185	505
PIE-8	3200	16	1,5	1,002	7,33	3,07	1380	0,548	0,0607	402	0,012	17,5	26,2	0,801	948	109	3,61	36,9	60,3
PIE-9	52500	15,2	4,7	1,060	8,15	12,1	43300	15,5	1,14	8600	0,124	278	26,8	13,4	22400	2040	103	1380	3380
PIE-10	11200	13,7	6,0	1,012	8,37	2,49	5790	3,05	0,319	3360	0,161	53,9	54,0	3,25	3340	302	10,8	1090	335
PIE-11	2750	16,3	4,7	1,002	7,84	1,11	1070	0,547	0,0742	785	7,19	7,20	32,5	0,588	573	69,2	1,74	305	65,6
PIE-12	24800	11,1	6,0	1,024	8,10	4,25	14900	13,4	0,409	4910	0,068	172	40,3	6,10	8990	778	29,0	1290	476
PIE-13	2750	12,4	7,2	1,002	7,80	2,71	1380	0,582	0,0085	262	0,045	9,24	25,2	0,480	881	67,3	2,73	57,3	53,7
PIE-14	9100	9,6	6,0	1,008	8,60	6,38	5010	2,10	0,133	960	0,068	29,5	35,3	4,20	3170	193	10,2	73,4	228

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.

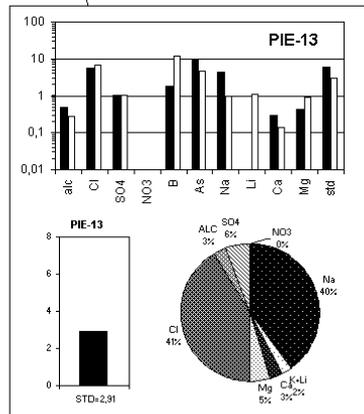
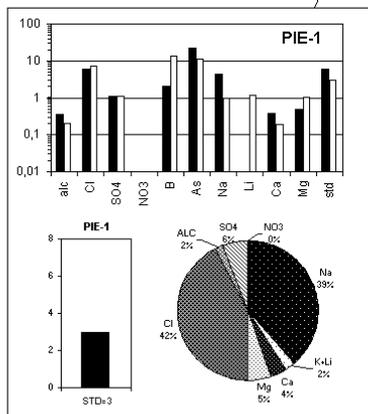
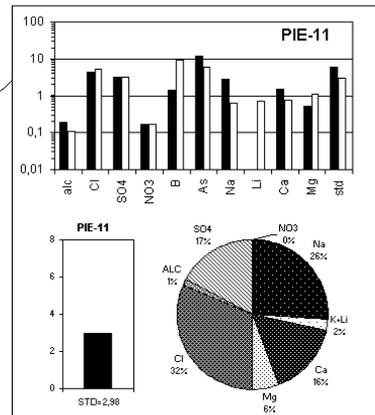
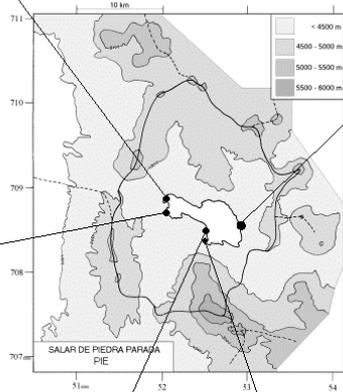
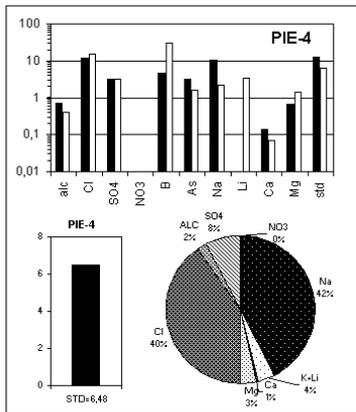
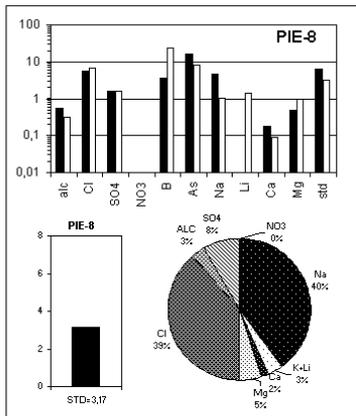
NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF. %	NUMERO	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
PIE-1	3000	121	0,48	5,3	49,46	49,40	0,1	PIE-1	-7,14	-67
PIE-2	22626	156	8,82	1,1	386,7	386,5	0,05	PIE-2	na	na
PIE-3	6793	143	13,4	0,35	114,8	112,9	1,7	PIE-3	na	na
PIE-4	6483	246	0,36	26	104,7	104,7	0,02	PIE-4	-6,10	-59
PIE-5	20992	476	35,6	2,5	349,7	351,3	0,5	PIE-5	na	na
PIE-6	33499	265	20,1	1,6	573,1	559,7	2,4	PIE-6	na	na
PIE-7	18024	134	25,7	0,23	302,8	303,9	0,5	PIE-7	na	na
PIE-8	3170	185	0,42	12	51,30	50,25	2,1	PIE-8	-6,73	-57
PIE-9	82326	282	42,7	2,2	1390	1411	1,5	PIE-9	na	na
PIE-10	14484	77,5	6,72	0,44	236,1	235,5	0,3	PIE-10	na	na
PIE-11	2984	63,4	0,90	1,3	47,52	47,59	0,1	PIE-11	-8,14	-71
PIE-12	31826	127	6,18	1,3	518,5	525,5	1,3	PIE-12	na	na
PIE-13	2908	161	1,08	4,0	47,69	46,97	1,5	PIE-13	-5,23	-61
PIE-14	10101	313	18,8	1,1	166,8	167,4	0,3	PIE-14	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

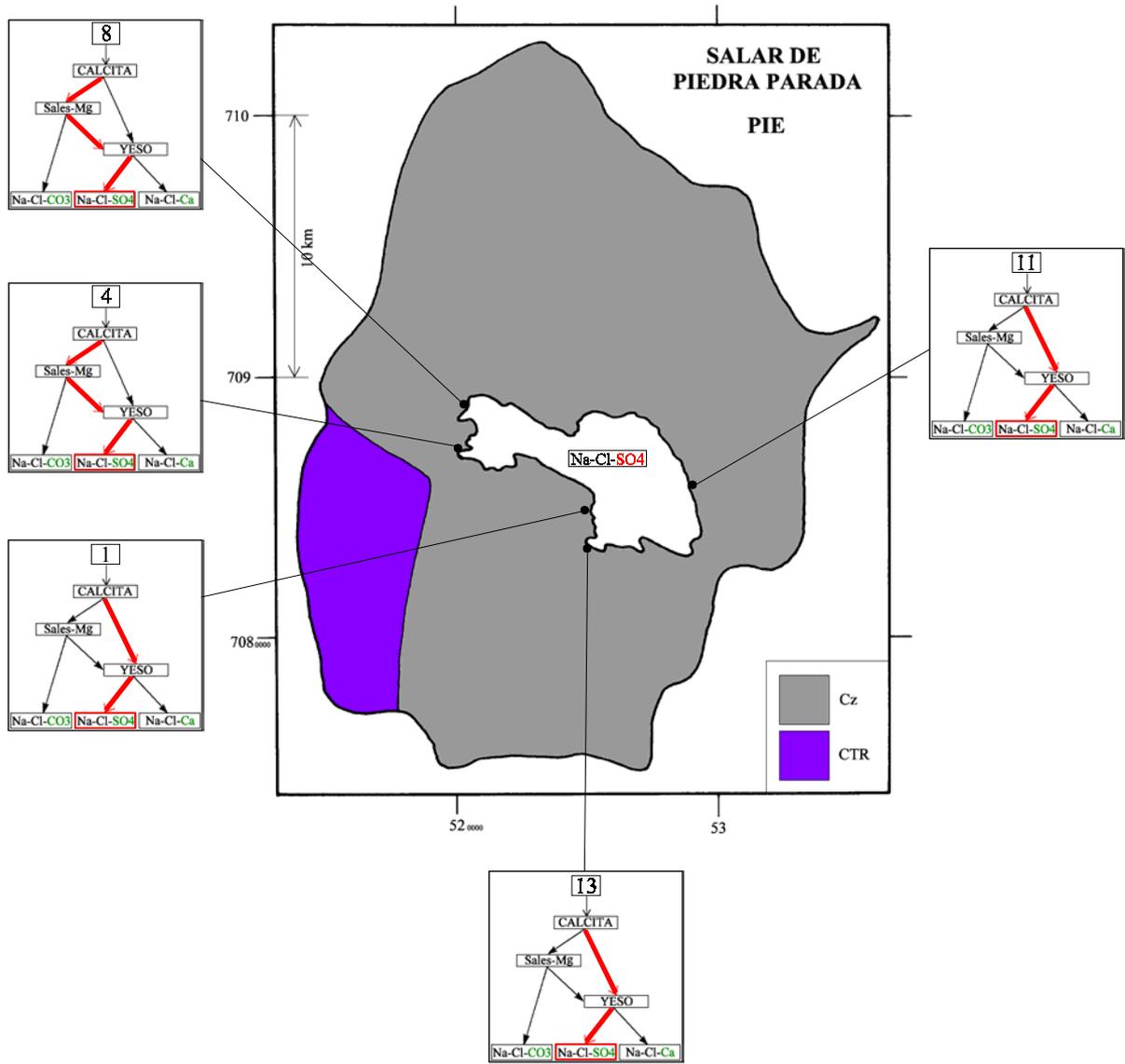


MAPA GEOLOGICO Y VIAS EVOLUTIVAS

PIE

Cz : *Cenozoico*. Rocas volcánicas: dacitas - andesitas.

CTR : *Carbonífero - Triásico (?)*. Tobas, brechas, coladas e ignimbritas principalmente riolíticas y dacíticas, con intercalaciones de sedimentitas clásticas. Cuerpos hipabisales dacíticos y riolíticos asociados.



LAGUNAS BRAVAS

Introducción

Las lagunas Bravas se encuentran en la Cordillera de los Andes de la Tercera Región, adyacente a la frontera argentina, en un sector de difícil acceso. Una pequeña parte de la cuenca se encuentra en territorio argentino. Son tres lagunas alineadas norte-sur, una grande al sur y dos pequeñas al norte. Las principales características morfométricas y climatológicas de las lagunas son:

- altura: 4250 m
- superficie de la cuenca: 545 km²
- superficie de las lagunas: 8,4 km² (sur); 0,7 km² (centro); 0,9 km² (norte)
- precipitaciones: 140 mm/año
- evaporación potencial: 1000 mm/año
- temperatura media: -2°C

No hemos encontrado vertientes cuenca arriba. Hemos muestreado dos vertientes difusas: una en la laguna mayor, al sur y la otra en la pequeña laguna central.

Composición de aguas y salmueras

Las composiciones de aguas de las lagunas Bravas están presentadas en la tabla 1 y en la figura 1.

<u>APORTES</u>	<u>SALINIDAD</u> mg/l	<u>TIPO QUÍMICO</u>		<u>VIA EVOLUTIVA</u>
		Cationes	Aniones	
BRA-3	2134	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl- (SO4) - (HCO3)	SO4 (N)
BRA-1	2889	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl- (SO4) - (HCO3)	SO4 (N)
<u>LAGUNAS</u>				
BRA-4	4188	Na	/ Cl- (SO4) - (HCO3)	SO4
BRA-2	121493	Na- (Mg)	/ Cl- (SO4)	SO4

Tabla 1 : Salinidades, tipos químicos y vías evolutivas de aguas de las lagunas Bravas.
SO₄ (N) = vía neutra sulfatada.

Las dos vertientes tienen una composición química similar. Son aguas salobres (2 - 3 g/l) de tipo Na / Cl con proporciones menores de Ca, Mg, SO₄ y HCO₃. Las lagunas pertenecen al mega-grupo Na / Cl-SO₄ con más sulfato que calcio. La laguna sur contiene una salmuera de 121 g/l. La otra muestra de laguna proviene de la laguna norte y es solamente salobre (4 g/l).

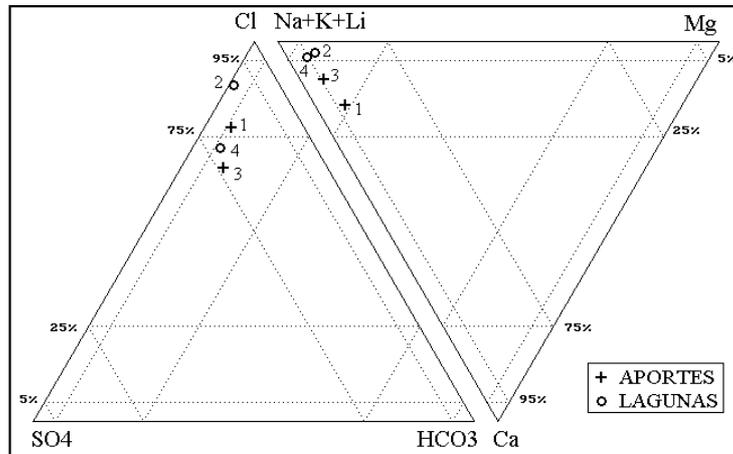


Fig.1: Composición de aguas y salmueras de las lagunas Bravas.

Origen de los componentes disueltos

Se puede observar en los diagramas circulares que la suma de los cuatro componentes principales de los aporte: $\text{Na}+\text{Ca}+\text{Cl}+\text{SO}_4$ corresponde al 88 % de la salinidad total de BRA-1 y 80 % de la de BRA-3. La suma de las concentraciones de todos los demás componentes llega a 340 mg/l para cada aporte. Además, se puede observar una tendencia a la equimolaridad entre Na y Cl para los dos aportes y entre Ca y SO_4 para BRA-1. Eso sugiere una contaminación de aguas diluidas por sales evaporíticas antiguas: halita (NaCl) y yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). También, la contaminación podría provenir en parte de salmueras residuales de tipo Na-Ca / Cl- SO_4 .

Es poco probable que ocurra una contaminación de la vertiente (1) por la cuña salina de la laguna sur. Esta vertiente tiene una concentración exactamente equimolar en Ca y SO_4 , pero la laguna vecina tiene 3,6 veces más sulfato que calcio (en meq/l). Si la elevada salinidad de BRA-1 se debiera a una contaminación por la salmuera de la laguna, su concentración en sulfato sobrepasaría la del calcio. No podemos hacer las mismas observaciones para las muestras de vertiente (3) y de laguna (4), pues no pertenecen a la misma laguna.

Vías evolutivas y relación con la geología

No disponemos del mapa geológico detallado de la zona; solamente sabemos que la cuenca es enteramente volcánica. Los dos aportes siguen la vía evolutiva neutra sulfatada, lo que puede reflejar una cuenca volcánica con azufre.

Evolución cuantitativa de aguas

Veamos ahora la evolución cuantitativa de las aguas de aporte cuando se evaporan. La tabla 2 presenta la composición calculada de todas las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta la salinidad de las diversas lagunas. 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 (BRA-xE) y las lagunas (BRA-x.EQ). Todas las composiciones de las lagunas fueron ajustadas al equilibrio con los minerales que las sobresaturan.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
<u>BRA-2.EQ</u>	7,59	5,20	63700	10200	550	15,8	40000	2300	231	787	1750	
BRA-1E	7,58	4,87	63100	10100	809	19,5	38200	2570	244	1380	1970	0,052
BRA-3E	7,71	6,12	49600	23900	911	21,1	38000	3160	275	392	1400	0,167
<u>BRA-4.EQ</u>	8,67	3,01	1690	686	28,5	27,1	1320	72,3	6,67	31,1	37,9	
BRA-3E	8,53	2,35	1630	784	41,5	33,3	1250	104	9,01	48,8	45,9	0,065
BRA-1E	8,25	1,14	1950	569	27,3	32,9	1180	79,3	7,54	170	60,9	0,226

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

La salmuera de la laguna sur proviene esencialmente de la evaporación de la vertiente difusa (1) que la alimenta. El coeficiente de desviación es bajo. Las principales discrepancias se observan para el calcio y el boro que podrían reflejar la influencia de otros aportes no muestreados. Sin embargo, el boro casi siempre se encuentra en concentraciones menores a las previstas debido a su incorporación en arcillas. El agua salobre de la laguna (4), también tiene buena relación con el aporte evaporado (3), a pesar de no pertenecer a la misma laguna. Presenta la misma discrepancia en calcio y boro.

Calidad de aguas

Ninguna de las dos aguas de aporte cumple con las normas chilenas de potabilidad o de riego pues tienen una salinidad elevada y demasiado arsénico y boro: 15 a 20 veces más arsénico y boro que el máximo permitido por las normas respectivas.

Balance hídrico

Podemos establecer el balance hídrico de la laguna sur y adelantar un orden de magnitud de los aportes a las más chicas lagunas central y norte, aunque no tenemos suficientes datos para estimar sus infiltraciones. Se utiliza el cloruro como elemento conservativo. La evaporación de la laguna sur se ha reducido en 10% en relación a la evaporación potencial para tomar en cuenta su salinidad elevada (121 g/l). Los parámetros considerados son :

- $H_e = 0,9$ m/año (1 m - 10% de 1 m)
- $H_p = 0,14$ m/año
- S (sur) = 8,4 km²
- S (centro) = 0,7 km²
- S (norte) = 0,9 km²
- $C_{ap} = 1,27$ g/l (Cl del aporte a la laguna sur)
- $C_L = 64,3$ g/l (Cl de la salmuera de la laguna sur)

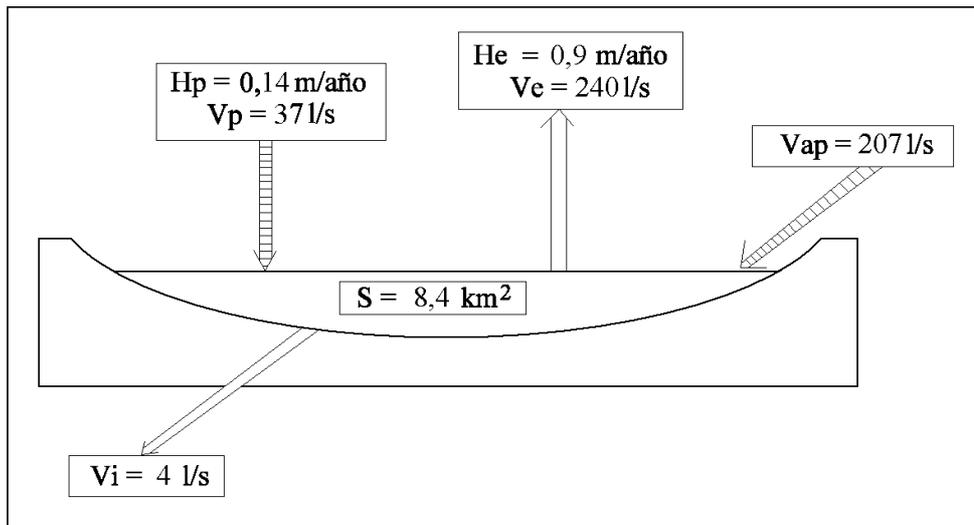


Fig.2 : Balance hídrico de la laguna Brava sur.

Laguna sur:

Volumen de aporte : $V_{ap} = S(H_e - H_p) / (1 - C_{ap} / C_L) = 6\,500\,000 \text{ m}^3/\text{año} = 207 \text{ l/s}$

Volumen de infiltraciones : $V_i = S(H_e - H_p) / (1 - C_L / C_{ap}) = 130\,000 \text{ m}^3/\text{año} = 4 \text{ l/s}$

Laguna central:

Volumen de aporte : $V_{ap} = S(H_e - H_p) = 600\,000 \text{ m}^3/\text{año} = 19 \text{ l/s}$

Laguna norte:

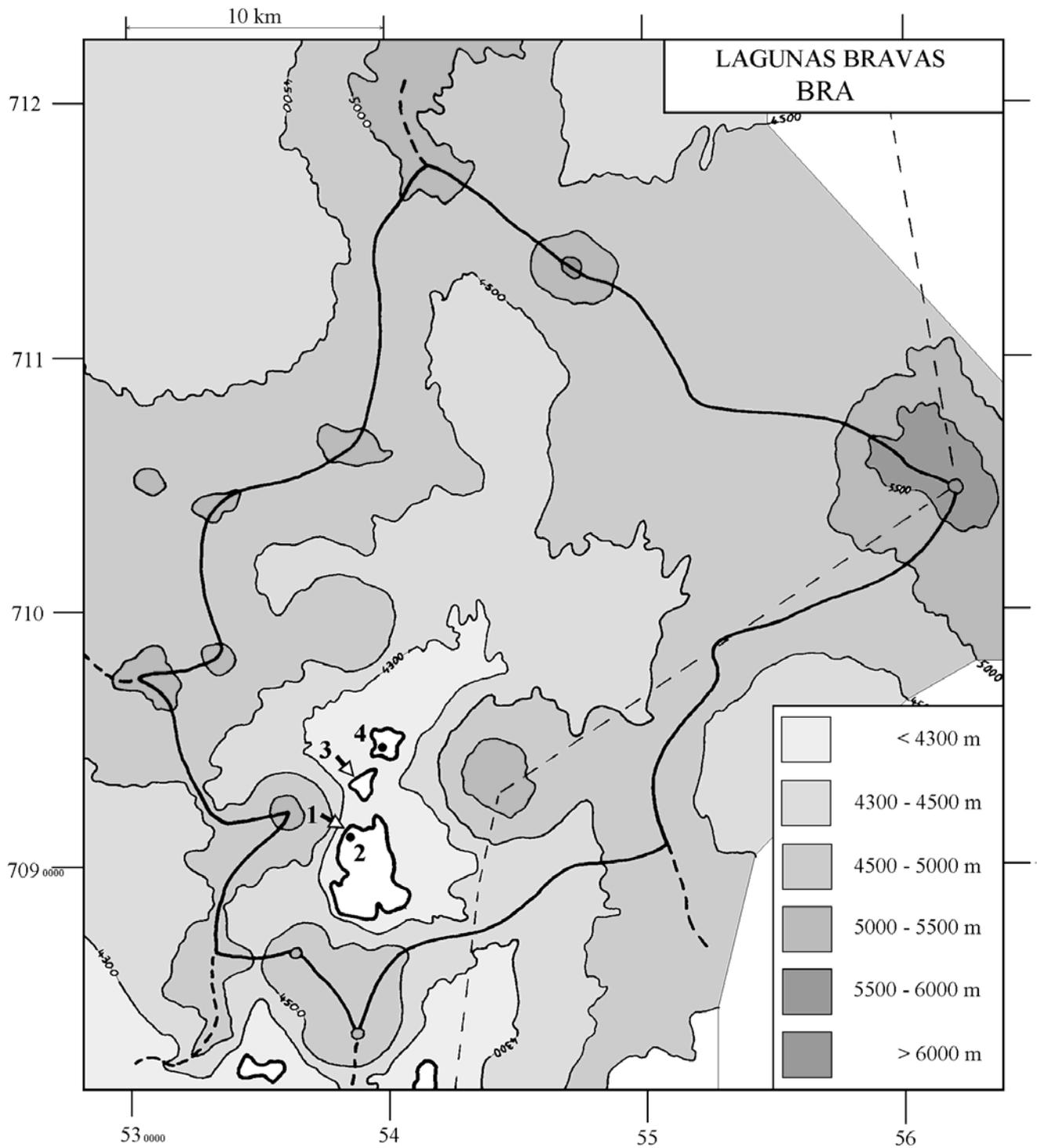
Volumen de aporte : $V_{ap} = S(H_e - H_p) = 770\,000 \text{ m}^3/\text{año} = 24 \text{ l/s}$

Entra un caudal no despreciable de unos 200 l/s solamente para la laguna sur.

Conclusiones

Las lagunas Bravas reciben aportes salobres debido a la probable redisolución de antiguas evaporitas (cloruro de sodio y sulfato de calcio) ubicadas por debajo de las formaciones volcánicas de la cuenca. Las aguas de aporte siguen al evaporarse la vía neutra sulfatada, produciendo salmueras del mega-grupo sulfatado : Na / Cl-SO₄. Las recursos de agua podrían ser interesantes: el caudal entrante a la laguna sur es de 200 l/s. Sin embargo, las napas cuenca arriba podrían estar salinizadas por antiguas evaporitas o salmueras residuales asociadas. El coeficiente de escurrimiento (razón entre el volumen de precipitación que cae sobre la cuenca y el volumen de agua que entra en las lagunas) es de 0,11.

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



**LAGUNAS BRAVAS
BRA**

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM ESTE	NORTE	ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
BRA-1	08/11/95	15 ^H 30	538812	7091802	4250	Manantial difuso
BRA-2	08/11/95	16 ^H 00	538674	7091652	4250	Laguna
BRA-3	08/11/95	16 ^H 30	538698	7093384	4250	Manantial difuso
BRA-4	08/11/95	17 ^H 00	539354	7094282	4250	Laguna

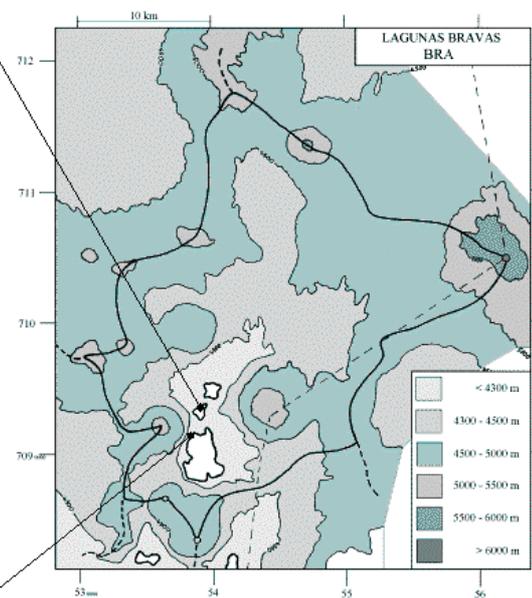
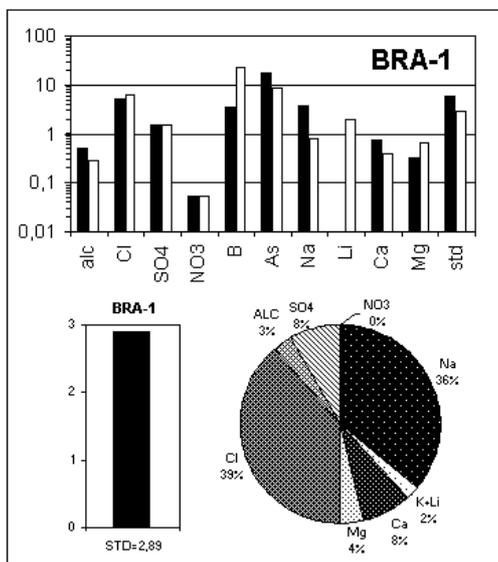
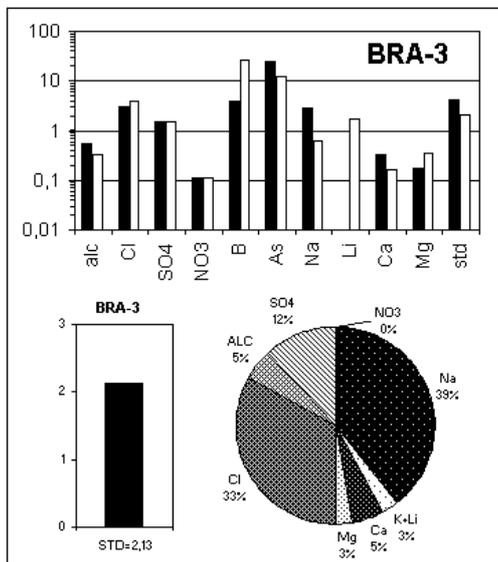
NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
BRA-1	2800	16,2	6,2	1,002	8,25	2,91	1270	1,24	0,0735	368	2,33	17,6	40,6	0,891	754	51,2	4,87	153	39,4
BRA-2	97000	11,9	4,9	1,085	8,25	23,8	64300	63,4	0,532	10200	12,5	549	37,2	24,5	39600	2300	231	1160	1740
BRA-3	1920	16,5	6,2	1,001	8,85	3,20	774	0,855	0,0881	370	5,02	19,6	43,1	1,24	587	48,9	4,25	65,0	21,6
BRA-4	7380	10,4	6,0	1,003	8,80	4,16	1690	1,89	0,0923	686	1,68	28,5	28,8	2,68	1320	72,3	6,67	54,1	37,9

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	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
BRA-1	2889	157	4,08	1,3	45,69	46,51	1,8	BRA-1	-7,72	-68
BRA-2	121493	502	70,2	3,0	2014	2046	1,6	BRA-2	na	na
BRA-3	2134	134	9,72	0,28	32,38	32,78	1,2	BRA-3	-5,57	-59
BRA-4	4188	186	10,7	0,48	66,13	66,19	0,1	BRA-4	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 %

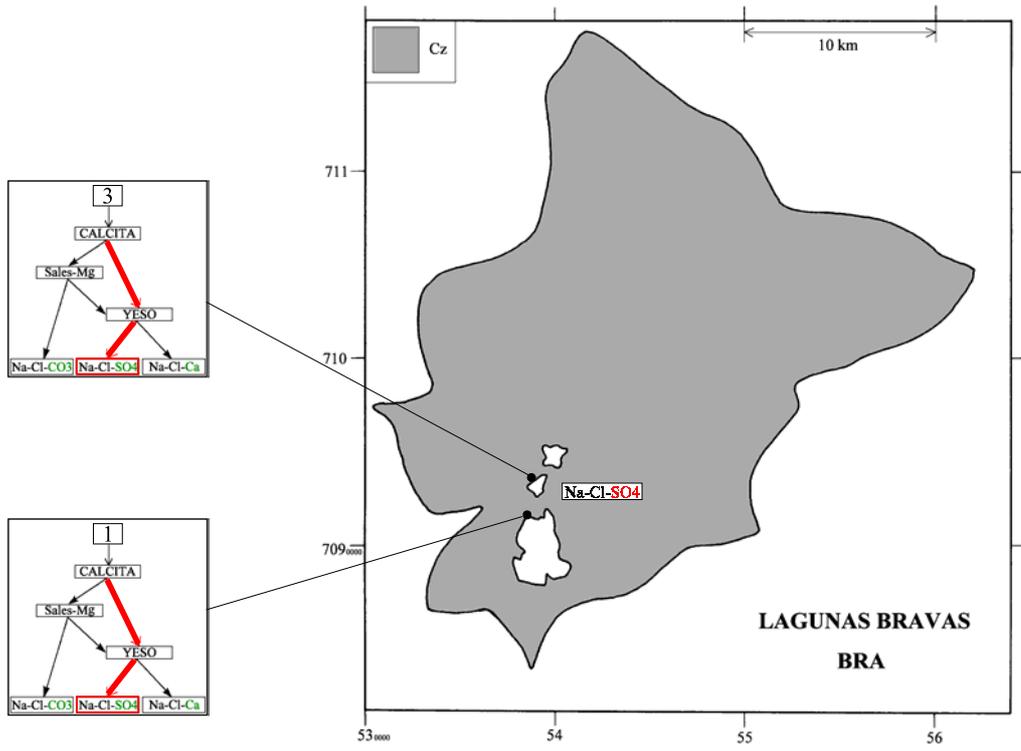
Análisis de oxígeno-18
y deuterio



MAPA GEOLOGICO Y VIAS EVOLUTIVAS

BRA

Cz : *Cenozoico*. Rocas volcánicas: dacitas - andesitas.



LAGUNAS DEL JILGUERO

Introducción

Las lagunas del Jilguero se encuentran en la Cordillera Andina de la Tercera Región al este del salar de Pedernales. Son dos salares de tipo "playa" con sedimentos salinos cubiertos parcialmente por lagunas someras de extensión variable. El cordón que separa las dos lagunas es de muy bajo relieve. Es posible que en años de abundantes precipitaciones las dos lagunas queden unidas en una sola. Las principales características morfométricas y climatológicas de las lagunas son:

- altura: 4150 m
- superficie de la cuenca: 119 km²
- superficie de los salares: 2,3 km² (Este) y 1,1 km² (Oeste)
- superficie de las lagunas: 1 km² (Este) y 0,5 km² (Oeste)
- precipitaciones: 140 mm / año
- evaporación potencial: 1000 mm / año
- temperatura media: -2°C

No hemos encontrado vertientes cuenca arriba. Hemos sacado una muestra de vertiente difusa en la orilla de cada laguna. La vertiente (2) que alimenta la laguna occidental es intermedia entre una vertiente difusa y una fluyente ya que se puede observar el lento movimiento del agua.

Composición de aguas y salmueras

Las composiciones de aguas de las lagunas del Jilguero están presentadas en la tabla 1 y en la figura 1.

<u>APORTES</u>	<u>SALINIDAD</u> mg/l	<u>TIPO QUÍMICO</u>		<u>VÍA EVOLUTIVA</u>
		Cationes	Aniones	
JIL-2	2925	Ca-Na	/ SO4- (Cl)	SO4 (N)
JIL-6	3165	Na- (Ca)	/ Cl-SO4	SO4 (N)
<u>LAGUNAS</u>				
JIL-3	11243	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl-SO4	SO4
JIL-4	11488	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl-SO4	SO4
JIL-1	15463	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl-SO4	SO4
JIL-5	19592	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl-SO4	SO4

Tabla 1 : Salinidades, tipos químicos y vías evolutivas de aguas de las lagunas del Jilguero. SO₄ (N) = vía neutra sulfatada.

Las dos aguas de aporte son salobres (3 g/l), pero tienen composiciones muy distintas. JIL-2 es muy concentrada en sulfato de calcio mientras que JIL-6 lo es en cloruro de sodio (ver también los diagramas circulares). Las lagunas tienen composiciones muy similares. Pertenecen al megagrupo Na / Cl-SO₄, con mas sulfato que calcio.

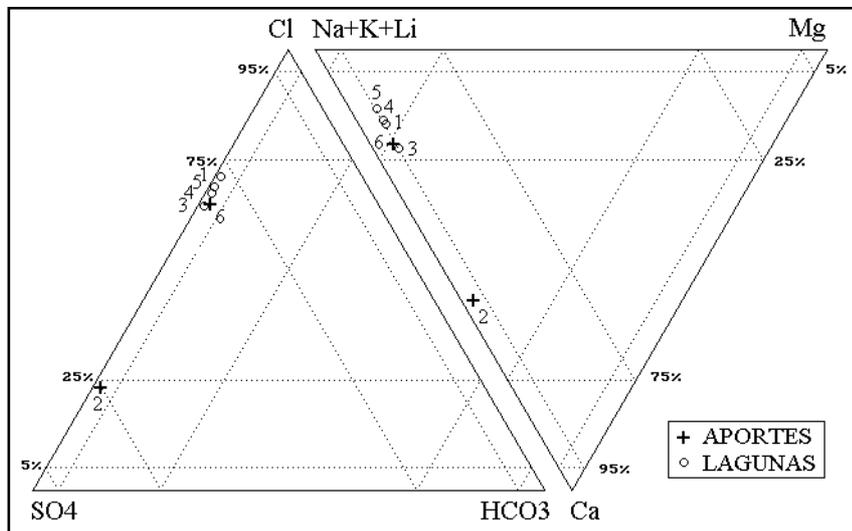


Fig.1: Composición de aguas y salmueras de las lagunas del Jilguero.

Origen de los componentes disueltos

Se puede observar en los diagramas circulares que la suma de los cuatro componentes principales de las dos aguas de aporte: Na+Ca+Cl+SO₄ corresponde al 94 % de su salinidad total. La suma de las concentraciones de todos los demás componentes es de 169 mg/l para JIL-2 y 225 mg/l para JIL-6. A primera vista, eso sugiere una salinización de aguas diluidas por sales evaporíticas como halita (NaCl) y yeso (CaSO₄.2H₂O). Sin embargo, no hay buena relación equimolar entre Na y Cl de una parte y Ca y SO₄ por otra. La salinización podría provenir de salmueras residuales de tipo Na-Ca / Cl-SO₄; en tal caso no hay forzosamente equimolaridad entre Na y Cl y Ca y SO₄.

Hay otra posibilidad. Se puede observar en los diagramas triangulares (Fig.1) que el aporte (6) tiene una composición porcentual muy similar a las lagunas. Eso sugiere que esta agua podría ser una mezcla de una napa diluida con la cuña salina de la laguna. Al contrario, el aporte (2) no tiene influencia de la cuña salina.

Vías evolutivas y relación con la geología

No disponemos del mapa geológico detallado de la zona; solamente sabemos que la cuenca es enteramente volcánica. Los dos aportes siguen la vía evolutiva neutra sulfatada, lo que puede reflejar lixiviación de rocas volcánicas con azufre.

Evolución cuantitativa de aguas

Veamos ahora la evolución cuantitativa de las aguas de aporte cuando se evaporan. La tabla 2 presenta la composición calculada de todas las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta la salinidad de las diversas lagunas. 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 (JIL-xE) y las lagunas (JIL-x.EQ). Todas las composiciones de las lagunas fueron ajustadas al equilibrio con los minerales que las sobresaturan.

Notamos que todas las aguas de lagunas tienen un muy buen coeficiente de desviación con el aporte evaporado 6E y menos bueno con el aporte evaporado 2E. Sin embargo, llama la atención que la muestra de laguna JIL-1, muy cerca de la vertiente 2, tenga también una muy buena relación con el aporte evaporado 6E de la otra laguna. Se puede adelantar dos hipótesis:

- la napa que se vierte en la laguna oriental también alimenta la laguna occidental por descarga difusa a lo largo de las orillas norte y este. La vertiente (2) sería un aporte menor a la laguna occidental.

- la vertiente oriental (6) proviene de una napa diluida salinizada por la cuña salina de la laguna. La laguna occidental estaría alimentada en parte por la vertiente (2) y por otro aporte no muestreado, probablemente una descarga de napa por su orilla norte o este.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
<u>JIL-1.EQ</u>	8,08	1,22	6270	3190	78,0	25,8	4110	489	12,9	759	165	
JIL-6E	8,04	1,07	6040	3540	61,7	31,7	4270	330	13,1	758	146	0,028
JIL-2E	8,15	1,43	3960	5630	69,9	32,1	3980	751	9,43	533	140	0,099
<u>JIL-3.EQ</u>	8,09	1,02	4050	2730	50,8	26,3	2730	344	8,47	686	109	
JIL-6E	8,04	0,887	4060	2800	41,5	32,2	2870	222	8,81	689	98,5	0,029
JIL-2E	8,12	1,12	2670	4210	47,1	32,5	2680	506	6,35	534	94,5	0,071
<u>JIL-4.EQ</u>	8,13	1,13	4390	2730	50,6	26,2	3110	286	9,72	562	117	
JIL-6E	8,04	0,895	4270	2930	43,6	32,2	3020	233	9,26	719	104	0,019
JIL-2E	8,13	1,16	2820	4380	49,9	32,4	2840	536	6,73	534	100	0,099
<u>JIL-5.EQ</u>	8,11	1,46	7680	4250	89,7	25,5	5500	501	17,2	706	204	
JIL-6E	8,05	1,25	7840	4120	80,1	31,2	5540	428	17,0	782	190	0,010
JIL-2E	8,16	1,71	5090	6890	90,0	31,8	5120	966	12,1	535	180	0,105

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

Con los pocos datos que tenemos no se puede zanjar entre las dos hipótesis. Sin embargo, parece extraño que la vertiente semi-difusa (2), bien notoria en terreno, tenga un papel secundario en el quimismo de la laguna occidental. Por eso tenemos preferencia por la hipótesis de la cuña salina.

Calidad de aguas

Ninguna de las dos aguas de aporte cumple con las normas chilenas de potabilidad o de riego. Las dos aguas de aporte además de elevada salinidad, tienen exceso de boro para riego y 10 veces más arsénico que el máximo permitido por la norma para uso potable.

Balance hídrico

Podemos establecer un orden de magnitud de los aportes a cada laguna. No se puede estimar las infiltraciones porque no tenemos bien definidos los aportes. Los parámetros considerados son :

- $H_e = 1$ m/año
- $H_p = 0,14$ m/año
- S (oeste) = 1 km²
- S (este) = $0,5$ km²

Volumen de aporte a la laguna oeste: $V_{ap} = S(H_e - H_p) = 860\ 000$ m³/año ~ 27 l/s

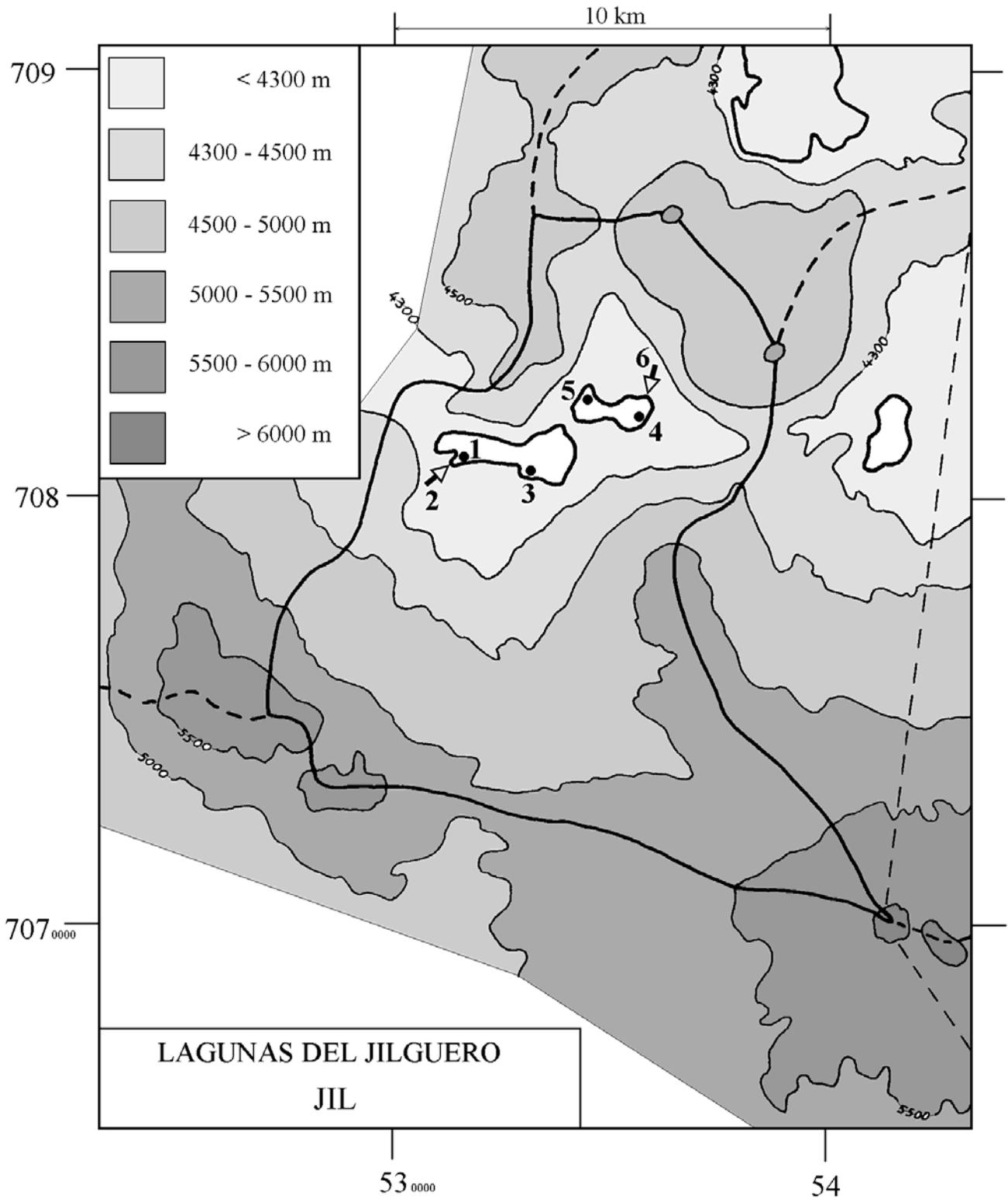
Volumen de aporte a la laguna este: $V_{ap} = S(H_e - H_p) = 430\ 000$ m³/año ~ 14 l/s

En total, entran muy aproximadamente unos 40 l/s en las dos lagunas del Jilguero.

Conclusiones

Las lagunas del Jilguero tienen una composición química homogénea de tipo Na / Cl-SO₄ con proporciones menores de Ca y Mg. Queda pendiente el problema del origen de la alta salinidad de los dos aportes encontrados. El aporte de tipo Ca-Na / SO₄, a la laguna occidental, es probablemente salinizado por antiguas evaporitas, o salmueras residuales asociadas, con alto contenido de sulfato de calcio. El aporte de tipo Na / Cl-SO₄, a la laguna oriental, puede ser afectado por la cuña salina o también por antiguas evaporitas o salmueras con alto contenido de cloruro de sodio. Las potencialidades de la cuenca para recursos de agua no es muy alentadora. Las aguas de aporte son de mala calidad y la redisolución de antiguas evaporitas puede afectar las napas cuenca arriba.

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



LAGUNAS DEL JILGUERO
JIL

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
JIL-1	12/11/95	12 ^H 00	531163	7080900	4150	Laguna
JIL-2	12/11/95	12 ^H 30	531150	7080890	4150	Manantial difuso
JIL-3	12/11/95	12 ^H 45	533030	7080385	4150	Poza de preconcentración
JIL-4	12/11/95	16 ^H 00	535830	7081862	4150	Laguna
JIL-5	12/11/95	16 ^H 30	534480	7082705	4150	Laguna
JIL-6	12/11/95	17 ^H 00	535865	7082372	4151	Manantial difuso

NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
JIL-1	13300	7,7	5,9	1,012	8,50	3,02	6280	8,07	0,345	3270	2,27	77,9	45,4	2,35	4090	489	12,9	830	165
JIL-2	2210	12,1	6,0	1,001	8,35	0,714	353	0,581	0,0754	1560	7,25	6,23	30,8	0,48	354	66,9	0,84	489	12,5
JIL-3	9400	11	6,0	1,009	8,50	2,47	4080	5,35	0,263	2930	2,98	50,8	49,3	1,65	2710	344	8,47	798	109
JIL-4	9400	18	5,7	1,009	8,40	2,53	4370	5,31	0,164	2730	8,18	50,6	46,5	1,65	3130	286	9,72	589	117
JIL-5	16000	16	6,2	1,015	8,35	3,77	7630	9,03	0,230	4480	8,18	89,6	49,8	2,80	5520	500	17,1	850	204
JIL-6	2900	18,9	4,5	1,002	8,48	1,17	1150	1,02	0,0643	786	10,3	11,6	39,5	0,48	791	61,8	2,46	213	27,5

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.

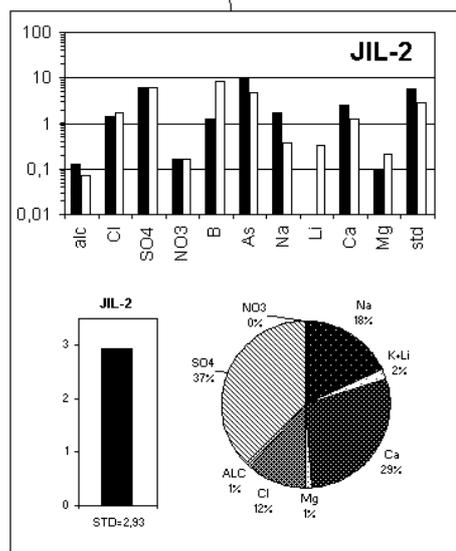
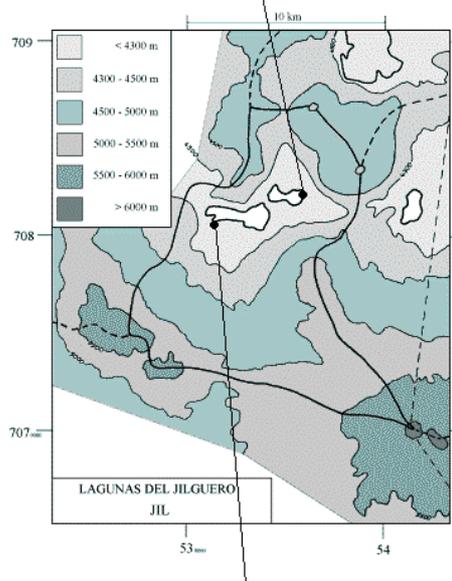
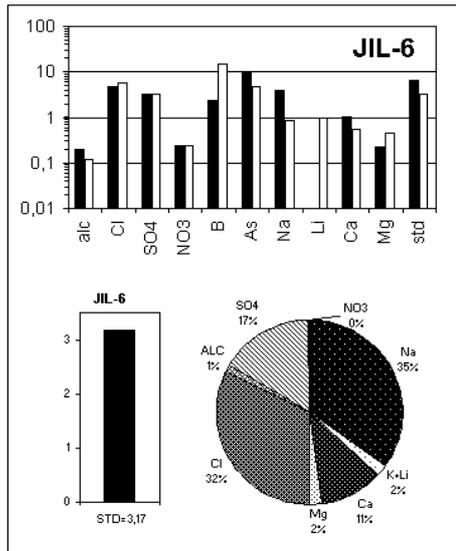
NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF. %	NUMERO	δ ¹⁸ O	δ ² H
JIL-1	15463	81,7	6,12	0,39	247,3	248,3	0,4	JIL-1	na	na
JIL-2	2925	34,2	1,56	0,25	42,66	43,16	1,2	JIL-2	-8,42	-73
JIL-3	11243	76,3	6,06	0,34	176,8	178,5	1,0	JIL-3	na	na
JIL-4	11488	85,4	5,76	0,42	183,7	182,5	0,7	JIL-4	na	na
JIL-5	19592	117	8,10	0,62	314,5	312,3	0,7	JIL-5	na	na
JIL-6	3165	50,5	2,58	0,23	49,21	50,02	1,6	JIL-6	-5,49	-60

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

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

DIF.% = diferencia en %

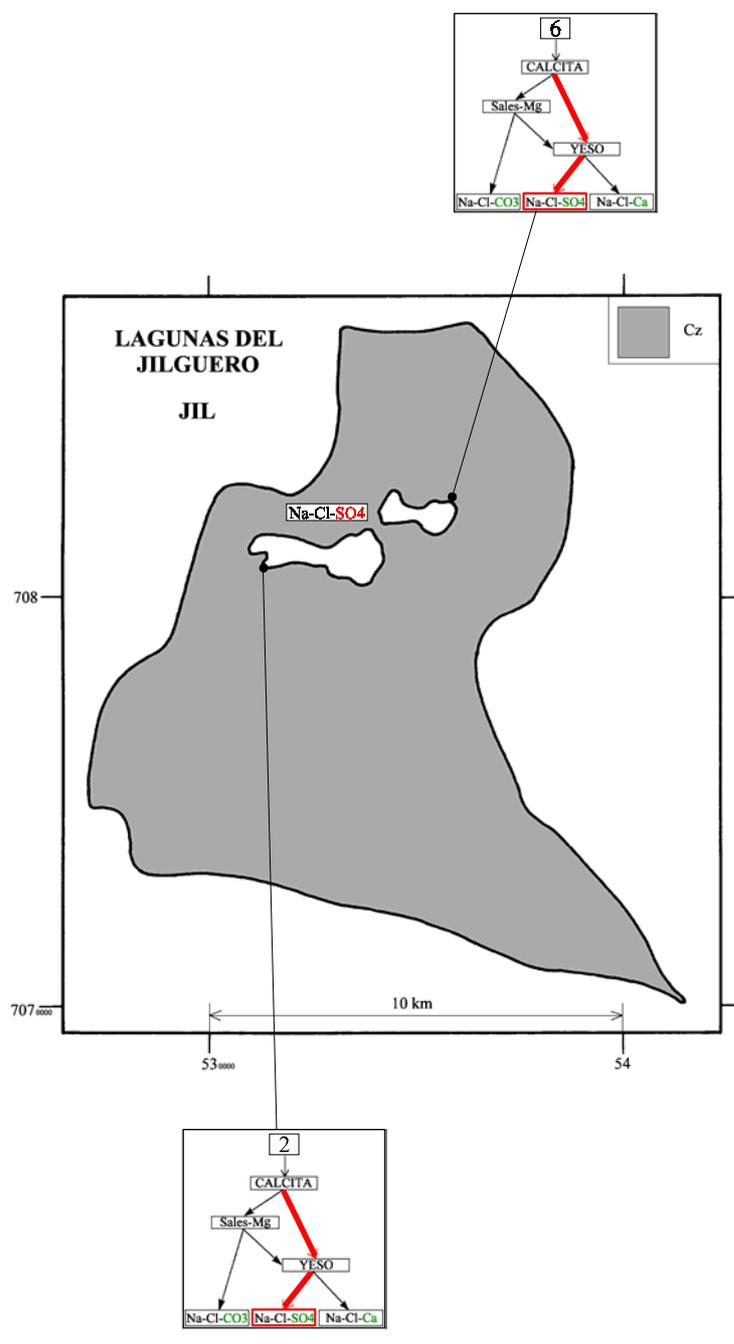
Análisis de oxígeno-18
y deuterio



MAPA GEOLOGICO Y VIAS EVOLUTIVAS

JIL

Cz : *Cenozoico*. Rocas volcánicas: dacitas - andesitas.



LAGUNA DEL BAYO

Introducción

La laguna del Bayo se encuentra en la Cordillera Andina de la Tercera Región colindante a la frontera con Argentina. Aunque la laguna misma está en territorio chileno, a unos 800 m de la frontera, el 76 % de la cuenca de drenaje está en territorio argentino. No se trata de una laguna somera de superficie variable, sino que más bien se asemeja a un pequeño lago cuya profundidad se desconoce. Las principales características morfológicas y climatológicas de la laguna son:

- altura: 4250 m
- superficie de la cuenca: 221 km²
- superficie de la laguna: 1,2 km²
- precipitaciones: 140 mm/año
- evaporación potencial: 1000 mm/año
- temperatura media: -2°C

Hemos encontrado una sola vertiente difusa en su orilla oriental. Medidas de salinidad mediante conductividad eléctrica en varios lugares del lago, indicaron una buena homogeneidad de las aguas. Tenemos solamente dos muestras: la vertiente y la laguna.

Composición de aguas y salmueras

Las composiciones de aguas de la laguna del Bayo están presentadas en la figura 1 y en la tabla 1.

	<u>SALINIDAD</u>	<u>TIPO QUÍMICO</u>		<u>VIA EVOLUTIVA</u>
	mg/l	Cationes	Aniones	
VERTIENTE : BAY-2	2432	Na- (Ca)	/ SO4-Cl	SO4 (N)
LAGUNA : BAY-1	4785	Na-Ca	/ SO4-Cl	SO4

Tabla 1 : Salinidades, tipos químicos y vías evolutivas de aguas de la laguna del Bayo
Ca = vía cálcica

Las aguas de la vertiente y de la laguna son salobres. La salinidad de la laguna es solamente el doble de la vertiente. Es la laguna cerrada más diluida que hemos encontrado en la Tercera Región (laguna Santa Rosa en salar de Maricunga no es cerrada). La vertiente y la laguna tienen composiciones muy parecidas. La suma Na+Ca+Cl+SO₄ constituye el 91 % de su salinidad total. La laguna pertenece al mega -grupo sulfatado con más sulfato que calcio.

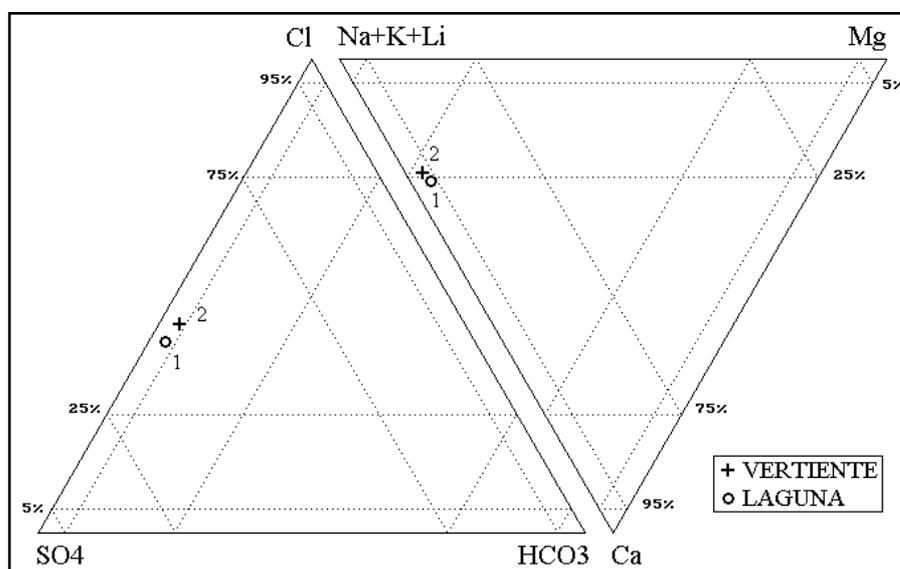


Fig.1 : Composición de aguas de la laguna del Bayo

Origen de los componentes disueltos

Se puede hacer dos observaciones:

- no existe ninguna relación equimolar entre los cuatro componentes mayores : Na, Ca, Cl y SO₄ (ver diagramas circulares).

- el agua de la vertiente difusa es muy parecida al agua de la laguna.

Eso sugiere que la vertiente recicla agua de la laguna, mezclando agua de napa diluida con la cuña salina. La composición de la vertiente no puede provenir de la disolución de cloruro de sodio y de sulfato de calcio. En cuanto a salmueras residuales salinizantes, son casi siempre de tipo Na-Ca / Cl o Na-Mg / Cl. No existen salmueras con alto contenido de SO₄ y Ca.

Vías evolutivas y relación con la geología

No disponemos del mapa geológico detallado de la zona; solamente sabemos que la cuenca es enteramente volcánica. El único aporte sigue la vía evolutiva neutra sulfatada, lo que puede reflejar una cuenca de rocas volcánicas con azufre.

Calidad de aguas

El agua de aporte no cumple con las normas de potabilidad o de riego ya que tiene una salinidad elevada y 10 veces más arsénico que el máximo permitido. El alto contenido de boro dificulta su uso para riego. Sin embargo, si se supone que la vertiente es salinizada por la laguna, la napa cuenca arriba, en territorio argentino, podría ser diluida.

Balance hídrico

Solamente podemos adelantar un orden de magnitud de los aportes, pero no de las infiltraciones, pues no conocemos la verdadera composición de los aportes diluidos. Los parámetros considerados son :

- $H_e = 1$ m/año
- $H_p = 0,14$ m/año
- $S = 1,2$ km²

Volumen de aporte :

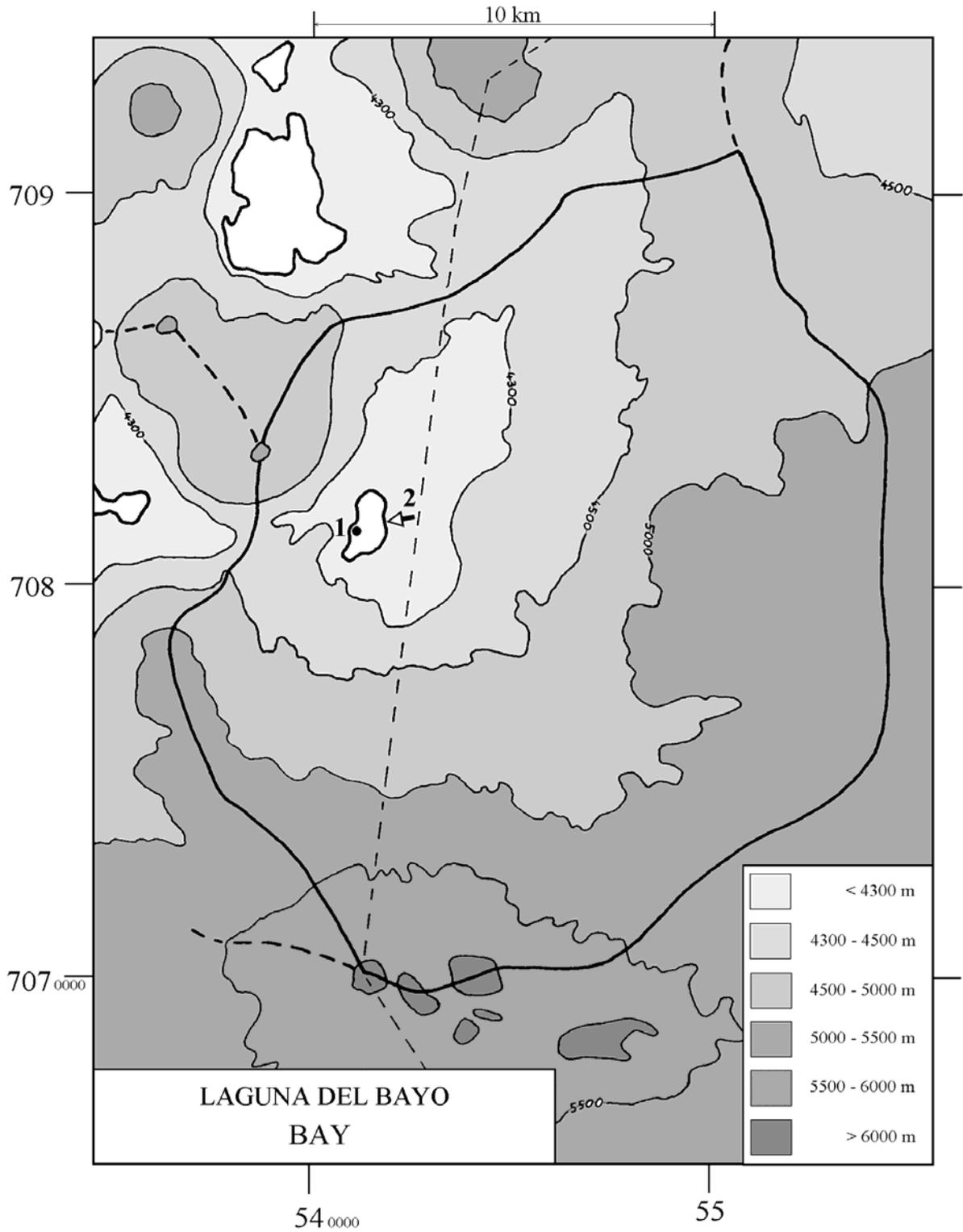
$$V_{ap} = S(H_e - H_p) = 1\,000\,000 \text{ m}^3/\text{año} = 33 \text{ l/s}$$

El hecho que la laguna no sea muy salada, implica forzosamente que las infiltraciones son elevadas. El caudal entrante es un poco superior al valor calculado de 33 l/s, deducido sin tomar en cuenta las infiltraciones.

Conclusiones

La laguna del Bayo es un pequeño lago de cierta profundidad (desconocida) y de baja salinidad. Más del 90% de su salinidad proviene de cuatro componentes: Na, Ca, Cl y SO₄. Aunque las aguas del lago no son aprovechables para uso doméstico o de riego, no hay que descartarlas definitivamente. En este sector de la Tercera Región, es la más importante reserva de agua no salada, sino solamente salobre.

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



**LAGUNA DEL BAYO
BAY**

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
BAY-1	12/11/95	13 ^H 30	540956	7081204	4250	Laguna
BAY-2	12/11/95	14 ^H 30	541815	7081458	4252	Manantial difuso

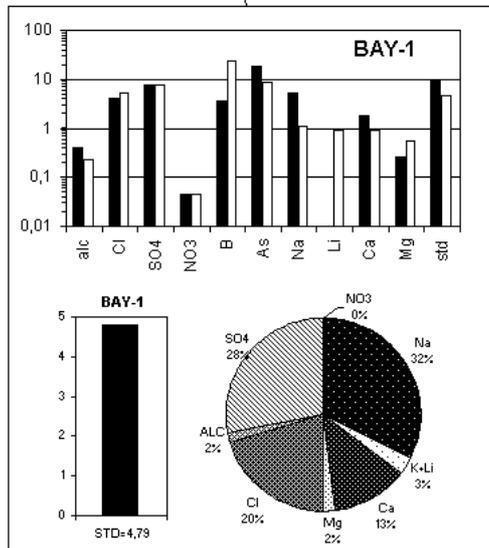
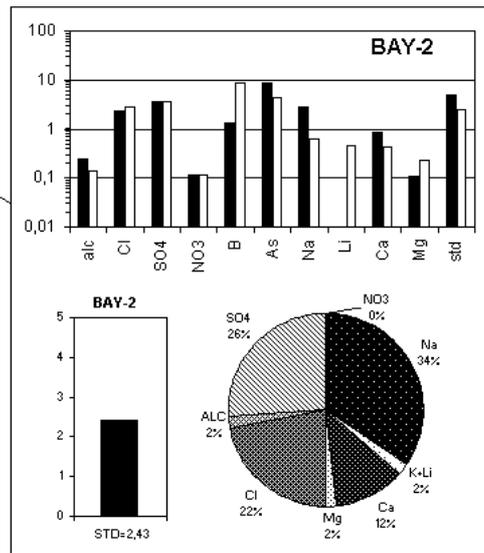
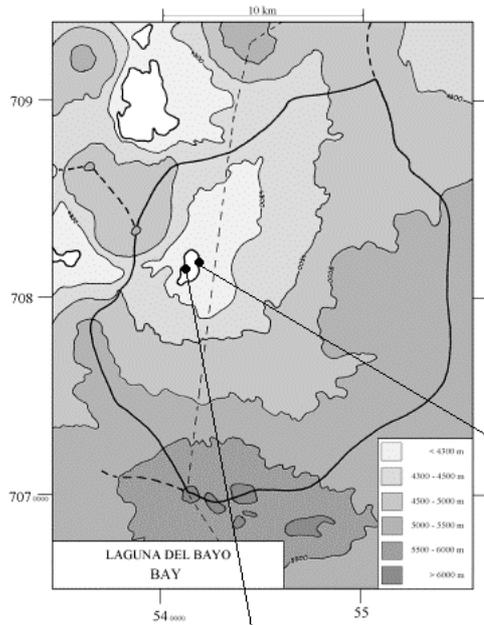
NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
BAY-1	6160	13	6,5	1,004	8,55	2,27	1030	1,81	0,092	1960	2,01	18,4	45,6	0,899	1040	149	2,24	365	33,0
BAY-2	2100	17,5	6,1	1,002	8,63	1,42	564	0,567	0,055	912	5,20	6,50	50,4	0,432	566	48,5	1,13	173	13,6

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
BAY-1	4785	102	6,06	0,43	70,35	72,0	2,3	BAY-1	na	na
BAY-2	2432	64,1	3,84	0,22	35,76	36,4	1,8	BAY-2	-4,19	-51

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

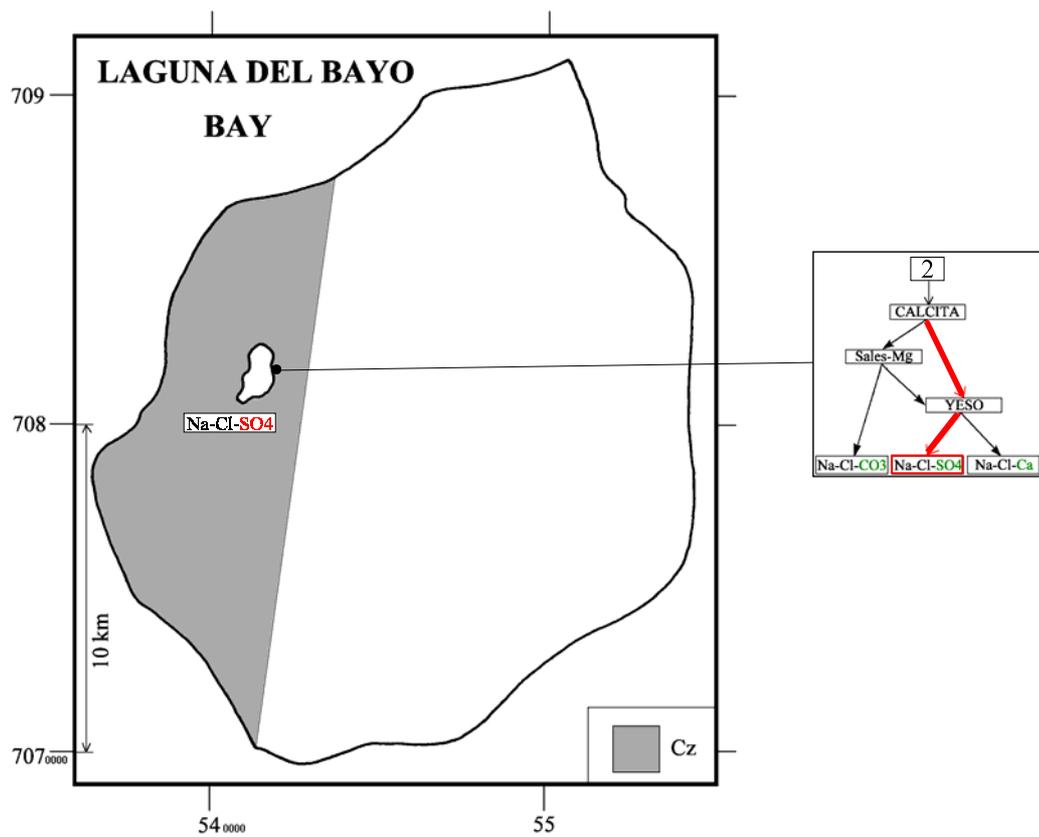
Análisis de oxígeno-18
 y deuterio



MAPA GEOLOGICO Y VIAS EVOLUTIVAS

BAY

Cz : *Cenozoico*. Rocas volcánicas: dacitas - andesitas.



SALAR DE WHEELWRIGHT

Introducción

El salar de Wheelwright se encuentra en la Cordillera de los Andes de la Tercera Región en una zona de muy difícil acceso, al norte de Laguna Verde y al este del salar de Pedernales. Es un salar de tipo "playa" con un sistema complejo de lagunas someras. Sus principales características morfológicas y climatológicas son:

- altura: 4220 m
- superficie de la cuenca: 466 km²
- superficie del salar: 6,3 km²
- superficie de las lagunas: 4 km²
- precipitaciones: 140 mm/año
- evaporación potencial: 1000 mm/año
- temperatura media: 1°C

Hemos encontrado un río, una vertiente fluyente y dos difusas, todos cerca del salar.

Composición de aguas y salmueras

Las composiciones de aguas del salar de Wheelwright están presentadas en la figura 1 y en la tabla 1. Todos los aportes son salobres (1,5 - 6 g/l). La composición química de los aportes y de las lagunas es bien homogénea y se caracteriza por su alto contenido porcentual en calcio. Las salmueras son todas cálcicas.

<u>APORTES</u>	<u>SALINIDAD</u> mg/l	<u>TIPO QUÍMICO</u>		<u>VIA EVOLUTIVA</u>
		Cationes	Aniones	
WHE-9	1470	Na-Ca /	Cl- (SO4)	Ca
WHE-3	3119	Na-Ca /	Cl- (SO4)	Ca
WHE-7	5851	Na-Ca /	Cl	Ca
WHE-1	5961	Na-Ca /	Cl	Ca
<u>LAGUNAS</u>				
WHE-8	10457	Na-Ca /	Cl	Ca
WHE-4	19468	Na-Ca /	Cl	Ca
WHE-6	40960	Na-Ca /	Cl	Ca
WHE-5	143446	Na-Ca /	Cl	Ca
WHE-2	158742	Na-Ca /	Cl	Ca

Tabla 1 : Salinidades, tipos químicos y vías evolutivas de aguas del salar de Wheelwright. Ca = vía cálcica.

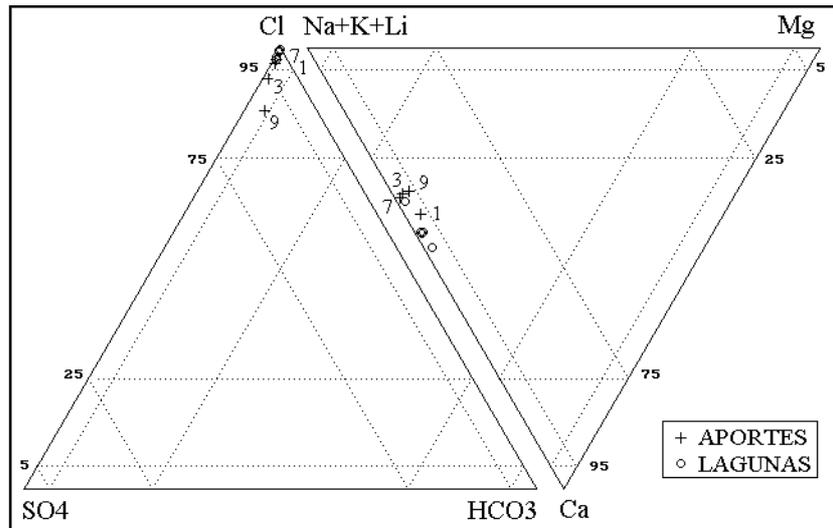


Fig.1: Composición de aguas y salmueras del salar de Wheelwright

Origen de los componentes disueltos

La única relación de equimolaridad entre componentes mayores que se haya encontrado es entre Na+Ca y Cl (Fig.2). La suma Na+Ca +Cl corresponde al 83 % de la salinidad de WHE-9, y a más del 90 % de los tres otros aportes. Eso sugiere una salinización de aguas diluidas por salmueras residuales de cloruro de sodio y calcio de un antiguo salar recubierto por formaciones volcánicas. No se trata de la redisolución de sales cristalizadas porque el cloruro de calcio es una sal extremadamente soluble que solamente precipita a temperaturas muy bajas que no se encuentran en el ambiente andino.

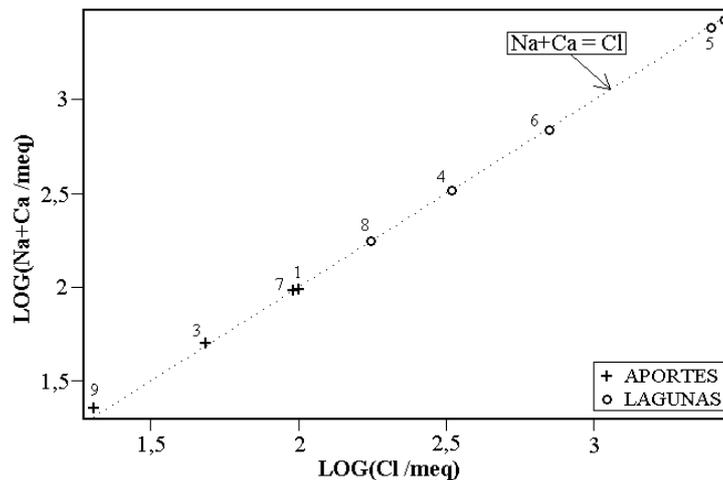


Fig.2 : Relación entre Na+Ca y Cl en aguas del salar de Wheelwright

Vías evolutivas y relación con la geología

La vía evolutiva cálcica caracteriza aguas que drenan terrenos sedimentarios. No disponemos del mapa geológico detallado del sector de Wheelwright; solamente sabemos por el mapa general que la cuenca es enteramente volcánica. Las aguas de aporte no tienen relación con la litología de la cuenca, lo que está totalmente en acuerdo con el origen de la mayor parte de los componentes por disolución de antiguas salmueras.

Evolución cuantitativa de aguas

Veamos ahora la evolución cuantitativa de las aguas de aporte cuando se evaporan. La tabla 2 presenta la composición calculada de todas las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta la salinidad de las diversas lagunas. 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 (WHE-xE) y las lagunas (WHE-x.EQ). Todas las composiciones de las lagunas fueron ajustadas al equilibrio con los minerales que las sobresaturan.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
<u>WHE-8.EQ</u>	7,85	0,482	6230	179	21,5	28,5	2260	85,6	7,29	1520	29,2	
WHE-7E	7,87	0,514	6160	245	22,1	31,9	2590	126	8,05	1210	25,1	0,036
WHE-1E	7,85	0,484	6270	178	21,6	31,9	2380	105	7,52	1360	70,9	0,077
WHE-3E	7,89	0,522	5960	497	20,8	32,0	2550	114	7,40	1150	81,3	0,197
WHE-9E	7,91	0,564	5580	885	23,5	32,0	2620	143	7,42	1080	46,7	0,240
<u>WHE-4.EQ</u>	7,76	0,506	11700	266	38,6	27,6	4250	175	13,7	2820	55,9	
WHE-7E	7,78	0,551	11500	457	41,2	30,8	4840	235	15,0	2240	46,9	0,049
WHE-1E	7,76	0,525	11700	333	40,3	30,8	4440	196	14,0	2530	132	0,075
WHE-3E	7,81	0,558	11100	927	38,9	30,8	4760	213	13,8	2140	152	0,222
WHE-9E	7,82	0,606	10400	1630	44,0	30,9	4890	268	13,9	2000	87,2	0,261
<u>WHE-6.EQ</u>	7,64	0,641	25200	237	72,3	25,4	8470	252	28,5	6490	147	
WHE-1E	7,65	0,746	24600	701	84,9	28,3	9360	413	29,5	5320	279	0,168
WHE-7E	7,67	0,761	24200	962	86,8	28,3	10200	495	31,6	4710	98,8	0,223
WHE-3E	7,69	0,774	23800	1480	83,3	28,2	10200	457	29,6	4370	325	0,323
WHE-9E	7,72	0,888	23500	1680	98,9	28,2	11000	602	31,2	3670	196	0,352
<u>WHE-5.EQ</u>	6,45	1,10	88200	580	391	16,2	31600	786	93	21000	525	
WHE-1E	7,29	2,47	88000	916	303	17,9	33400	1480	105	18300	995	0,108
WHE-7E	7,33	2,47	87100	1020	313	17,9	36700	1780	114	15900	356	0,127
WHE-3E	7,36	2,51	87400	1120	305	17,6	37400	1670	108	14200	1190	0,181
WHE-9E	7,40	2,85	86500	1330	364	17,5	40500	2220	115	11500	723	0,211
<u>WHE-2.EQ</u>	6,26	1,16	97600	307	240	14,7	39600	833	92,3	19100	544	
WHE-1E	7,24	2,72	96900	850	334	16,7	36800	1620	116	20100	1100	0,195
WHE-7E	7,28	2,72	95900	954	344	16,7	40400	1960	125	17500	392	0,208
WHE-3E	7,32	2,77	96200	1040	336	16,3	41200	1840	120	15600	1310	0,270
WHE-9E	7,36	3,14	95300	1250	402	16,3	44700	2450	127	12600	797	0,314

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

Se observa que la principal alimentación al salar proviene del río (1) y de la vertiente difusa (7). Las lagunitas sur (8) y (4) provienen de la vertiente difusa (7) con un buen coeficiente de desviación. Las demás lagunas presentan un coeficiente de desviación con los aportes (1) y (7) no muy bueno. Hemos tratado de evaporar mezclas de los dos aportes, sin mejora significativa. Al revisar las composiciones de los aportes evaporados, se aprecia que casi todas las lagunas presentan un importante déficit en SO_4 y K en relación a las concentraciones de esos aportes. Este déficit que produce una desviación mediocre. Debe ocurrir algunos procesos geoquímicos no previstos en el modelo, probablemente interacciones entre aguas y sedimentos. El problema queda pendiente.

Calidad de aguas

Ningún agua de aporte cumple con las normas chilenas de potabilidad o de riego. La menos mala es la vertiente difusa (9) que contiene 5 veces más arsénico que la norma potable y una alta concentración de boro que desaconseja su uso en riego. De manera sorprendente, es el aporte más concentrado (río 1) el que tiene menos arsénico: justo el máximo permitido por la norma.

Balance hídrico

Podemos establecer un orden de magnitud del balance hídrico del sistema lagunar del salar asumiendo que su alimentación proviene del río (1) y de la vertiente difusa (7). Se utiliza el cloruro como elemento conservativo. La evaporación de la laguna se ha reducido en 15% en relación a la evaporación potencial para tomar en cuenta su salinidad elevada (150 g/l). Los parámetros considerados son :

- $H_e = (1 - 0,15) = 0,85$ m/año
- $H_p = 0,14$ m/año
- $S = 4$ km²
- $C_{ap} = 3,5$ g/l
- $C_L = 90$ g/l

Volumen de aporte : $V_{ap} = S(H_e - H_p)/(1 - C_{ap}/C_L) = 2\,950\,000$ m³/año = 94 l/s

Volumen de infiltraciones : $V_i = S(H_e - H_p)/(1 - C_L/C_{ap}) = 115\,000$ m³/año ~ 4 l/s

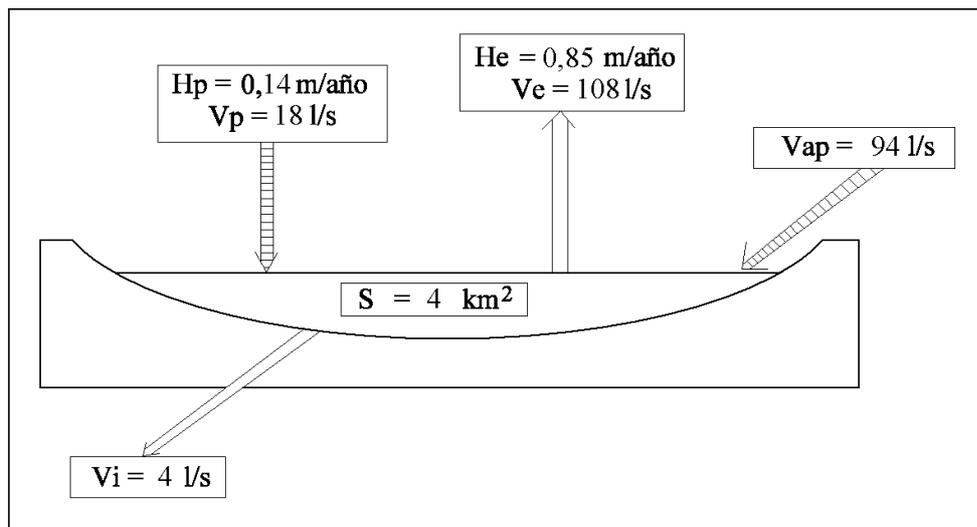
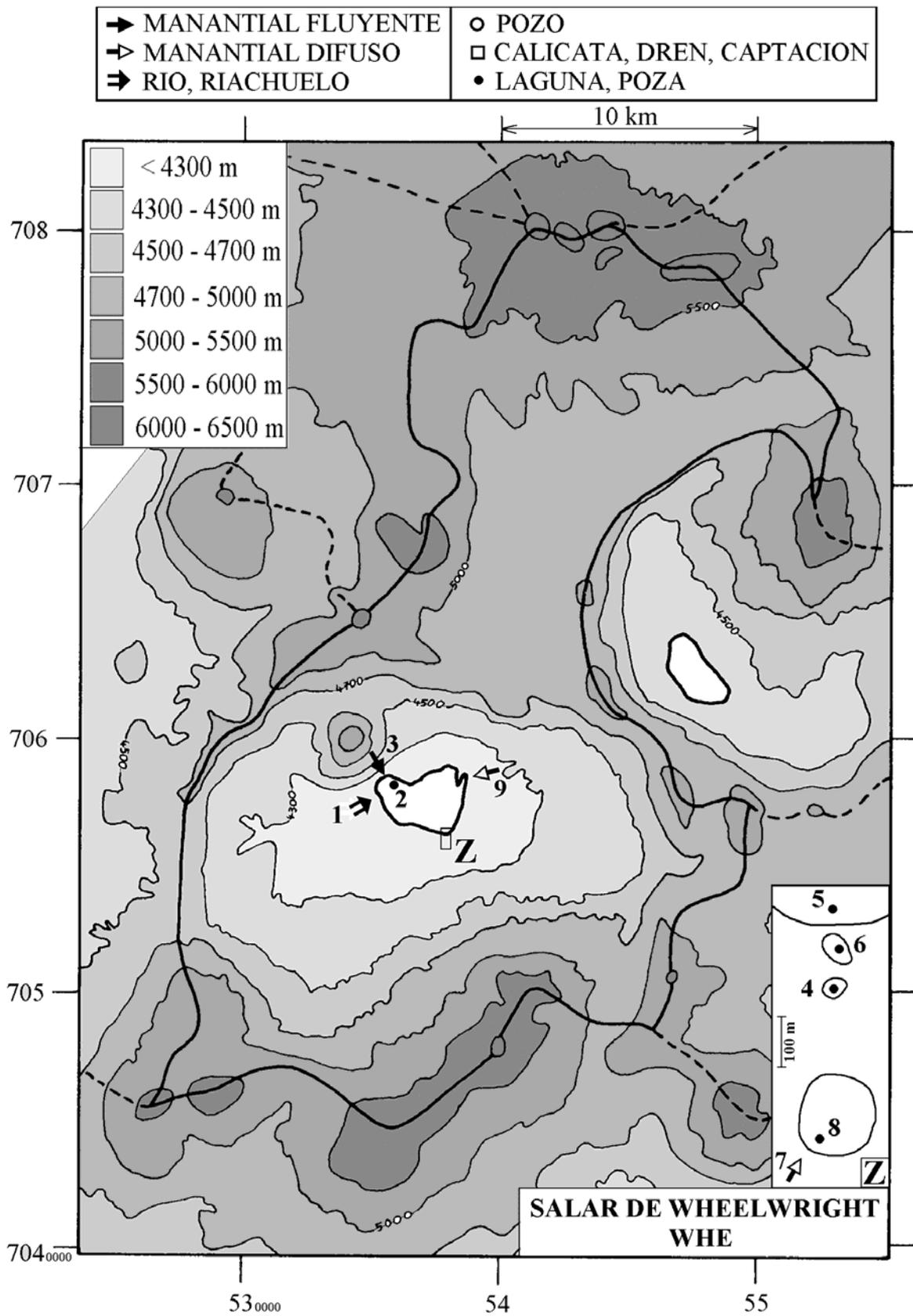


Fig.3 : Balance hídrico del sistema lagunar del salar de Wheelwright.

El orden de magnitud de los aportes superficiales al salar es entonces de 90 - 100 l/s.

Conclusiones

El salar de Wheelwright es uno de los salares del grupo Na-Ca / Cl mas típico. Sus aguas de aporte contienen hasta 95 % de estos tres componentes. Las salmueras también son de este tipo. Los tres componentes Na, Ca y Cl provienen probablemente de la salinización de aguas diluidas por salmueras residuales de un antiguo salar. Debido a este proceso, todas las aguas de aporte son de mala calidad, y es posible que las napas cuenca arriba también lo sean. El salar de Wheelwright no presenta entonces buenas potencialidades para recursos de agua potable.



SALAR DE WHEELWRIGHT
WHE

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
WHE-1	08/12/96	12 ^H 20	535138	7047539	4230	Río con pequeñas pozas
WHE-2	08/15/96	13 ^H 00	535710	7048480	4220	Laguna
WHE-3	08/15/96	13 ^H 20	535414	7048439	4221	Manantial corriente
WHE-4	08/12/96	14 ^H 40	537864	7046138	4220	Poza de preconcentración
WHE-5	08/12/96	14 ^H 50	537869	7046288	4220	Laguna pequeña
WHE-6	08/12/96	15 ^H 00	537874	7046213	4220	Poza de preconcentración
WHE-7	08/12/96	15 ^H 15	537802	7045824	4221	Manantial difuso
WHE-8	08/12/96	15 ^H 20	537838	7045860	4220	Laguna pequeña
WHE-9	08/12/96	15 ^H 55	538787	7048397	4225	Manantial difuso

NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
WHE-1	10600	14,6	5,8	1,005	7,81	0,573	3550	0,903	0,0551	101	6,06	12,2	30,0	0,053	1340	59,4	4,25	774	40,1
WHE-2	174400	20,5	2,6	1,111	6,82	4,35	97600	21,6	0,444	307	30,9	240	31,6	1,23	39600	833	92,3	19200	544
WHE-3	5570	18,6	5,4	1,003	7,26	0,633	1730	0,417	0,0199	145	6,01	6,08	33,9	0,156	750	33,3	2,16	346	23,7
WHE-4	31000	15,8	4,8	1,015	7,83	1,21	11700	3,35	0,162	266	3,56	38,6	46,5	1,53	4280	175	13,7	2830	55,9
WHE-5	162700	18,3	2,9	1,103	6,95	3,56	88000	23,2	0,633	580	14,9	391	40,9	2,49	31700	786	93,0	21000	525
WHE-6	61200	16,7	4,4	1,031	7,39	0,826	25100	7,66	0,195	237	5,62	72,3	44,5	0,951	8490	252	28,5	6500	147
WHE-7	10280	14,6	5,9	1,005	8,19	0,661	3410	0,975	0,106	135	11,8	12,2	43,7	0,730	1430	69,6	4,45	674	13,9
WHE-8	17580	14,6	5,6	1,008	8,52	1,10	6210	2,04	0,162	179	2,75	21,5	37,2	1,20	2280	85,6	7,29	1530	29,2
WHE-9	2530	15	4,9	1,001	8,14	0,979	717	0,252	0,0204	114	0,62	3,04	47,0	0,265	340	18,5	0,958	158	6,03

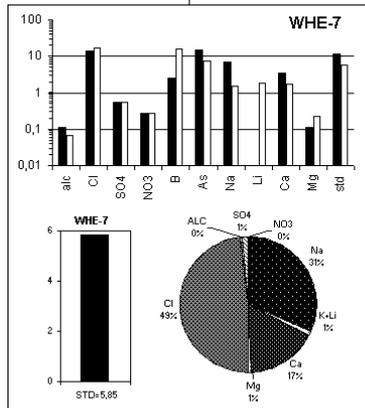
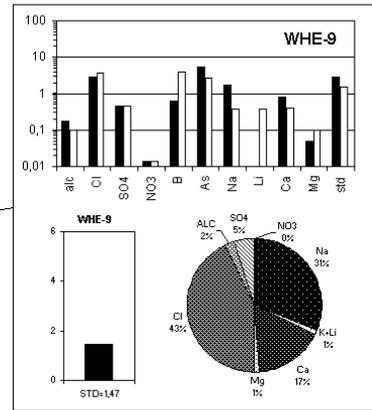
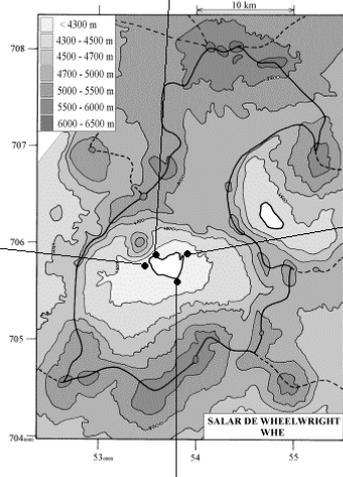
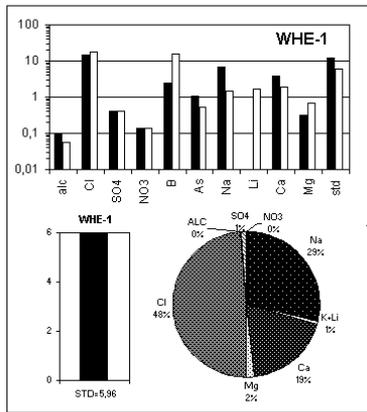
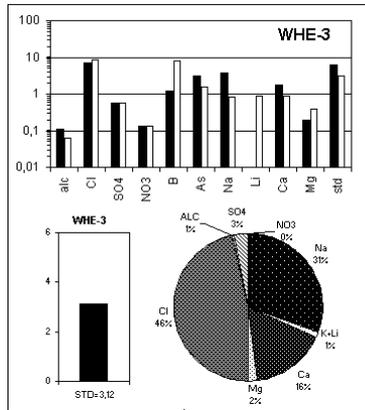
T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l.

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
WHE-1	5961	29,5	0,66	0,66	102,4	102,8	0,3	WHE-3	-9,77	-78
WHE-2	158742	176	10,0	48	2757	2761	0,1			
WHE-3	3119	37,6	0,18	2,9	52,95	52,45	1,0			
WHE-4	19468	48,1	2,58	1,0	338,2	335,8	0,7			
WHE-5	143446	64,1	4,80	15	2505	2496	0,4			
WHE-6	40960	25,1	1,02	1,5	715,6	713,9	0,3			
WHE-7	5851	28,1	1,26	0,27	99,26	99,77	0,5			
WHE-8	10457	23,8	3,90	0,11	181,0	179,9	0,7			
WHE-9	1470	54,6	1,02	0,62	23,79	23,57	0,9			

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

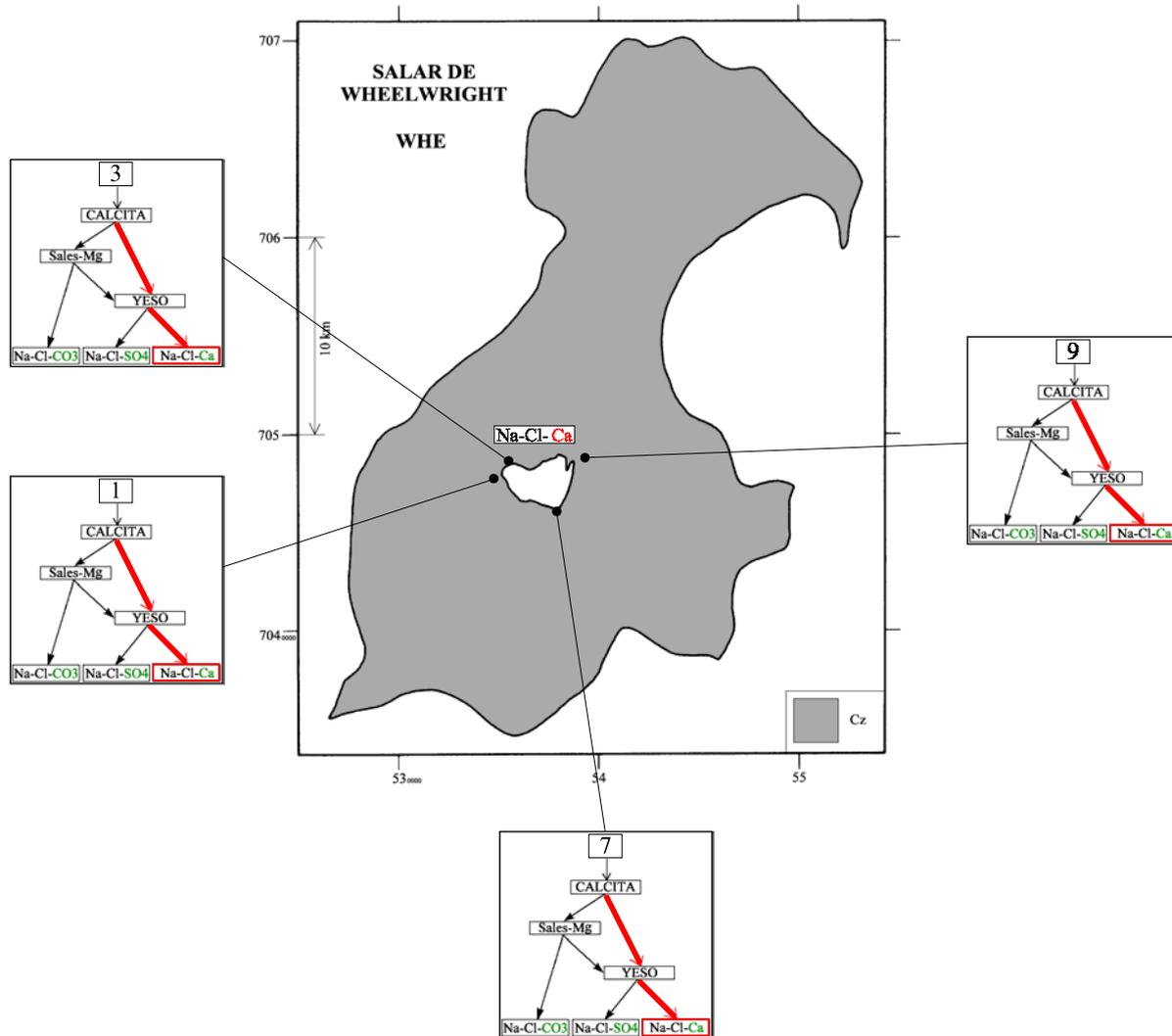
S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l); DIF.% = diferencia en %



MAPA GEOLOGICO
Y
VIAS EVOLUTIVAS

WHE

Cz : *Cenozoico*. Rocas volcánicas: dacitas - andesitas.



LAGUNA ESCONDIDA

Introducción

La laguna Escondida se encuentra en la Cordillera Andina de la Tercera Región al norte de laguna Verde. La frontera con Argentina pasa a dentro de la cuenca a unos tres kilómetros al este de la laguna. La laguna se encuentra en el fondo de una caldera volcánica con laderas muy empinadas. De todos los salares y lagunas de la Cordillera Chilena, es el de más difícil acceso. Es imposible llegar en vehículo a la laguna, por lo menos desde el lado chileno. En nuestra campaña, llegamos en jeep hasta un portezuelo a 4700 m de altura, y desde allí bajamos a pie hasta la laguna. Las principales características morfométricas y climatológicas de la laguna son:

- altura: 4353 m
- superficie de la cuenca: 194 km²
- superficie del salar: 3,8 km² (laguna + playas en las orillas)
- superficie de la laguna: 3,5 km²
- precipitaciones: 140 mm/año
- evaporación potencial: 1000 mm/año
- temperatura media: -1°C

No hemos encontrado ningún aporte cuenca arriba, ni tampoco vertientes fluyentes al borde de la laguna. Solamente hemos observado vertientes difusas a lo largo de la orilla.

Composición de aguas y salmueras

Las composiciones de aguas de la laguna Escondida están presentadas en la figura 1 y en la tabla 1. Hemos prelevado solamente 2 vertientes difusas salobres.

<u>APORTES</u>	<u>SALINIDAD</u> mg/l	<u>TIPO QUÍMICO</u>		<u>VIA EVOLUTIVA</u>
		Cationes	Aniones	
ESC-3	2323	Na-Mg- (Ca)	/ Cl-SO4- (HCO3)	SO4 (N)
ESC-4	3165	Na- (Mg) - (Ca)	/ Cl-SO4	SO4 (N)
<u>LAGUNAS</u>				
ESC-1	3956	Na- (Mg) - (Ca)	/ Cl-SO4	SO4
ESC-6	6521	Na-Mg- (Ca)	/ Cl-SO4	SO4
ESC-2	18406	Na-Mg- (Ca)	/ Cl-SO4	SO4
ESC-5	32321	Na- (Mg) - (Ca)	/ Cl-SO4	SO4

Tabla 1 : Salinidades, tipos químicos y vías evolutivas de aguas de la laguna Escondida
SO₄ (N) = vía neutra sulfatada.

Todas las aguas - aportes y lagunas - tienen una composición similar de tipo Na-Mg / Cl-SO₄ con algo de calcio. Se caracterizan por un alto contenido porcentual en magnesio. Todas las aguas de la laguna contienen más sulfato que calcio. Pertenecen al mega-grupo Na / Cl-SO₄.

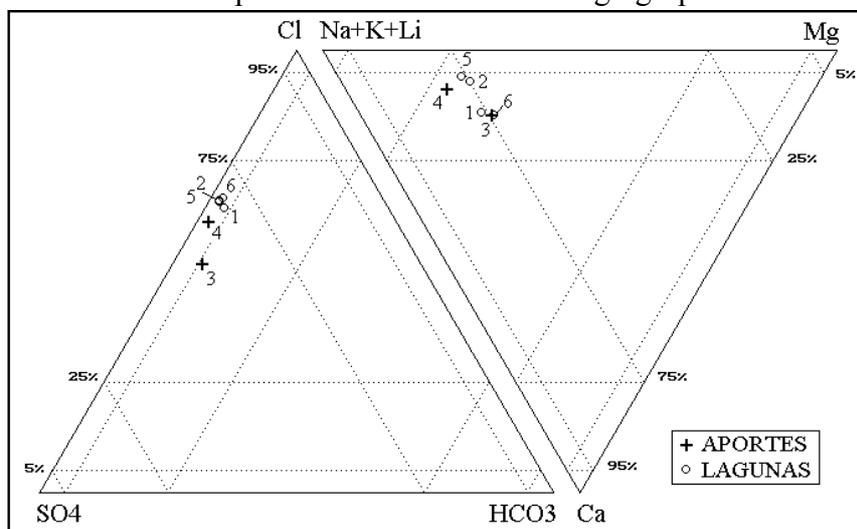


Fig.1: Composición de aguas y salmueras de la laguna Escondida

Origen de los componentes disueltos

La mejor relación equimolar entre componentes mayores de las aguas de aporte es entre Na y Cl (ver diagramas circulares). Sin embargo, Na+Cl constituye solamente el 50-60 % de la salinidad total. Por otra parte, el sulfato, componente más importante después de Na y Cl, no se relaciona con otros cationes. Es posible que la salinidad elevada de las dos vertientes difusas se deba a la mezcla de aguas diluidas con la cuña salina de la laguna. La gran similitud de composición de la vertiente difusa 4 con el agua de la vecina laguna 5 aboga también por esta hipótesis.

Vías evolutivas y relación con la geología

No disponemos del mapa geológico detallado de la zona; solamente sabemos que la cuenca es enteramente volcánica del lado chileno. Los dos aportes siguen la vía evolutiva neutra sulfatada, lo que puede reflejar una cuenca volcánica con azufre.

Evolución cuantitativa de aguas

Veamos ahora la evolución cuantitativa de las aguas de aporte cuando se evaporan. La tabla 2 presenta la composición calculada de todas las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta la salinidad de las diversas lagunas. 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 (ESC-xE) y las lagunas (ESC-x.EQ). Todas las composiciones de las lagunas fueron ajustadas al equilibrio con los minerales que las sobresaturan.

Las aguas de laguna más saladas (ESC-2 con 18 g/l y ESC-5 con 32 g/l) son las que tienen los coeficientes de desviación más bajos respecto a los aportes evaporados (0,03 - 0,07). Al

contrario, las aguas de laguna más diluidas (ESC-1 con 4 g/l y ESC-6 con 6,5 g/l) tienen un coeficiente de desviación mediocre (0,135 - 0,195). Normalmente ocurre lo contrario: los coeficientes de desviación empeoran cuando las concentraciones aumentan, puesto que las diferencias se amplifican. La anomalía puede explicarse si se admite que los aportes están salinizados por la laguna. El agua salobre de la poza de evaporación ESC-6, aislada de la laguna, provendría exclusivamente de la evaporación de la descarga de una napa diluida, cuya muestra no tenemos, sin mayor contaminación por la laguna. Los aportes (3) y (4) corresponderían entonces a la mezcla de esta napa diluida con el agua salada de la laguna.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	Na	K	LI	CA	MG	DESV.
<u>ESC-1.EQ</u>	8,31	1,28	1480	979	16,5	18,3	898	29,6	1,40	159	190	
ESC-3E	8,32	1,33	1170	1320	21,2	33,1	844	65,9	0,872	140	201	0,135
ESC-4E	8,36	1,50	1330	1070	28,1	33,1	948	91,6	1,02	111	148	0,195
<u>ESC-2.EQ</u>	8,27	2,68	7030	4650	141	21,6	4480	350	5,40	352	916	
ESC-4E	8,19	2,32	6470	5190	136	31,4	4600	444	4,96	439	717	0,033
ESC-3E	8,14	1,86	5680	6370	103	31,5	4090	319	4,23	582	973	0,070
<u>ESC-6.EQ</u>	8,23	1,19	2570	1590	29,1	13,5	1420	70	2,12	289	345	
ESC-3E	8,27	1,39	1960	2210	35,6	32,8	1410	110	1,46	217	336	0,133
ESC-4E	8,31	1,62	2230	1790	47,1	32,8	1590	154	1,71	168	248	0,195
<u>ESC-5.EQ</u>	8,24	3,93	12500	8050	241	20,0	8110	649	9,23	509	1570	
ESC-4E	8,14	3,50	11500	8990	243	29,9	8200	793	8,84	656	1280	0,032
ESC-3E	8,17	3,30	10500	10600	190	30,0	7550	589	7,80	602	1800	0,041

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

Calidad de aguas

Ninguna de las dos aguas de aporte cumple con las normas chilenas de potabilidad o de riego ya que tienen una salinidad muy elevada y demasiado boro. Sin embargo, notamos que ESC-3 no tiene exceso de arsénico para uso potable, lo que sugiere que el agua diluida que se mezcla con la laguna en la vertiente difusa, no debe tener una concentración elevada en arsénico.

Balance hídrico

Podemos establecer el balance hídrico de la laguna asumiendo que su alimentación proviene de la vertiente difusa 4. Se supone que su agua esta salinizada por la laguna, lo que no modifica sustancialmente el volumen de aporte, pero si la tasa de infiltración. Se utiliza el cloruro como elemento conservativo. Los parámetros considerados son :

- $H_e = 1$ m/año
- $H_p = 0,14$ m/año
- $S = 3,5$ km²
- $C_{ap} = 1080$ mg/l
- $C_L = 12\ 300$ mg/l

Volumen de aporte : $V_{ap} = S(H_e - H_p) / (1 - C_{ap} / C_L) = 3\,300\,000 \text{ m}^3/\text{año} = 105 \text{ l/s}$
 Volumen de infiltraciones : $V_i = S(H_e - H_p) / (1 - C_L / C_{ap}) = 290\,000 \text{ m}^3/\text{año} \sim 9 \text{ l/s}$

El volumen de infiltraciones es probablemente en exceso. Los cien litros por segundo entran de manera difusa no solamente en los dos puntos donde sacamos muestra, pero probablemente a todo lo largo de su orilla oriental. El flujo debe ser muy lento.

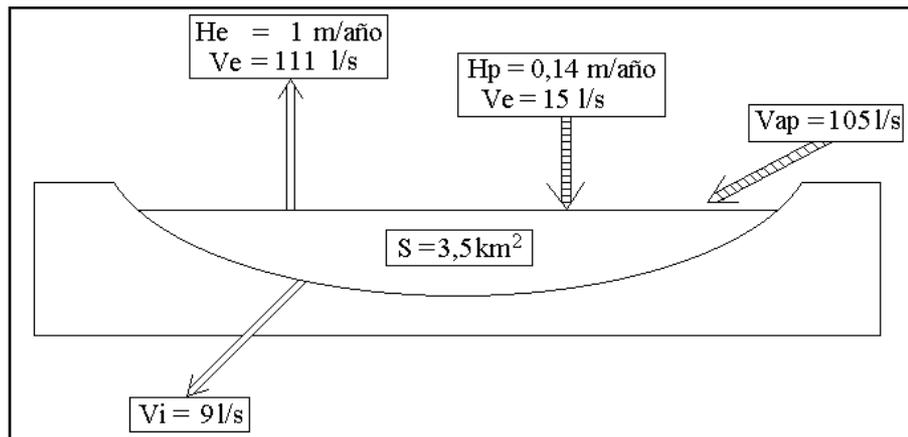
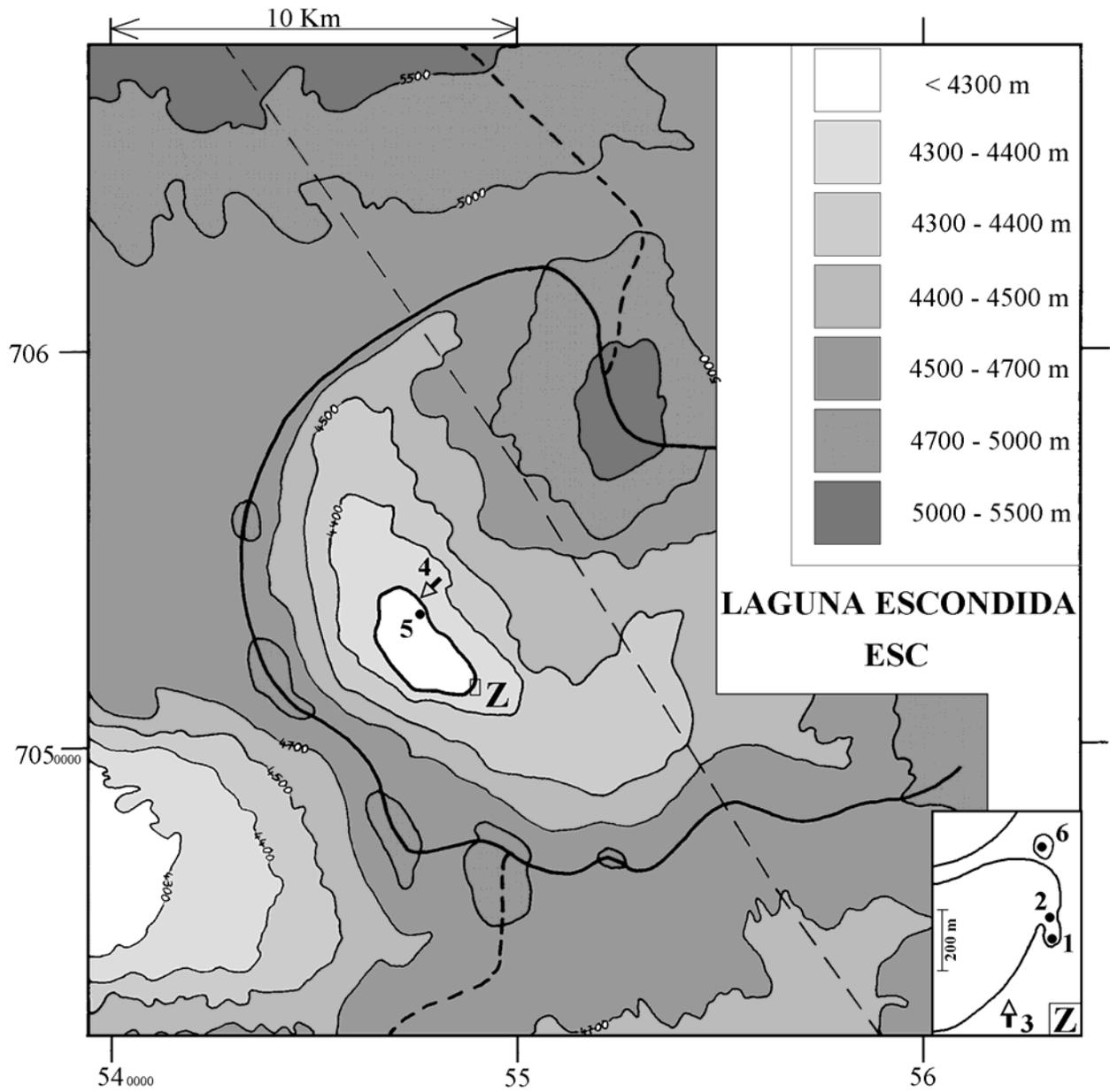


Fig.2 : Balance hídrico de la laguna Escondida.

Conclusiones

La laguna Escondida pertenece al mega-grupo Na / Cl-SO₄ con un alto contenido de magnesio. Su alimentación proviene de descarga de napas cuyas aguas se mezclan con la cuña salina de la laguna antes de surgir como vertientes difusas y salobres a lo largo de la orilla oriental. Eso sugiere que las napas cuenca arriba serían de buena calidad, puesto que no parecen contaminadas por antiguas evaporitas o salmueras residuales. Además, el contenido en arsénico de los aportes no es muy elevado.

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



**LAGUNA ESCONDIDA
ESC**

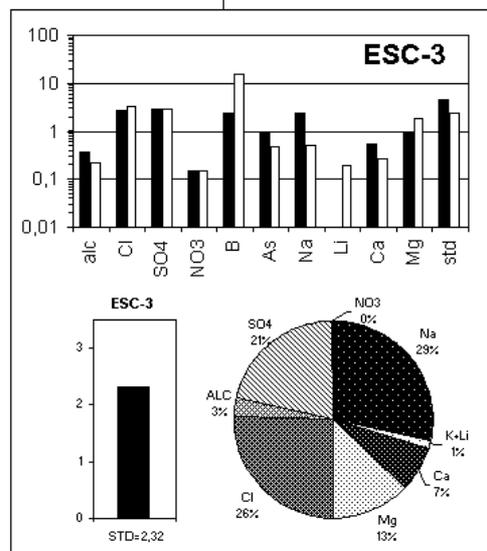
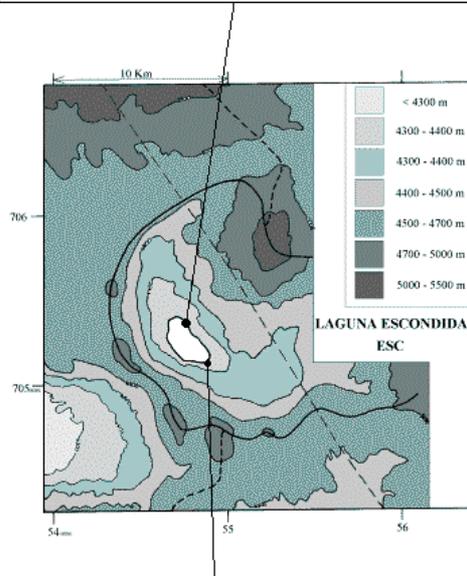
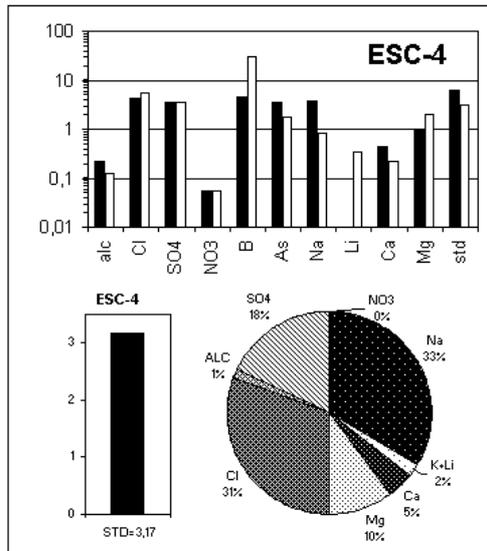
NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
ESC-1	10/12/96	12 ^H 25	548874	7051701	4353	Poza de preconcentración
ESC-2	10/12/96	12 ^H 35	548874	7051726	4353	Laguna pequeña
ESC-3	10/12/96	12 ^H 45	548721	7051491	4354	Manantial difuso
ESC-4	10/12/96	13 ^H 50	547558	7053882	4354	Manantial difuso
ESC-5	10/12/96	14 ^H 10	547744	7053351	4353	Laguna
ESC-6	10/12/96	14 ^H 45	548815	7052007	4353	Laguna pequeña

NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
ESC-1	6100	10,9	5,1	1,003	7,94	2,49	1460	2,63	0,104	979	9,30	16,5	18,3	0,054	913	29,6	1,40	183	190
ESC-2	25000	12,2	5,5	1,015	8,65	6,12	7060	14,6	0,202	4650	6,19	141	21,6	0,660	4460	350	5,40	421	916
ESC-3	3500	12,1	4,8	1,002	8,40	2,18	664	1,15	0,0629	744	6,76	12,0	25,1	0,049	476	37,2	0,493	107	113
ESC-4	4890	19,3	5,8	1,003	8,33	1,25	1080	2,39	0,0733	873	2,48	22,9	40,9	0,173	775	74,7	0,833	91	121
ESC-5	40600	15,4	5,2	1,026	8,63	9,75	12300	26,6	0,253	8040	0,587	241	20,0	1,29	8260	649	9,23	626	1560
ESC-6	9750	11,9	6,7	1,006	8,85	2,64	2540	4,75	0,232	1590	0,136	29,1	13,5	0,068	1440	70,0	2,12	318	345

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
ESC-1	3956	142	2,16	2,6	65,42	64,14	2,0	ESC-3	-1,42	-38
ESC-2	18406	102	15,3	0,29	300,1	302,0	0,6	Análisis de oxígeno-18 y deuterio		
ESC-3	2323	115	4,02	0,75	36,42	36,49	0,2			
ESC-4	3165	52,4	1,80	0,33	50,19	49,97	0,4			
ESC-5	32321	81,1	16,9	0,21	536,9	524,4	2,4			
ESC-6	6521	75,6	12,9	0,16	109,2	107,4	1,6			

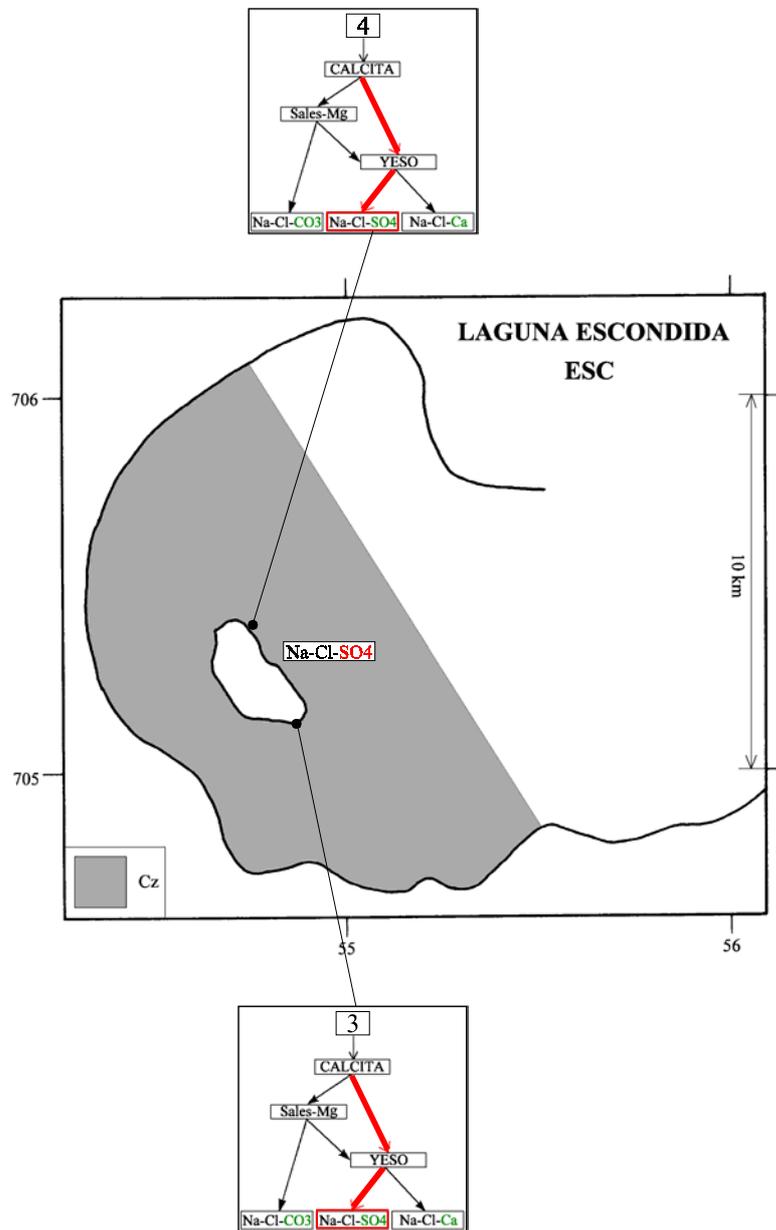
Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.
S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l); DIF.% = diferencia en %



MAPA GEOLOGICO Y VIAS EVOLUTIVAS

ESC

Cz: *Cenozoico*. Rocas volcánicas: dacitas - andesitas.



LAGUNA VERDE

Introducción

La laguna Verde se encuentra en la Cordillera de los Andes de la Tercera Región al este del salar de Maricunga, cerca de la frontera argentina. El imponente volcán Ojo del Salado, punto más alto de esa Cordillera en Chile (6893 m), cierra su cuenca al sur. Las principales características morfológicas y climatológicas de la laguna son:

- altura: 4350 m
- superficie de la cuenca: 1075 km²
- superficie de la laguna: 15 km²
- precipitaciones: 170 mm/año
- evaporación potencial: 1000 mm/año
- temperatura media: 1°C

Es una laguna salada alimentada por ríos y vertientes, casi todos al sur y al oeste de la cuenca. No conocemos su profundidad. Hemos sacado muestras de la laguna y de dos pequeñas pozas de evaporación al este de la laguna.

Composición de aguas y salmueras

Las composiciones de aguas de Laguna Verde están presentadas en la figura 1 y en la tabla 1.

<u>APORTES</u>	<u>SALINIDAD</u> mg/l	<u>TIPO QUÍMICO</u>		<u>VÍA EVOLUTIVA</u>
		Cationes	Aniones	
LAV-7	935	Na	/ Cl-SO ₄ - (HCO ₃)	CO ₃
LAV-2	1748	Na	/ HCO ₃ -Cl-SO ₄	CO ₃
LAV-8	2046	Na- (Ca)	/ Cl- (SO ₄) - (HCO ₃)	SO ₄ (N)
LAV-6	3791	Na	/ Cl- (SO ₄) - (HCO ₃)	CO ₃
LAV-3	6984	Na-Ca- (Mg)	/ Cl-SO ₄	SO ₄ (N)
<u>LAGUNAS</u>				
LAV-4	4218	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl- (SO ₄)	Ca
LAV-5	40869	Na- (Mg)	/ Cl- (SO ₄)	SO ₄
LAV-1	174580	Na- (Mg)	/ Cl- (SO ₄)	SO ₄

Tabla 1 : Salinidades, tipos químicos y vías evolutivas de aguas de Laguna Verde
CO₃ = vía alcalina; SO₄ (N) = vía neutra sulfatada; Ca = vía calcica.

Hemos encontrado dos ríos, dos vertientes fluyentes - una de ella termal - y una vertiente difusa. Casi todos los aportes son salobres. El aporte más diluido tiene una salinidad de 0,94 g/l y el más concentrado 7 g/l. Se puede distinguir en la tabla 1 y en los diagramas triangulares tres tipos de aporte:

- el río Agua Dulce (LAV-2, en realidad de agua salobre) tiene una composición bien particular ya que el sodio constituye el 90 % de los cationes (en meq/l y en mg/l). Al contrario, los tres aniones HCO_3 , Cl y SO_4 tienen concentraciones porcentuales casi iguales. En el diagrama aniónico, el punto representativo se encuentra en el centro del triángulo. Más del 90 % de la carga salina de esta agua está constituida por Na, HCO_3 , Cl y SO_4 .

- la vertiente difusa (3), al este del salar, es el aporte más salado (7 g/l) y más concentrado en calcio.

- Las dos vertientes fluyentes (6 y 7) y el río Peñas Blancas (8) contienen Na y Cl como componentes principales y SO_4 y HCO_3 como componentes secundarios.

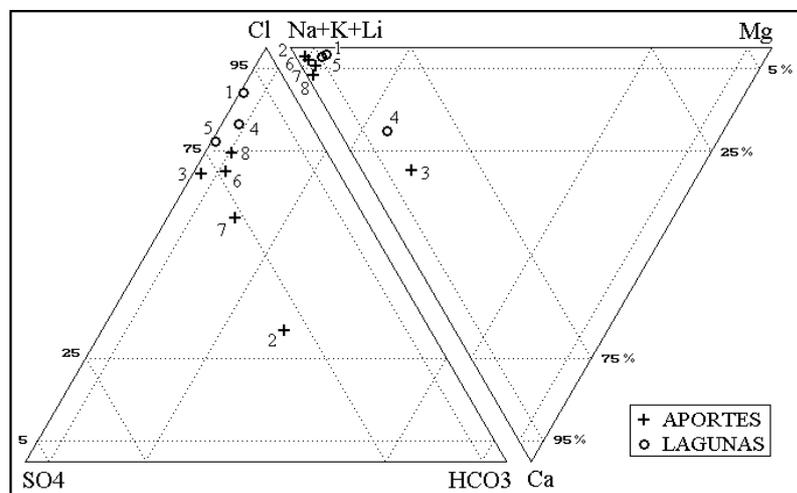


Fig.1: Composición de aguas y salmueras de Laguna Verde.

La laguna pertenece al mega-grupo de salmueras sulfatadas: Na / Cl-SO_4 que por efecto de temperaturas inferiores a 2°C , está saturada en mirabilita: $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$. La poza (5), menos concentrada, tiene una composición porcentual similar. La poza (4) en cambio presenta un tipo químico distinto ya que es una solución cálcica, con más calcio que sulfato.

Origen de los componentes disueltos

La figura 2 presenta la relación entre Na y Cl+SO_4 para todas las aguas muestreadas en Laguna Verde.

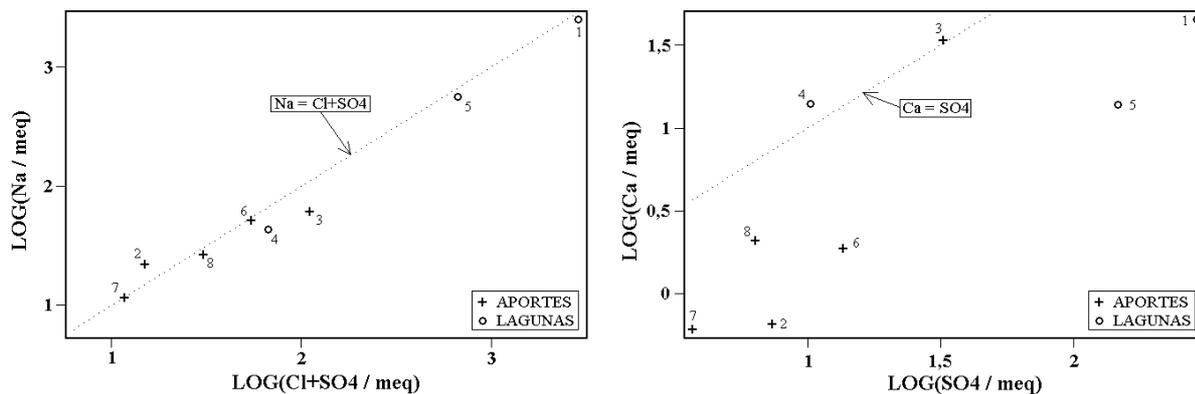


Fig.2 : Relaciones Na versus Cl+SO₄ y Ca versus SO₄ en aguas de Laguna Verde.

Se observa los mismos grupos definidos en el párrafo anterior:

- los aportes (LAV-6, LAV-7 y LAV-8) se ubican muy cerca de la recta equimolar $\text{Na} = \text{Cl} + \text{SO}_4$. La suma en mg/l de los tres componentes $\text{Na} + \text{Cl} + \text{SO}_4$ corresponde a 78% de la salinidad total para (7), y 87% para (8 y 9). Eso sugiere que lo esencial de la salinidad relativamente elevada de estas aguas se debe a la redisolución de cloruro y sulfato de sodio de antiguas evaporitas recubiertas por formaciones volcánicas.

- el aporte más salado (LAV-3 con 7 g/l) es el único que tiene concentraciones casi equimolares en Ca y SO₄ (Fig.2), lo que sugiere una disolución de yeso. No aparece ninguna otra relación equimolar entre constituyentes mayores. La composición cálcica de este aporte es muy distinto de la composición sulfatada de la salmuera de la laguna, por lo que se puede descartar una descarga de cuña salina.

- el río Agua Dulce (2) tiene una composición donde $\text{Na} = \text{Cl} + \text{SO}_4 + \text{HCO}_3$ que no corresponde a una agua de alteración de rocas volcánicas, por la fuerte predominancia del sodio dentro de los cationes. Podría ser una mezcla de agua de alteración con salmueras residuales cloruradas y sulfatadas.

Vías evolutivas y relación con la geología

No disponemos del mapa geológico detallado; sabemos solamente que la cuenca es enteramente volcánica (dacitas - andesitas). Tres aportes siguen la vía carbonatada (2, 6 y 7) y dos la vía neutra sulfatada (3 y 8). Estos grupos de aportes no coinciden con los grupos definidos anteriormente. Las aguas de vía carbonatada provienen generalmente de la alteración de rocas volcánicas sin azufre y tienen una salinidad baja. En el caso de Laguna Verde, la salinidad elevada de los aportes de vía carbonatada se debe a la adición de antiguas sales o de salmueras de tipo Na / Cl-SO₄ que aumentan notablemente su salinidad sin cambiar su vía evolutiva. Al contrario, la adición de calcio, como sulfato o cloruro, puede cambiar la vía carbonatada en vías sulfatadas o calcica, lo que probablemente ocurre para LAV-3. El caso del río Peñas Blancas (8) es más complejo. Su agua, que contiene poco calcio (2% de la salinidad total), ha redisoluelto cloruro y sulfato de sodio, lo que no modifica la vía carbonatada. Puesto que sigue la vía neutra sulfatada, es probable que el agua diluida inicial ya pertenecía a esta vía. Observamos que se trata de un río importante que drena una gran parte de la cuenca occidental de la laguna, por lo que sus aguas diluidas iniciales han tenido más oportunidades de lixiviar rocas volcánicas con azufre.

Evolución cuantitativa de aguas

Veamos ahora la evolución cuantitativa de las aguas de aporte cuando se evaporan.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
<u>LAV-1.EQ</u>	7,56	5,89	92500	13800	513	13,3	57700	5400	204	533	2380	
(8+2+3)E	7,89	5,57	90800	14700	494	13,7	56400	7660	318	441	1960	0,039
LAV-8E	7,79	6,11	83400	21600	674	16,2	58400	6400	229	674	532	0,202
LAV-3E	7,63	6,01	100000	6500	594	14,1	50200	7260	453	2210	5140	0,326
LAV-6E	8,98	29,9	84800	20200	358	18,3	61000	6360	186	9,23	32,3	0,796
LAV-7E	9,77	250	75500	21200	562	31,5	60000	7200	185	0,526	1,80	0,901
LAV-2E	10,1	1220	41200	23300	396	54,7	62100	5950	155	0,372	1,33	1,050

Tabla 2 : Comparación de las aguas de aporte evaporadas con la salmuera de Laguna Verde. La mezcla (8+2+3) corresponde a 50% (8) + 40% (2) + 10% (3). ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

La tabla 2 presenta la composición calculada de todas las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta la salinidad de la gran 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 (LAV-xE) y la salmuera de la laguna (LAV-1.EQ). La composición de la laguna ha sido ajustada al equilibrio con los minerales que la sobresaturan. Considerando las aguas de aporte evaporadas individualmente, la que más se acerca a la composición de la laguna es 8E (río Peñas Blancas). Pero el coeficiente de desviación (0,202) es mediocre. El río Aguas Dulce produce al evaporarse una salmuera de carbonato de sodio totalmente dispar (desviación = 1,05). La composición de la laguna parece provenir de la mezcla de varios aportes. Después de muchos ensayos, hemos encontrado que la mezcla de 50% del río Peñas Blancas con 40% del río Agua Dulce y 10% de la vertiente difusa (3) produce al evaporarse una salmuera muy parecida a la laguna, con un coeficiente de desviación muy bajo de 0,039. El 10% de LAV-3 es absolutamente imprescindible: es el quien controla la concentración del calcio en la laguna. Ninguna mezcla de los dos ríos llega a producir la salmuera de la laguna. Las proporciones encontradas corresponden a los respectivos caudales entrantes.

Calidad de las aguas

Ningún agua de aporte cumple con las normas chilenas de potabilidad o de riego. Las menos malas son la vertiente fluyente (7) y el río Agua Dulce (2), pero contienen demasiado arsénico y boro, además de una salinidad en exceso. Es posible consumir estas aguas en caso de mucha necesidad. El agua del principal aporte, el río Peñas Blancas, es totalmente impropia para uso potable o de riego, pues contiene 23 veces más arsénico que la norma potable y un alto contenido en boro para riego.

Balance hídrico

Podemos establecer el balance hídrico de la gran laguna asumiendo que su alimentación proviene mayormente de los tres aporte (LAV-8, 2 y 3) en las proporciones encontradas anteriormente: 50% (8) + 40% (2) + 10% (3). Se utiliza el cloruro como elemento conservativo. La evaporación

de la salmuera de la laguna es la evaporación potencial disminuida en 15% para tomar en cuenta su alta salinidad. Los parámetros considerados son :

- $H_e = 1 \text{ (m)} - 15\%(1\text{m}) = 0,85 \text{ m/año}$
- $H_p = 0,17 \text{ m/año}$
- $S = 15 \text{ km}^2$
- $C_{ap} = 50\% (852) + 40\% (270) + 10\% (2790) = 813 \text{ mg/l}$
- $C_L = 91\ 600 \text{ mg/l}$

Volumen de aporte : $V_{ap} = S(H_e - H_p)/(1 - C_{ap}/C_L) = 103\ 000\ 000 \text{ m}^3/\text{año} = 326 \text{ l/s}$

Volumen de infiltraciones : $V_i = S(H_e - H_p)/(1 - C_L/C_{ap}) = 91\ 000 \text{ m}^3/\text{año} \sim 3 \text{ l/s}$

El caudal entrante es de 300-350 l/s dividido de manera igual entre el este y el oeste de la laguna.

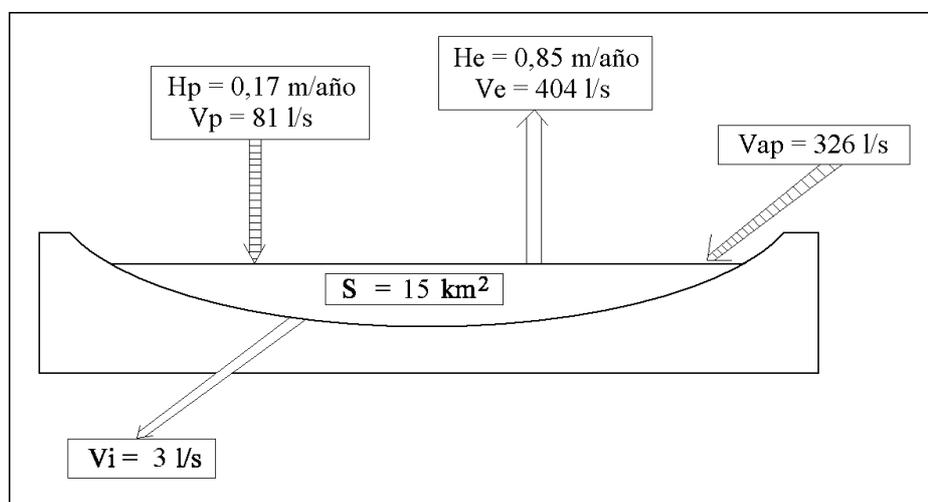
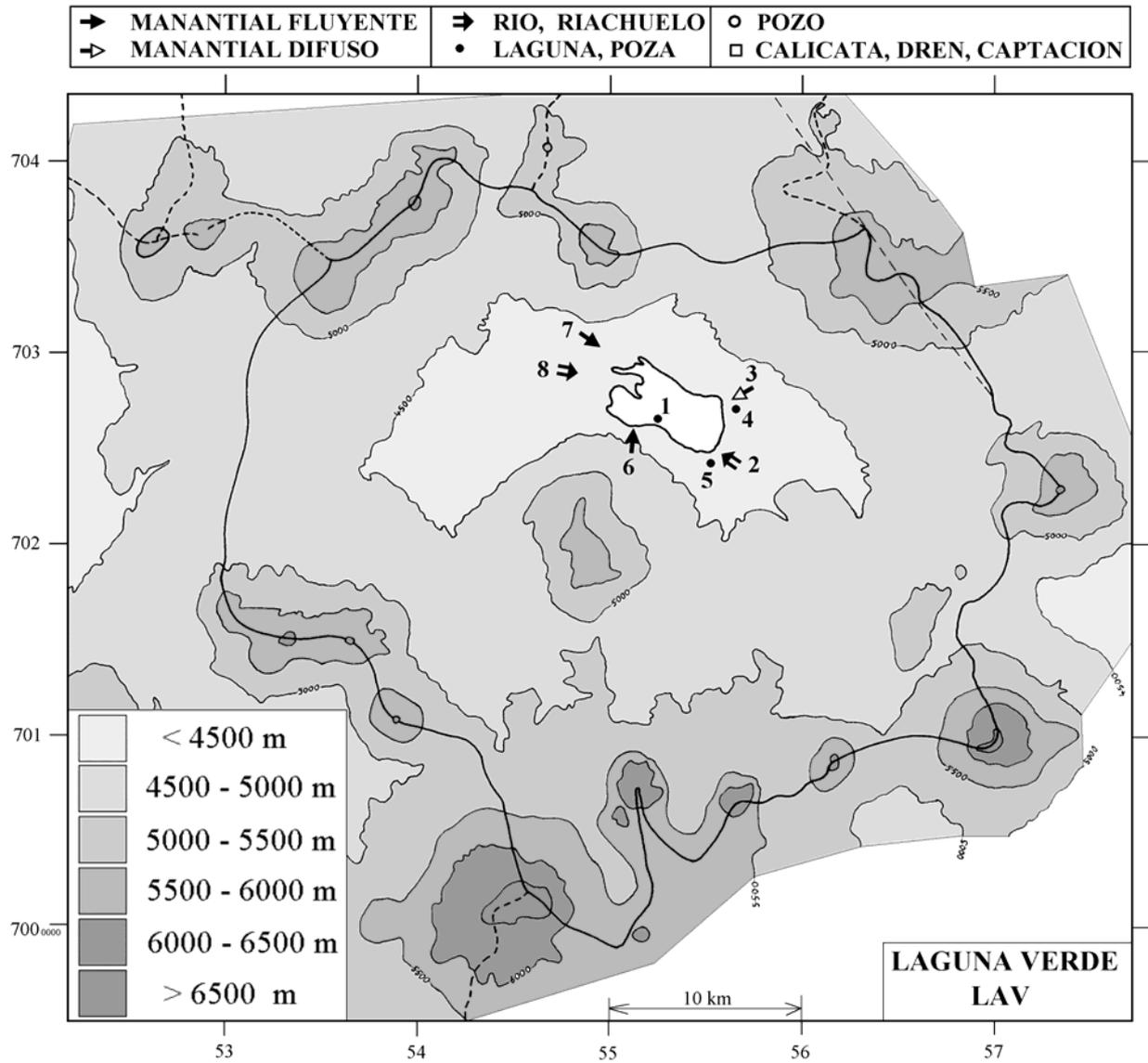


Fig.3 : Balance hídrico de Laguna Verde.

Conclusiones

La Laguna Verde recibe aguas de tipos y vías evolutivas muy distintos. Antiguas evaporitas o salmueras residuales de cloruro y sulfato de sodio salinizan los aportes, pero sin modificar las vías evolutivas. Así se observa aguas salobres de vía carbonatada, reflejando la composición del agua diluida inicial obtenida por alteración de rocas volcánicas con poco o sin azufre. La simulación de la evaporación de los aportes muestra que la salmuera de la laguna proviene de la evaporación de una mezcla de tres tipos de aguas: al oeste, el río Peñas Blancas de vía evolutiva neutra sulfatada, con un 50% de los aportes; al este, el río Agua Dulce, de vía carbonatada, con un 40%. El 10% restante provienen de vertientes difusas, más ricas en calcio, al este de la laguna. El caudal total entrante es de 300-350 l/s, un valor elevado que sugiere la existencia de napas explotables cuenca arriba. Sin embargo, la calidad de aguas no es muy buena ya que las más diluidas encontradas están un poco por encima de la norma potable en arsénico y con alto boro para riego.



LAGUNA VERDE
LAV

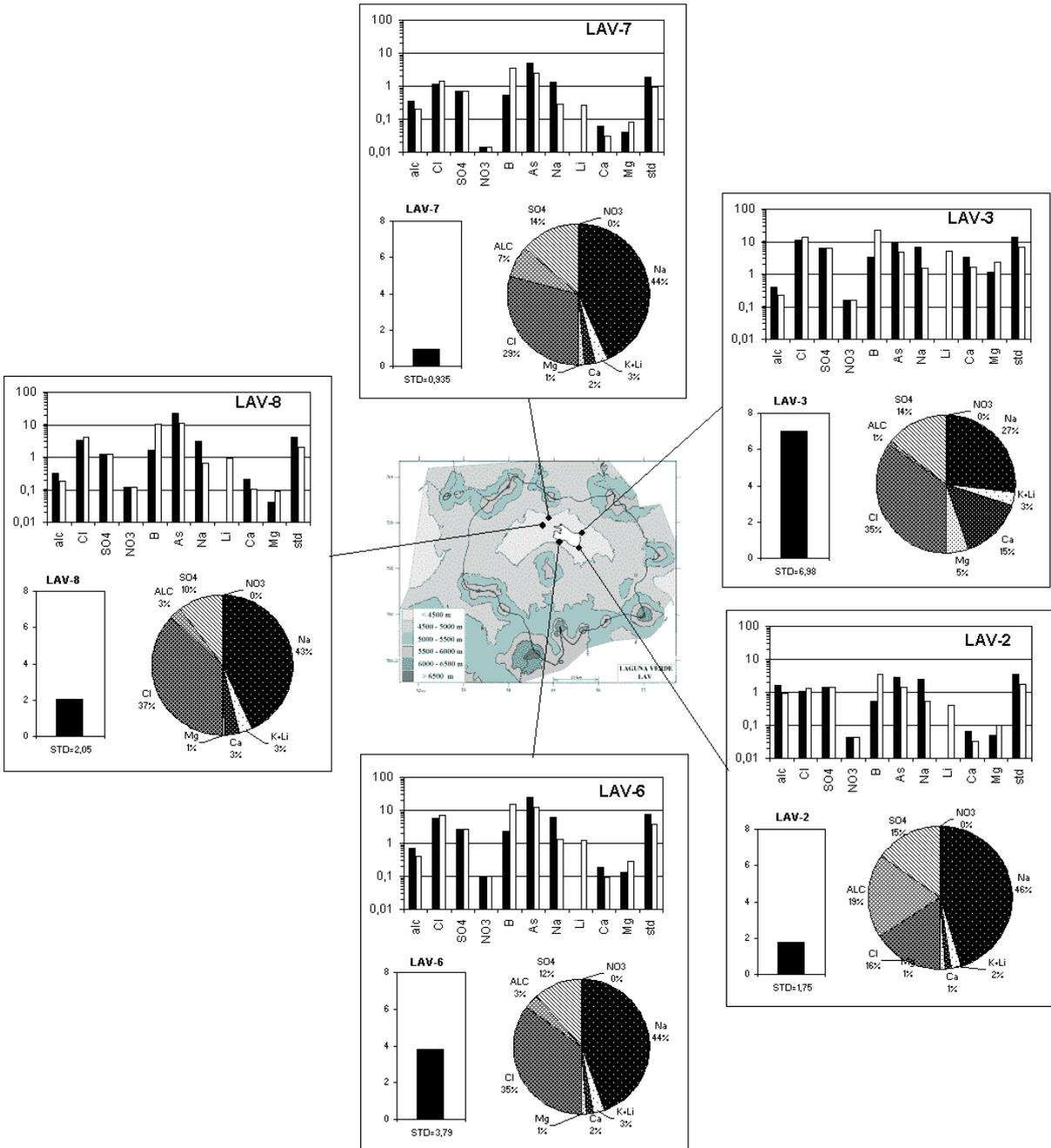
NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
LAV-1	16/05/95	12 ^H 05	552001	7026083	4350	Laguna
LAV-2	16/05/95	12 ^H 30	555435	7024671	4355	Río Agua Dulce
LAV-3	16/05/95	13 ^H 30	556387	7027451	4365	Manantial difuso
LAV-4	16/05/95	14 ^H 00	556331	7027269	4350	Lagunita de preconcentración
LAV-5	16/05/95	14 ^H 20	554741	7024513	4350	Lagunita de preconcentración
LAV-6	16/05/95	14 ^H 40	551178	7028028	4355	Manantial termal corriente
LAV-7	24/01/96	14 ^H 20	548925	7030262	4390	Manantial corriente
LAV-8	24/01/96	14 ^H 40	547859	7028944	4380	Río Peñas Blancas

NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
LAV-1	174000	1,5	2,3	1,120	8,18	24,7	91600	105	0,293	13800	7,69	512	37,8	27,7	58200	5400	204	910	2380
LAV-2	2340	1,5	8,0	1,001	9,10	9,20	270	0,305	0,0048	352	1,96	2,59	20,9	0,142	501	38,9	1,01	13,2	6,25
LAV-3	10800	0	3,5	1,006	8,18	2,28	2790	5,78	0,112	1560	7,19	17,0	31,9	0,472	1400	203	12,6	678	143
LAV-4	7670	0,7	6,1	1,003	8,09	2,57	2000	4,62	0,0773	490	3,87	11,5	30,0	0,217	996	148	9,65	281	85,1
LAV-5	53600	-0,8	6,8	1,030	8,45	6,89	18500	17,6	0,156	7010	0,366	129	25,7	2,02	13000	1040	38,7	277	430
LAV-6	5760	40,5	2,9	1,003	7,52	3,96	1460	1,29	0,0334	653	4,46	11,4	63,0	1,27	1190	109	3,17	37,3	17,0
LAV-7	1402	16,5	na	1,001	8,90	1,97	285	0,246	0,0152	177	0,632	2,69	42,6	0,250	267	26,7	0,687	12,3	4,91
LAV-8	3230	16,2	na	1,002	8,55	1,83	852	0,983	0,0369	306	5,42	8,00	38,9	1,14	612	63,7	2,28	41,7	5,30

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. %
LAV-1	174580	-	-	-	2939	2893	1,6
LAV-2	1748	498	27,6	0,84	24,11	24,17	0,3
LAV-3	6984	124	3,48	1,7	113,5	113,5	0,01
LAV-4	4218	148	2,34	2,5	69,47	69,23	0,3
LAV-5	40869	271	13,0	1,5	648,3	672,9	3,7
LAV-6	3791	235	1,26	7,9	58,20	58,73	0,9
LAV-7	934,8	97,0	4,98	0,19	13,40	13,68	2,1
LAV-8	2046	94,6	2,82	0,39	31,07	32,30	3,9

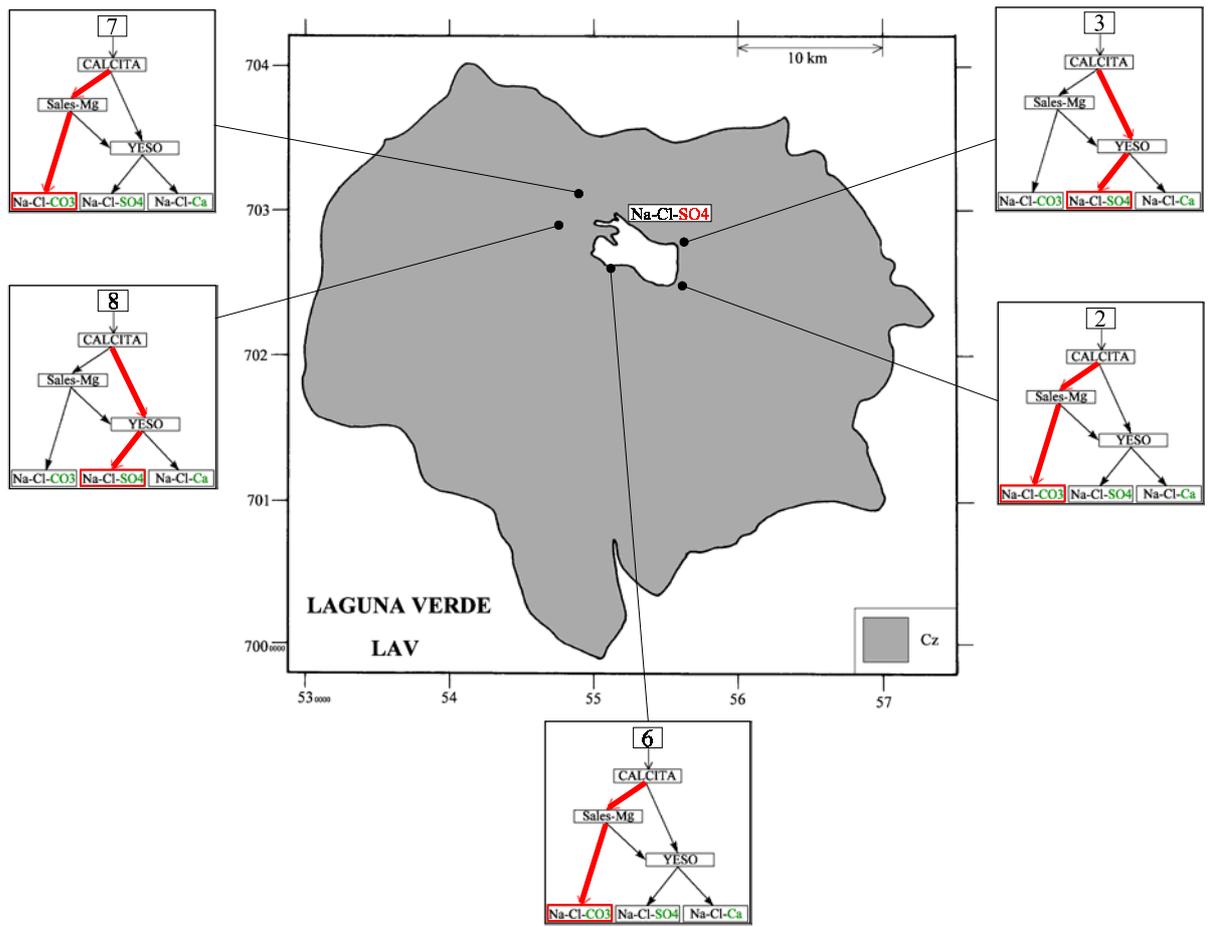
Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.
S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l); DIF.% = diferencia en %



MAPA GEOLOGICO
Y
VIAS EVOLUTIVAS

LAV

Cz: *Cenozoico*. Rocas volcánicas: dacitas - andesitas.



SALAR DE MARICUNGA

Introducción

La cuenca del salar de Maricunga es la segunda cuenca cerrada más grande de la Tercera Región después de Pedernales. Hay un problema en cuanto a su límite oriental ya que constituye una sub-cuenca casi independiente de 845 km² de superficie (Fig.1). Su límite pasa por el Nevado Tres Cruces, el portezuelo Tres Cruces (4386 m) y la Cordillera Claudio Gay. No se puede deducir del mapa topográfico si esta sub-cuenca es cerrada o abierta. Tiene una superficie tan grande como la del salar de la Isla (858 km²) o poco inferior a la de la laguna del Negro Francisco (933 km²). Si la cuenca fuera hidrológicamente cerrada, con tal superficie habría un salar o una laguna salada en su depresión central. Pequeñas cuencas aisladas pueden no colmatarse porque el escurrimiento superficial es mínimo y la deflación eólica importante. No conocemos el caso de una cuenca cerrada en la Cordillera Andina del norte chileno de tal extensión que no contenga un salar. Por eso pensamos que la sub-cuenca oriental está hidrológicamente abierta hacia el salar de Maricunga.

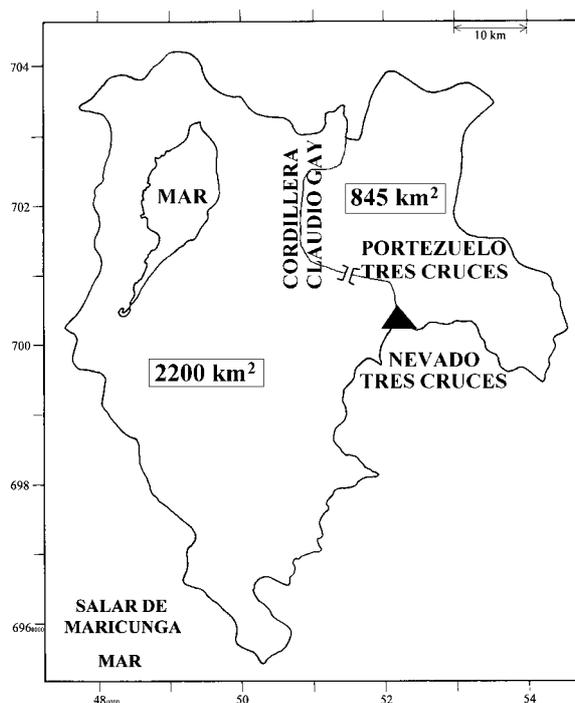


Fig.1 : Salar de Maricunga con la sub-cuenca oriental

Las principales características morfométricas y climatológicas del salar son:

- altura de salar: 3760 m
- superficie de la cuenca: 3045 km² (2200 km² sin la parte oriental)
- superficie del salar: 145 km²
- superficie de las lagunas: 6 km² (0,15 km² para la laguna Santa Rosa)
- precipitaciones: 120 mm/año (salar) y 200 mm/año (cuenca oriental)
- evaporación potencial: 1200 mm/año (salar)
- temperatura media: 4°C (salar)

Como ocurre con todas las grandes cuencas, esta se caracteriza por importantes variaciones morfológicas, climatológicas y geológicas. La geología del salar ha sido estudiada recientemente por Tessara (1997). La geología de la cuenca es una variedad de formaciones volcánicas, rocas plutónicas y terrenos sedimentarios. El salar es una costra de halita (NaCl) y yeso (CaSO₄.H₂O) con pequeñas lagunas generalmente adyacentes a la orilla. Contiene un yacimiento de borato (ulexita : NaCaB₅O₉.8H₂O). Los principales aportes de aguas superficiales al salar están dados por 7 arroyos ubicados entre 4000 y 4500 m de altura y que se infiltran aguas abajo, alimentando napas subterráneas. Al extremo sur del salar hay una pequeña laguna independiente: la laguna Santa Rosa. Hemos observado en terreno que la laguna está conectada al salar por un canal de buen caudal (~200-300 l/s) que alimenta un complejo sistema lagunar.

Composición de las aguas

Presentamos la composición de las aguas de Maricunga en la figura 2 y en la tabla 1.

	<u>SALINIDAD</u> (mg/l)	<u>TIPO QUÍMICO</u>		<u>VÍA EVOLUTIVA</u>
		CATIONES	ANIONES	
<u>APORTES DILUIDOS</u>				
MAR-29	144	Ca-Na- (Mg)	/ HCO ₃ -SO ₄ - (Cl)	SO ₄ (N)
MAR-8	162	Ca-Na- (Mg)	/ HCO ₃ -SO ₄ - (Cl)	SO ₄ (A)
MAR-27	254	Na-Ca- (Mg)	/ Cl-SO ₄ - (HCO ₃)	SO ₄ (N)
MAR-28	381	Ca-Na-Mg	/ HCO ₃ -Cl- (SO ₄)	SO ₄ (A)
MAR-9	391	Na- (Ca) - (Mg)	/ SO ₄ -Cl- (HCO ₃)	SO ₄ (N)
MAR-18	435	Na- (Mg) - (Ca)	/ SO ₄ -HCO ₃ - (Cl)	CO ₃
MAR-1	464	Ca-Na- (Mg)	/ SO ₄ - (Cl) - (HCO ₃)	SO ₄ (N)
MAR-5	495	Na-Ca- (Mg)	/ HCO ₃ - (SO ₄) - (Cl)	CO ₃
MAR-2	537	Ca-Na- (Mg)	/ SO ₄ - (Cl) - (HCO ₃)	SO ₄ (N)
MAR-6	546	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl-SO ₄ -HCO ₃	CO ₃
MAR-3	834	Na-Ca- (Mg)	/ Cl-SO ₄ - (HCO ₃)	SO ₄ (N)
<u>APORTES SALOBRES</u>				
MAR-30	1046	Ca-Mg- (Na)	/ Cl- (HCO ₃) - (SO ₄)	Ca
MAR-15	1107	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl- (HCO ₃) - (SO ₄)	SO ₄ (N)
MAR-7	1385	Na-Ca- (Mg)	/ Cl-SO ₄ - (HCO ₃)	Ca
MAR-13	1580	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl- (SO ₄) - (HCO ₃)	SO ₄ (N)
MAR-26	1952	Na-Ca	/ Cl- (SO ₄)	Ca
MAR-17	2203	Na- (Ca)	/ Cl- (HCO ₃) - (SO ₄)	Ca
MAR-21	2368	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl	Ca
MAR-4	2573	Na-Ca	/ Cl- (HCO ₃) - (SO ₄)	Ca
MAR-12	2896	Na- (Ca)	/ Cl- (HCO ₃) - (SO ₄)	Ca
MAR-16	4379	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl- (HCO ₃) - (SO ₄)	Ca
<u>LAGUNAS</u>				
MAR-11	1168	Ca-Na- (Mg)	/ SO ₄ - (Cl)	SO ₄
MAR-22	4844	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl- (SO ₄)	Ca
MAR-10	6168	Na-Ca- (Mg)	/ Cl-SO ₄	SO ₄
MAR-20	9032	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl- (HCO ₃) - (SO ₄)	Ca
MAR-23	10641	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl- (SO ₄)	Ca
MAR-14	15004	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl	Ca
MAR-24	83950	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl	Ca
MAR-25	329671	Na- (Ca) - (Mg)	/ Cl	Ca

Tabla 1 : Salinidades, tipos químicos y vías evolutivas de las aguas de Maricunga.

CO₃ = vía carbonatada ; SO₄ (A) = vía alcalina sulfatada

SO₄ (N) = vía neutra sulfatada ; Ca = vía calcica.

Los puntos representativos de las aguas de aporte se reparten en casi todo el triángulo de aniones, mientras que los puntos de las lagunas están pegados al lado Cl-SO₄. Hemos diferenciado las aguas de aporte entre aguas diluidas (menos de 1000 mg/l) y aguas salobres (más de 1000 mg/l). Se observa muy nitidamente los dos grupos en el triángulo de aniones. Las aguas diluidas tienen menos cloruro que las aguas salobres. En el triángulo de cationes, los puntos de los aportes y de las lagunas se reparten (con dos excepciones : MAR-28 y 30) a lo largo de una línea paralela al lado Na-Ca, lo que indica una proporción aproximadamente constante de Mg en las aguas de Maricunga.

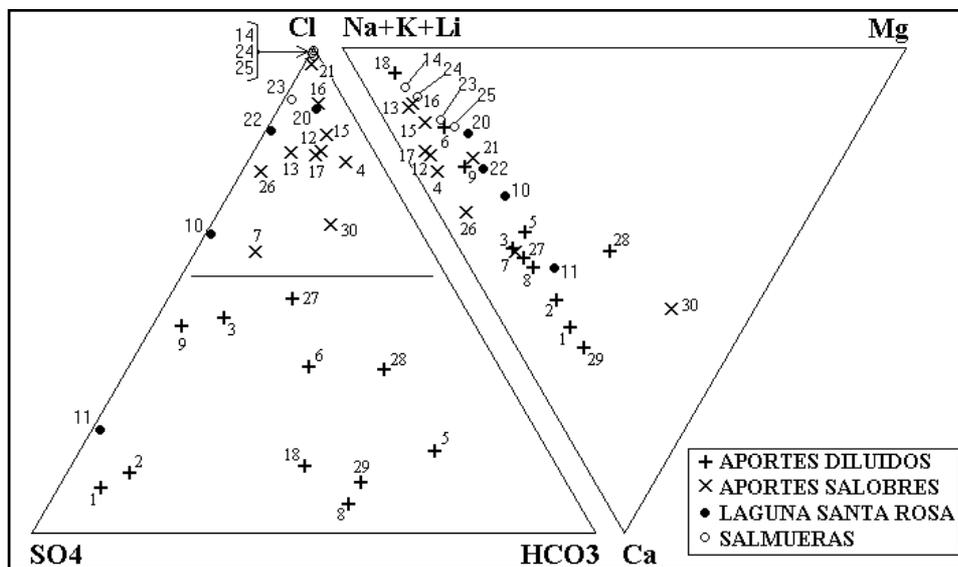


Fig.2 : Composición de las aguas de aporte al salar de Maricunga.

En vista del gran número de tipos químicos de las aguas de aportes a Maricunga, es mucho mejor considerar las vías evolutivas para clasificarlas (ver más adelante). Hemos extraído cuatro muestras de la laguna Santa Rosa. Se puede observar en la tabla 1 y en los diagramas triangulares de la figura 2 que la laguna no es homogénea y cada muestra tiene un tipo químico distinto. Las salinidades varían de 1100 mg/l hasta 9000 mg/l. En el salar mismo hay salmueras muy concentradas (320 g/l STD). Existen dos vías evolutivas en la laguna.

Origen de las sales disueltas

Se observa en el diagrama Na / Cl de la figura 3 que los puntos de las aguas de aporte diluidas se ubican por encima de la recta equimolar Na = Cl mientras que los puntos de las aguas salobres se encuentran cerca de la recta, lo que indica una redisolución de cloruro de sodio (NaCl). Sin embargo, se nota que todas las aguas salobres se ubican *por debajo* de la recta reflejando contenidos de Na superiores a los de Cl. La adición de puro cloruro de sodio en aguas diluidas con Na > Cl reduce, pero no modifica, la predominancia del sodio sobre el cloruro. Un otro catión debe haberse redisoluelto conjuntamente con el sodio. En el diagrama Na+Ca versus Cl, se

puede ver que todos los puntos menos uno (21) se ubican por encima de la recta equimolar Na+Ca=Cl.

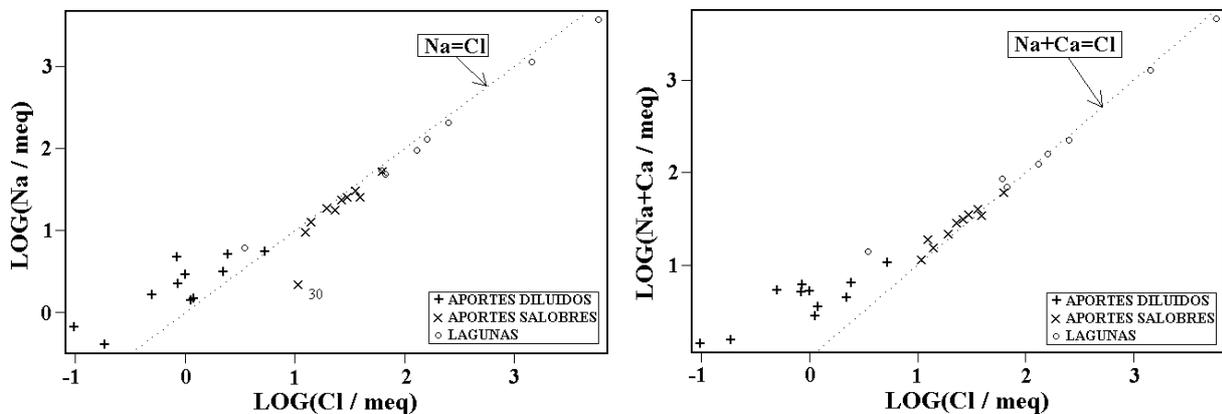


Fig.3 : Relaciones Na versus Cl y Na+Ca versus Cl en las aguas de Maricunga

Eso sugiere que el aumento de salinidad entre las aguas diluidas y salobres se debe a la redisolución de cloruro de sodio y de calcio, siendo dominante el cloruro de sodio. Las combinaciones Na+Mg y Na+K no permiten a los respectivos puntos representativos ubicarse por encima de las rectas equimolares. Puesto que el cloruro de calcio es extremadamente soluble, es más probable que la salinización de las aguas diluidas se deba a antiguas salmueras residuales de tipo Na-Ca / Cl. El agua cuya composición parece más influenciada por esas salmueras es MAR-30.

Vías evolutivas y relación con la geología

En la tabla 1, es muy difícil distinguir las principales tendencias de la química de aguas en base a la tradicional clasificación cationes / aniones. Al contrario, las vías evolutivas presentan un cuadro más claro. Los aportes diluidos pertenecen todos a las vías carbonatada y sulfatadas, lo que refleja composiciones adquiridas por alteración de rocas volcánicas o plutónicas (vía carbonatada y alcalina sulfatada) o volcano-sedimentarias (vía neutra sulfatada). Ningún agua diluida pertenece a la vía calcica que caracteriza terrenos sedimentarios. Al contrario, los aportes salobres pertenecen en su gran mayoría a la vía calcica. El mapa geológico no es muy detallado, pero muestra claramente que no hay relación clara entre la litología superficial allí presentada y las vías evolutivas. Eso confirma que el cambio de evolución hacia la vía calcica de las aguas de aporte cuando se salinizan se debe a una adición de calcio por mezclas de antiguas salmueras de tipo Na-Ca / Cl con aguas diluidas de vía carbonatada o sulfatada. Las salmueras del salar pertenecen en su mayoría a la vía calcica, lo que indica la predominancia de los aportes salobres en la alimentación en sales del salar.

Evolución cuantitativa de aguas

A primera vista, basandose en las solas observaciones hidrológicas, el sistema lagunar de Maricunga parece sencillo: Las aguas de aporte alimentan la laguna salobre Santa Rosa que desagua por un río interno en el salar mismo formando lagunas someras de salmueras concentradas. En realidad, el esquema no es tan simple.

Veamos la evolución cuantitativa de las aguas de aporte cuando se evaporan. La tabla 2 presenta la composición calculada de las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta la salinidad de las aguas de la laguna Santa Rosa. 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 (MAR-xxE) y las aguas de la laguna. Presentamos solamente las tres aguas evaporadas que mejor se ajustan. Las aguas 10 y 11 de la laguna, que pertenecen a la vía sulfatada, derivan de aguas de aporte del sur de la cuenca : MAR-1, 2, 3, 7, pero con coeficientes de desviación no muy buenos, lo que sugiere mezclas con otras aguas, tal vez del sector oeste como lo sugiere la similitud de MAR-26E con la laguna MAR-10. Las aguas 20 y 22 de la laguna, que pertenecen a la vía cálcica, provienen en gran parte de la evaporación de las vecinas aguas de aporte 21 y 26 de la orilla sur-occidental del salar. Pero aquí también el coeficiente de desviación no es perfecto. Hay otras influencias del sur (7) y del este (15) de la cuenca. La laguna Santa Rosa recibe entonces aguas de varias napas de origen y composición distintos.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
MAR-11	7,83	0,249	124	643	2,59	10,2	141	14,4	1,16	154	30,9	
MAR-2E	8,22	0,812	75,5	655	2,49	33,4	129	26,7	1,22	159	26,2	0,177
MAR-3E	8,24	0,851	301	394	4,70	28,5	195	17,9	1,64	131	22,4	0,255
MAR-1E	8,19	0,743	49,3	683	1,70	33,4	106	23,5	0,826	184	24,4	0,256
MAR-10	8,62	0,928	2170	1780	8,67	13,7	1240	74,3	9,09	622	170	
MAR-3E	8,03	0,717	1720	2220	26,9	32,9	1110	102	9,36	653	128	0,202
MAR-26E	7,99	0,556	2760	1090	6,47	32,6	1360	116	8,17	661	62,1	0,212
MAR-7E	7,99	0,695	2240	1630	32,4	32,7	1120	85,3	10,7	707	125	0,218
MAR-22	8,50	0,804	2370	624	5,78	21,5	1120	64,5	8,05	409	126	
MAR-26E	8,02	0,579	2160	857	5,06	32,8	1060	90,6	6,39	520	48,6	0,132
MAR-7E	8,02	0,689	1750	1280	25,3	32,8	873	66,8	8,35	556	98,1	0,254
MAR-21E	8,07	0,646	2870	81,8	5,24	32,7	1200	64,6	8,59	376	120	0,260
MAR-20	7,48	10,1	4620	410	8,50	23,1	2200	312	11,9	541	250	
MAR-21E	7,98	0,586	5400	154	9,86	32,0	2250	122	16,1	694	226	0,192
MAR-15E	8,29	1,24	4830	547	15,5	32,3	2840	186	15,8	172	141	0,233
MAR-26E	7,93	0,525	4060	1610	9,53	32,3	2000	170	12,0	966	91,4	0,309

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

Tabla 2 : Comparación de los aportes evaporados con las aguas de la laguna Santa Rosa.

Apliquemos el mismo enfoque al canal interno (23) que conecta la laguna Santa Rosa al resto del salar (Tabla 3).

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
MAR-23	8,28	2,50	5640	778	22,3	16,8	2990	174	23,2	545	226	
MAR-(16+22)	8,06	0,842	5570	955	28,6	29,3	2770	271	23,0	580	222	0,060
MAR-(15+22)	8,06	0,762	5490	1070	15,2	29,3	2840	177	18,2	586	231	0,060
MAR-22E	7,98	0,621	5320	1390	12,8	29,3	2440	143	17,9	885	281	0,132
MAR-15E	8,27	1,24	5700	646	18,3	32,1	3350	220	18,7	199	166	0,154
MAR-20E	8,10	0,832	6030	527	10,9	29,2	2760	401	15,2	452	322	0,187
MAR-10E	8,02	0,709	4300	2540	16,8	26,6	2330	144	17,6	807	330	0,195
MAR-12E	8,10	1,19	5410	873	69,1	32,0	2980	337	26,4	429	105	0,247
MAR-17E	8,11	1,15	5330	984	61,5	32,0	2980	352	27,9	429	95,8	0,253
MAR-21E	7,96	0,574	6370	182	11,6	31,8	2660	143	19,1	817	267	0,261
MAR-7E	7,96	0,881	4440	2170	64,2	32,1	2210	169	21,2	944	249	0,268
MAR-26E	7,92	0,520	4850	1820	11,4	32,1	2390	204	14,4	1110	109	0,273
MAR-16E	8,23	1,40	5850	443	47,1	32,0	3150	421	28,9	225	152	0,279

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

Tabla 3 : Comparación de los aportes evaporados con el agua del río interno.

Las aguas evaporadas que más se acercan a la composición del canal provienen de la laguna (22E, 20E, 10E) pero con coeficientes de desviación no muy buenos. Hemos simulado la evaporación de mezclas del agua de la laguna (22) con otras aguas de aportes. Buenos resultados fueron obtenidos con mezclas de la laguna con aguas del sector oriental de la cuenca : MAR-15 y 16. Las proporciones fueron de 50% (16) + 50% (22) y de 80 % (15) + 20 % (22). Las mezclas evaporadas se parecen mucho más al canal que las aguas evaporadas individualmente. El canal proviene entonces de la mezcla de la laguna con napas del oeste de la cuenca de drenaje. En vista de las proporciones de cada aporte, es muy probable que dominan los aportes orientales sobre la laguna en la alimentación del canal. Esos aportes orientales deben alimentar el canal por una larga vertiente difusa (vegas) a lo largo de su ribera.

La laguna del norte del salar (MAR-14) parece derivar de la evaporación de una mezcla de aguas del extremo sur de la cuenca (21, 23, 20) con aguas del sector oriental (15, 16), (Tabla 4). La influencia de aguas de aporte del otro extremo del salar es sorprendente. Sugiere que las aguas del canal interno 23 llegarían hasta la orilla norte del salar.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
MAR-14	8,39	2,32	8910	109	21,7	23,4	4720	317	32,3	421	224	
MAR-21E	7,91	0,561	9000	257	16,4	31,2	3760	203	26,9	1150	377	0,221
MAR-15E	8,23	1,24	8070	914	25,9	31,4	4740	311	26,4	272	235	0,283
MAR-23E	8,03	0,857	8170	1110	31,7	23,8	4150	247	33,1	721	321	0,332
MAR-20E	8,06	0,807	8520	745	15,4	28,7	3910	567	21,6	632	455	0,351
MAR-16E	8,19	1,50	8270	627	66,6	31,4	4450	596	40,9	308	215	0,363

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

Tabla 4 : Comparación de los aportes evaporados con el agua de la laguna norte.

La tabla 5 compara la composición de aguas evaporadas con dos salmueras concentradas (24 y 25) de lagunas alimentadas por el canal interno.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESVIO
MAR-24	7,45	3,08	50400	634	122	23,0	26000	1850	205	3010	1510	
MAR-14E	7,84	1,45	50500	619	123	20,6	26600	1800	182	2150	1260	0,017
MAR-21E	7,61	0,951	50600	1440	92,3	22,8	21100	1140	151	6410	2120	0,168
MAR-26E	7,68	1,12	48800	2410	115	23,0	24000	2050	145	4450	1100	0,175
MAR-22E	7,74	1,31	49500	2770	119	20,7	22700	1330	166	3910	2610	0,211
MAR-23E	7,79	1,89	48200	3560	187	20,9	24500	1460	195	2960	1900	0,225
MAR-20E	7,78	1,13	48600	3360	88,1	20,9	22300	3230	123	3160	2590	0,284
MAR-15E	7,93	1,99	45400	5150	146	23,1	26700	1750	149	1430	1320	0,311
MAR-16E	7,89	3,87	46600	3530	375	23,1	25100	3360	231	1640	1210	0,372
MAR-25	5,60	22,3	204000	662	791	23,0	86000	8840	1050	18500	8240	
MAR-24E	7,04	3,81	201000	638	475	4,66	99800	7360	817	11000	5990	0,254
MAR-22E	6,87	4,15	204000	483	545	4,30	87200	6450	805	13500	12600	0,259
MAR-23E	6,63	2,84	202000	813	842	4,34	96100	7510	1000	7800	9760	0,267
MAR-26E	7,13	3,71	177000	763	417	6,94	87300	7450	526	12800	4000	0,272
MAR-14E	7,07	3,54	200000	846	494	4,66	104000	7470	759	8170	5260	0,305
MAR-M1E	6,64	2,63	199000	1040	894	4,56	98900	9710	823	6430	7940	0,306
MAR-21E	6,90	3,55	196000	374	358	5,66	81900	4420	587	22700	8230	0,319
MAR-20E	7,20	4,05	202000	884	367	4,54	92300	13500	513	7690	10800	0,389

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

Tabla 5 : Comparación de los aportes evaporados con salmueras de las lagunas occidentales.

El punto sobresaliente es la buena concordancia entre el agua evaporada de la laguna norte (14E) con la salmuera de la laguna (24). Es de lejos la mejor concordancia observada en Maricunga. Sin embargo, es hidrológicamente obvio que la alimentación de la laguna (23) proviene del sur del salar por el canal interno. De hecho, después de MAR-14E, siguen en orden de similitud aguas del sur : MAR-21E, 26E, 22E, 23E, 20E. Eso sugiere que en realidad no es el agua de la laguna norte que alimenta y se evapora para generar la laguna oeste (24), sino que la salmuera de la laguna (24), o la principal agua que la alimenta, llega hasta el extremo norte del salar. El movimiento general de las aguas del salar, tanto superficiales como subterráneas, se hace de sur a norte sugiriendo una leve inclinación del salar en esta dirección. En apoyo a esta hipótesis se puede notar que el agua de napa (19) al norte del salar tiene una salinidad elevada de 50 g/l. Se trata probablemente de la salmuera subterránea del salar desplazada hacia el norte de la cuenca (la alta salinidad de (19) no se debe a la contaminación por el hierro de la tubería). Estando muy cerca el límite con la cuenca del salar de Pedernales, podría ocurrir alguna infiltración de soluciones salinas desde Maricunga hacia Pedernales. Hemos observado un proceso similar en el salar de Coposa.

Calidad de las aguas

A pesar de existir un buena cantidad de aportes, pocos son de calidad aceptable para el consumo humano o para el riego. De las aguas que hemos prelevado, solamente cuatro cumplen estrictamente con la norma chilena de potabilidad :

- el río Pastillito alto (9)
- el pozo del campamento Marte (18)
- la captación Cerro Nevado (28)
- la vertiente Codocedo (29)

Seis aguas cumplen con la norma de riego : (1, 2, 27, 28, 29, 30) aunque algunas sobrepasan de poco las normas. El principal contaminante es el arsénico. Por ejemplo, el muy diluido río Barros

Negros (8) de solamente 162 mg/l de salinidad contiene tres veces más arsénico que lo permitido. Sin embargo, la potencialidad de la cuenca en recurso de agua es buena. Mezclando varias aguas se puede bajar su contenido en arsénico. Por otra parte, las resevas parecen altas como lo muestra el número elevado de arroyos.

Balance hídrico de las lagunas

Podemos tratar de estimar ordenes de magnitud de los balances hídricos de las lagunas de Maricunga. Sea el caso de la laguna Santa Rosa que tiene un exutorio. El calculo del caudal saliente es identico al de las infiltraciones. Las formulas no distinguen perdidas superficiales (exutorio) y perdidas subterráneas (infiltraciones). La concentración de los aportes a la laguna Santa Rosa es el promedio de las aguas 1, 2, 3, 7, 21, 26 que aparecen en la tabla 2 como las principales aguas que la alimentan. La concentración de la laguna es el promedio de las cuatro muestras 10, 11, 20, 22. La altura de evaporación ha sido reducido de 10 % en las lagunas del salar por su salinidad. No tenemos suficientes datos para tratar de estimar las infiltraciones de las lagunas del salar. Los parámetros considerados son :

	<u>Laguna Santa Rosa</u>	<u>Lagunas del salar</u>
H_e =	1,1 m/año	1 m/año
H_p =	0,12 m/año	0,12 m/año
S =	0,15 km ²	5,85 km ²
C_{ap} =	1,3 g/l	-
C_L =	5,3 g/l	-

Se obtiene para la laguna Santa Rosa :

Volumen de aporte : $V_{ap} = S(H_e - H_p) / (1 - C_{ap} / C_L) = 165\ 000\ m^3/año = 5\ l/s$

Volumen de salida : $V_{ex} = S(H_e - H_p) / (1 - C_L / C_{ap}) = 18\ 000\ m^3/año = 0,5\ l/s$

y para las lagunas del salar :

Volumen de aporte : $V_{ap} = S(H_e - H_p) = 5\ 150\ 000\ m^3/año = 163\ l/s$

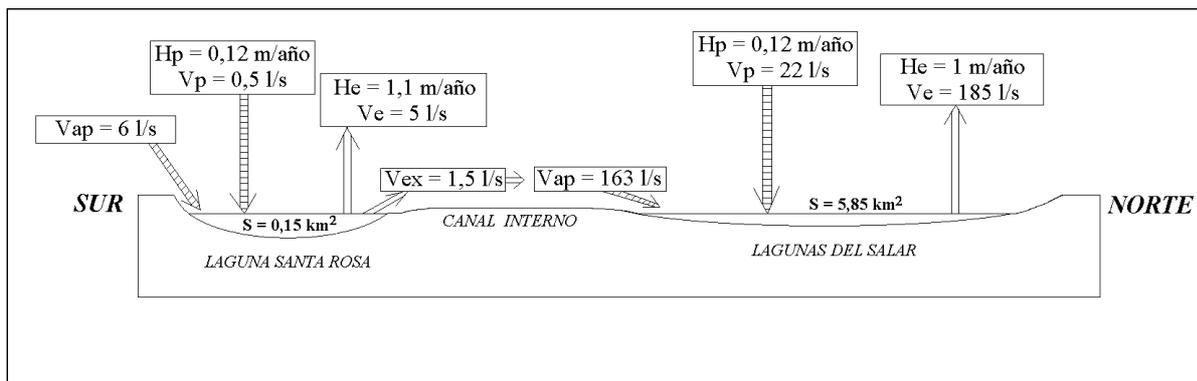


Fig.4 : Balance hídrico de las lagunas del salar de Maricunga

La figure 4 resume los principales movimientos de agua en Maricunga. Se nota la contribución mínima de la laguna Santa Rosa en la alimentación del salar, lo que ya habíamos sospechado en

el estudio de la evolución cuantitativa de aguas. El canal se origina principalmente por aportes laterales como vertientes difusas y vegas. Notamos también que habíamos estimado muy gruesamente, y puntualmente, el caudal del canal a 200-300 l/s, un orden de magnitud en buen acuerdo con el valor calculado.

Conclusiones

Las aguas de aporte al salar de Maricunga presentan una gran variedad de composiciones químicas. Sin embargo, reducidas a sus vías evolutivas, se distingue dos grandes grupos de aguas de aporte :

- aguas diluidas ($STD < 1 \text{ g/l}$) de vía evolutiva sulfatada (y algunas de vía carbonatada) que deben sus componentes disueltos a la alteración de las rocas de la cuenca de drenaje.

- aguas salobres ($1 < STD < 4 \text{ g/l}$) de vía evolutiva calcica que han redissuelto antiguas salmueras residuales de tipo Na-Ca /Cl.

La laguna Santa Rosa, al sur del salar contiene los dos tipos de aguas, sulfatadas y cálcicas, reflejando así una gran complejidad hidrológica. Las salmueras del salar son todas de tipo Na-(Ca)-(Mg) / Cl y pertenecen a la vía cálcica. Proviene de la evaporación de mezclas de aguas de aporte del sur y del este de la cuenca.

El canal que une la laguna Santa Rosa al salar recibe la mayor parte de su agua de vertientes difusas y vegas a lo largo de su curso. El rebalse de la laguna Santa Rosa contribuye poco a su caudal.

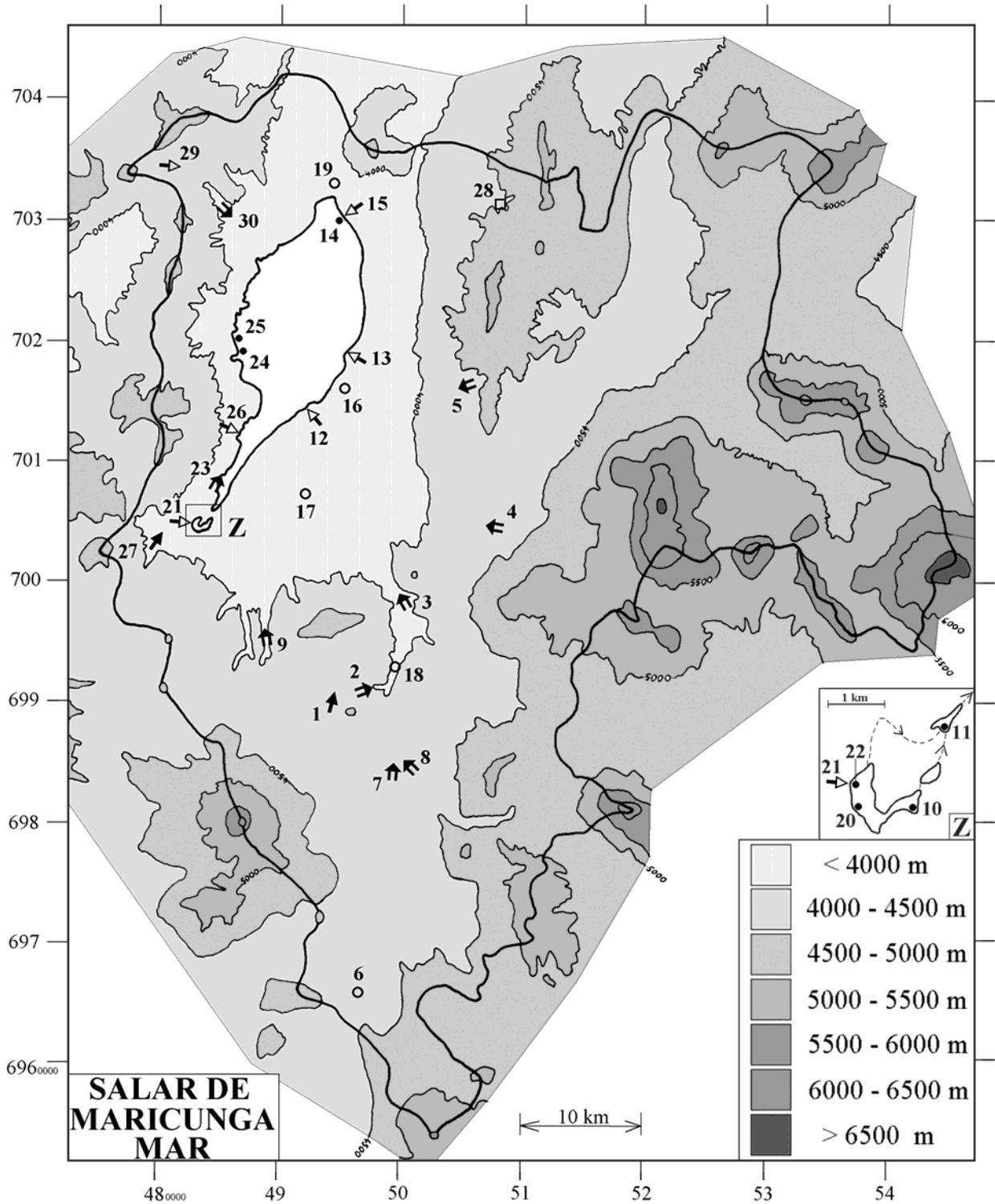
Salmueras del extremo norte del salar parecen provenir de aguas del sur del salar, lo que sugiere un movimiento general de las soluciones hacia el norte, posiblemente debido a un leve basculamiento de la cuenca de sur a norte.

Existen varios arroyos cuenca arriba que portan importantes recursos de agua, sin embargo, el arsénico limita notablemente su uso potable. Además la salinización por antiguas salmueras aumenta la salinidad de algunas napas muy por encima de las normas de potabilidad o de riego.

Referencias y estudios anteriores

Niemeyer, H. 1968. Estudio de las cuencas cerradas de la cuenca de Copiapó. Ministerio de Obras Publicas y Transportes, Dirección de Riego, 110p.

Tassara A. 1997. Geología del salar de Maricunga, Región de Atacama. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe IR-97-10, 30p.



SALAR DE MARICUNGA

MAR

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
MAR-1	11/05/95	11 ^H 50	494413	6989578	4150	Manantial corriente
MAR-2	11/05/95	12 ^H 30	497513	6991134	4050	Río Villalobos (aforo)
MAR-3	11/05/95	13 ^H 35	499668	6998178	3950	Río Valle Ancho, La Barrera (aforo)
MAR-4	11/05/95	15 ^H 00	506958	7004804	4350	Río Lomas (aforo)
MAR-5	11/05/95	16 ^H 25	504347	7015496	4200	Río Colorado
MAR-6	14/05/95	10 ^H 35	496602	6965783	4350	Napa (pozo, Pampa Pantanillo)
MAR-7	14/05/95	17 ^H 00	499730	6984412	4100	Río Valle Ancho, Barros Negros (aforo)
MAR-8	14/05/95	17 ^H 30	500003	6984206	4100	Río Barros Negros
MAR-9	15/05/95	10 ^H 40	488744	6995970	3950	Río Pastillito alto
MAR-10	15/05/95	11 ^H 45	483951	7004296	3760	Laguna Santa Rosa
MAR-11	15/05/95	12 ^H 20	484551	7005811	3760	Laguna Santa Rosa
MAR-12	15/05/95	14 ^H 30	492259	7014425	3761	Manantial difuso (bofedal)
MAR-13	15/05/95	14 ^H 55	495144	7018835	3761	Manantial difuso
MAR-14	15/05/95	15 ^H 30	494771	7029860	3760	Laguna
MAR-15	15/05/95	15 ^H 45	495240	7030380	3761	Manantial difuso
MAR-16	15/05/95	16 ^H 30	495157	7016400	3770	Napa (pozo Manto de Oro MDO-8)
MAR-17	15/05/95	17 ^H 00	492271	7008333	3830	Napa (pozo MDO-SR-2)
MAR-18	15/05/95	17 ^H 30	499640	6993269	3950	Napa (pozo campamento Marte)
MAR-19	17/05/95	11 ^H 00	493213	7032371	3770	Napa (pozo MDO-12 o SR-13)
MAR-20	18/05/95	10 ^H 45	482865	7004431	3760	Laguna Santa Rosa
MAR-21	18/05/95	11 ^H 15	482864	7004791	3762	Manantial difuso
MAR-22	18/05/95	11 ^H 30	482874	7004791	3760	Laguna Santa Rosa
MAR-23	18/05/95	11 ^H 50	485703	7008920	3760	Río desagüe Lag. Santa Rosa
MAR-24	18/05/95	12 ^H 10	486700	7018195	3760	Laguna
MAR-25	18/05/95	12 ^H 30	486294	7019282	3760	Laguna muy superficial
MAR-26	18/05/95	16 ^H 30	486686	7012299	3761	Manantial difuso
MAR-27	18/05/95	17 ^H 00	479972	7003091	3900	Manantial corriente
MAR-28	15/11/95	12 ^H 15	508052	7031230	4450	Captación Cerro Nevado
MAR-29	15/11/95	14 ^H 00	480562	7034286	4180	Manantial difuso (Codocedo)
MAR-30	15/11/95	15 ^H 30	484681	7031730	3975	Río Caballo Muerto

SALAR DE MARICUNGA

MAR

NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
MAR-1	640,0	5,5	9,2	1,000	8,22	0,462	17,8	0,018	0,0189	241	3,46	0,614	20,2	0,13	38,2	8,48	0,298	72,6	8,80
MAR-2	723,0	3,8	6,2	1,000	7,18	0,784	30,4	0,050	0,0341	256	nd	1,00	23,1	0,11	52,0	10,8	0,490	76,2	10,5
MAR-3	1234	7	8,9	1,000	8,35	1,47	188	0,25	0,0551	252	0,136	3,01	18,4	0,25	128	11,4	1,05	102	14,3
MAR-4	4110	17,4	7,0	1,002	7,13	6,67	1050	1,37	0,0655	114	nd	12,2	40,3	1,7	577	74,7	5,41	201	19,0
MAR-5	583,0	3,9	7,0	1,000	8,35	3,82	35,5	0,005	0,0201	58,6	0,428	2,18	16,1	0,75	66,5	3,48	0,228	47,3	10,1
MAR-6	760,0	5,6	na	1,000	8,31	2,33	86,6	0,189	0,127	116	1,56	3,02	13,5	0,56	118	9,46	0,434	24,5	8,89
MAR-7	2117	0,9	7,7	1,001	8,30	2,22	433	0,583	0,125	320	nd	6,33	15,1	0,37	221	16,7	2,09	180	24,5
MAR-8	172,0	3	8,0	1,000	8,10	0,868	3,42	0,003	0,0019	31,9	nd	0,198	17,9	0,16	15,4	1,76	0,055	15,2	2,26
MAR-9	540,0	3,4	3,4	1,000	6,06	0,285	78,1	0,095	0,0107	130	nd	1,50	21,9	0,016	72,0	9,31	0,805	26,1	6,05
MAR-10	9240	6,6	6,5	1,005	8,62	0,928	2170	1,12	0,192	1780	3,11	8,67	13,7	0,29	1240	74,3	9,09	622	170
MAR-11	1490	6,2	7,5	1,001	7,83	0,249	124	0,162	0,0676	643	13,5	2,59	10,2	0,25	141	14,4	1,16	154	30,9
MAR-12	4800	7,2	4,8	1,002	7,65	5,27	1250	1,49	0,0513	204	nd	16,1	26,6	0,90	699	78,6	6,15	200	24,5
MAR-13	2700	6	6,3	1,001	8,39	1,66	678	0,772	0,0551	174	5,28	10,6	17,5	1,6	428	41,8	3,73	60,2	16,3
MAR-14	29000	6	6,3	1,011	8,39	2,32	8910	2,56	0,0641	109	14,9	21,7	23,4	0,13	4720	317	32,3	421	224
MAR-15	1913	8,3	na	1,001	8,50	1,89	490	0,184	0,0217	55,7	12,2	1,58	24,5	0,029	290	19,0	1,61	52,9	14,3
MAR-16	7000	8	na	1,003	7,12	4,50	2200	1,97	0,0676	169	3,37	17,9	27,0	0,31	1220	161	11,0	165	57,8
MAR-17	3690	11,9	na	1,001	7,09	3,74	927	1,16	0,127	175	0,589	10,9	29,4	0,11	543	62,6	4,96	147	17,0
MAR-18	639,0	4,8	na	1,000	9,75	2,53	29,7	0,043	0,0605	130	nd	1,50	1,46	0,0097	109	19,4	0,888	6,66	5,01
MAR-19	73100	9	na	1,037	7,20	na	30800	9,67	0,235	171	8,62	49,6	1,15	0,0002	16200	1230	91,6	1240	680
MAR-20	7540	0	3,5	1,006	7,48	10,1	4620	1,06	0,0338	410	0,118	8,50	23,1	0,056	2200	312	11,9	541	250
MAR-21	4400	10,4	6,4	1,002	7,80	0,518	1370	0,501	0,0174	39,2	12,3	2,51	26,3	0,0097	577	30,9	4,11	184	57,6
MAR-22	15000	10,5	7,0	1,004	8,50	0,804	2370	0,959	0,115	624	11,7	5,78	21,5	0,11	1120	64,5	8,05	409	126
MAR-23	16800	4,5	9,0	1,008	8,28	2,50	5640	3,07	0,299	778	1,07	22,3	16,8	0,14	2990	174	23,2	545	226
MAR-24	120000	8,8	4,3	1,060	7,45	3,08	50400	22,1	0,355	634	9,42	122	23,0	0,46	26000	1850	205	3010	1510
MAR-25	200000	2,8	0,5	1,218	5,60	22,3	204000	106	2,39	662	25,6	791	23,0	5,4	86000	8840	1050	18500	8240
MAR-26	3240	6,1	4,0	1,001	7,60	0,959	806	0,313	0,0447	325	3,74	1,92	33,9	0,014	412	34,4	2,43	213	18,5
MAR-27	366,0	7,2	5,3	1,000	7,81	0,722	39,8	0,068	0,118	45,9	26,9	0,265	13,0	0,061	32,7	3,22	0,021	28,5	4,25
MAR-28	298,0	6	6,6	1,000	8,40	2,24	42,6	0,022	0,0114	48,7	27,5	0,346	8,76	0,023	34,5	0,821	0,042	40,9	15,7
MAR-29	113,0	7,4	1,5	1,000	6,90	0,947	6,57	0,004	0,0051	30,9	nd	0,216	11,1	0,0048	9,52	2,23	0,035	22,6	2,65
MAR-30	946,0	14,3	4,0	1,000	7,75	3,53	376	0,321	0,0291	123	0,924	0,400	20,9	0,016	50,8	11,4	0,097	182	64,2

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 MARICUNGA

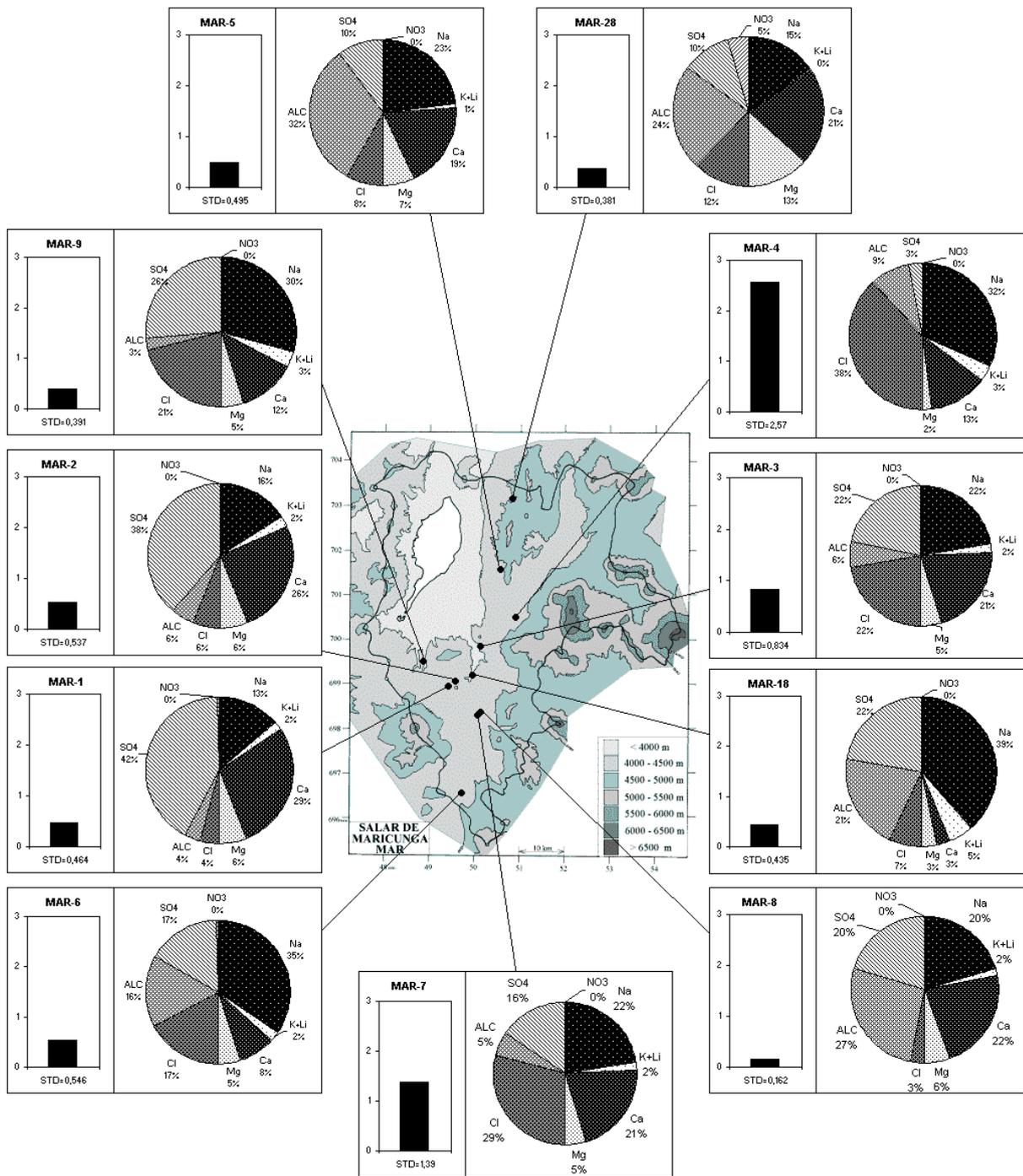
MAR

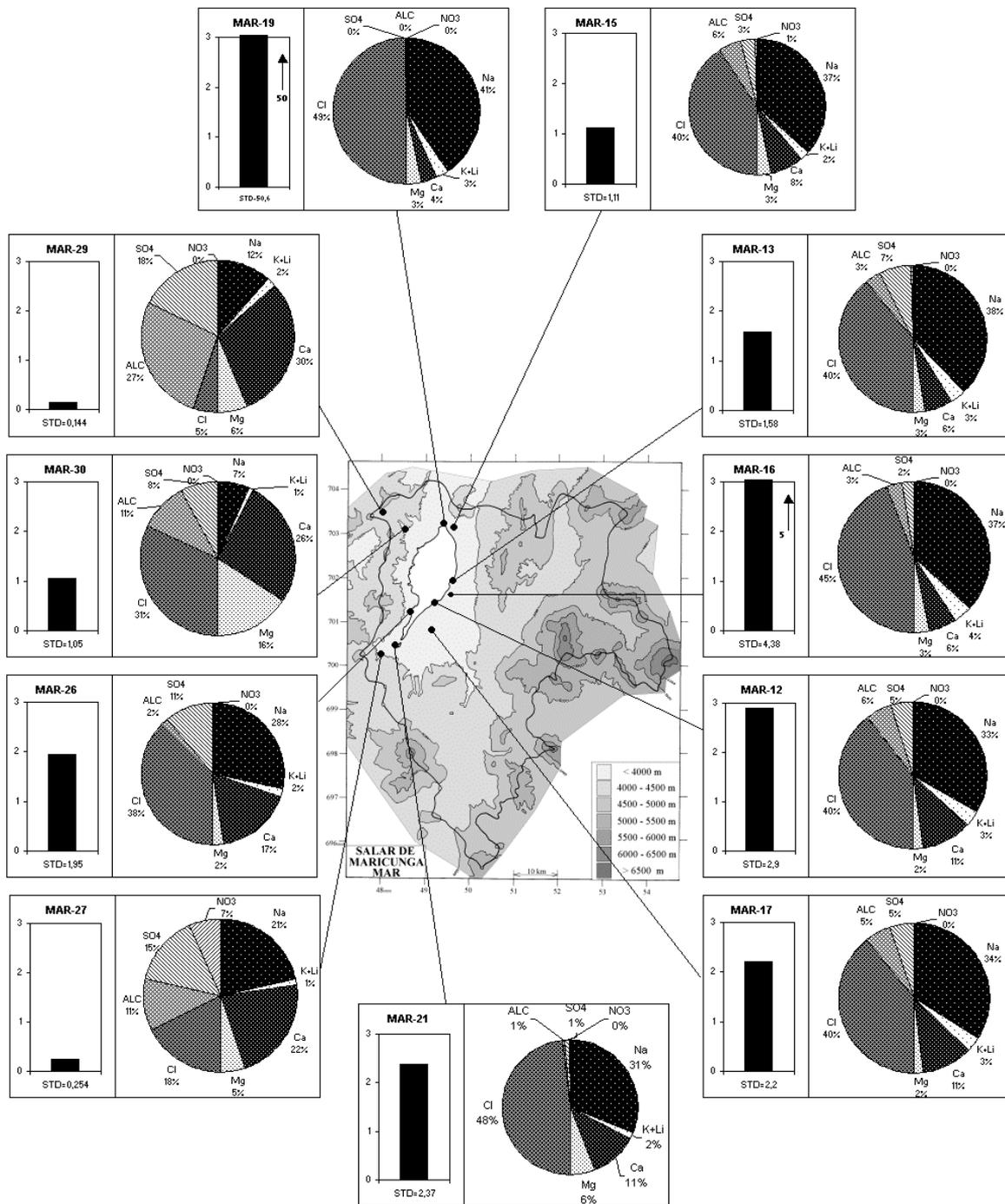
NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF. %
MAR-1	463,9	26,8	0,30	0,33	6,264	6,039	3,7
MAR-2	537,3	47,6	0,06	6,6	7,272	6,980	4,1
MAR-3	834,2	84,2	1,68	0,70	12,27	12,00	2,2
MAR-4	2573	404	0,96	44	39,35	38,55	2,1
MAR-5	494,9	225	3,06	2,2	6,206	6,047	2,6
MAR-6	545,7	137	1,50	1,4	7,387	7,216	2,3
MAR-7	1385	127	2,46	1,5	21,36	21,08	1,3
MAR-8	161,9	52,2	0,24	0,97	1,667	1,628	2,3
MAR-9	391,0	17,4	0	33	5,282	5,185	1,9
MAR-10	6168	37,7	3,48	0,15	101,9	98,98	2,9
MAR-11	1168	14,4	0,12	0,41	16,91	17,35	2,6
MAR-12	2896	315	1,74	13	45,30	44,81	1,1
MAR-13	1580	91,5	1,62	0,70	24,55	24,47	0,3
MAR-14	15004	111	5,52	0,70	257,2	255,8	0,5
MAR-15	1107	107	2,58	0,62	17,14	17,05	0,5
MAR-16	4379	273	0,48	35	71,60	70,17	2,0
MAR-17	2203	227	0,36	30	34,66	33,49	3,4
MAR-18	435,3	101	22,7	0,04	6,089	6,068	0,3
MAR-19	50618	-	-	-	866,2	872,7	0,8
MAR-20	9032	608	3,60	40	152,9	148,6	2,8
MAR-21	2368	30,2	0,30	0,79	40,40	40,03	0,9
MAR-22	4844	36,6	2,52	0,18	82,11	80,79	1,6
MAR-23	10641	127	5,10	1,1	183,6	177,7	3,3
MAR-24	83950	144	3,84	6,6	1481	1436	3,0
MAR-25	329671	-	-	-	5720	5787	1,2
MAR-26	1952	57,5	0,30	2,7	31,25	30,50	2,4
MAR-27	253,5	43,6	0,18	1,4	3,275	3,233	1,3
MAR-28	380,9	132	2,16	1,1	4,859	4,897	0,8
MAR-29	143,6	57,7	0	15	1,822	1,776	2,6
MAR-30	1046	210	2,16	6,2	16,90	16,71	1,1

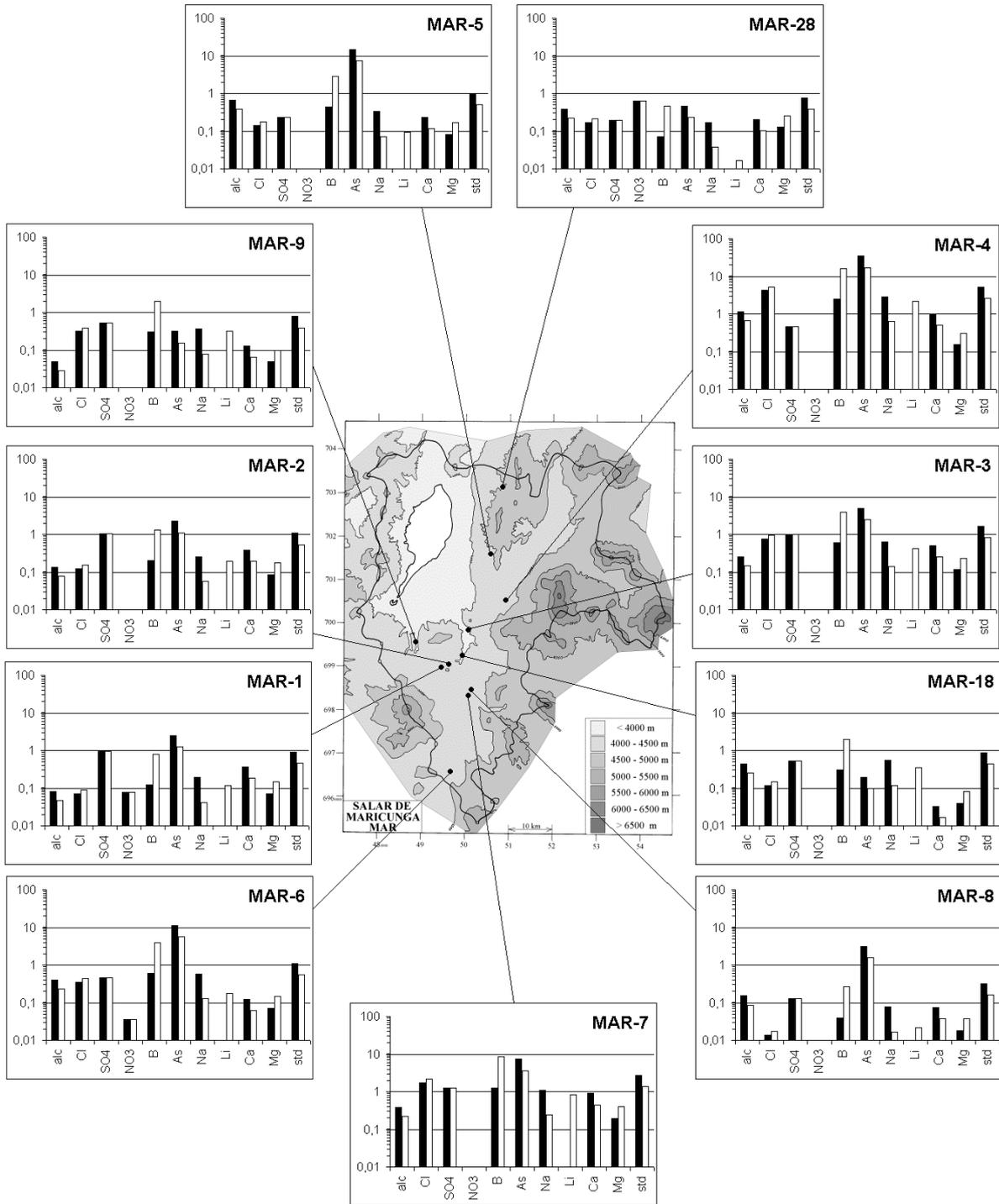
NUMERO	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
MAR-28	-7,84	-62
MAR-29	-8,60	-74
MAR-30	-6,73	-65

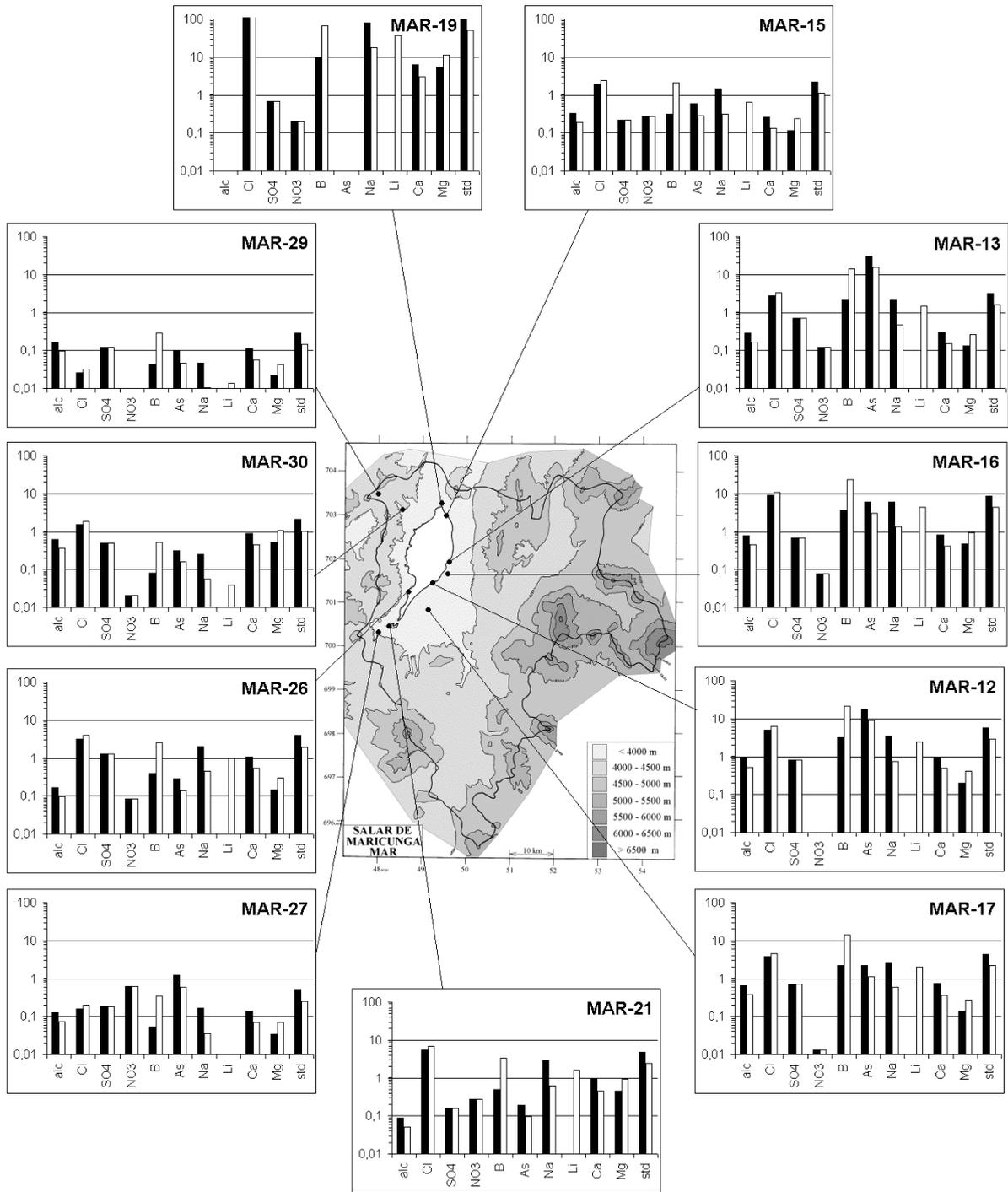
Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.
 S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l)
 DIF.% = diferencia en %

Análisis de oxígeno-18
 y deuterio





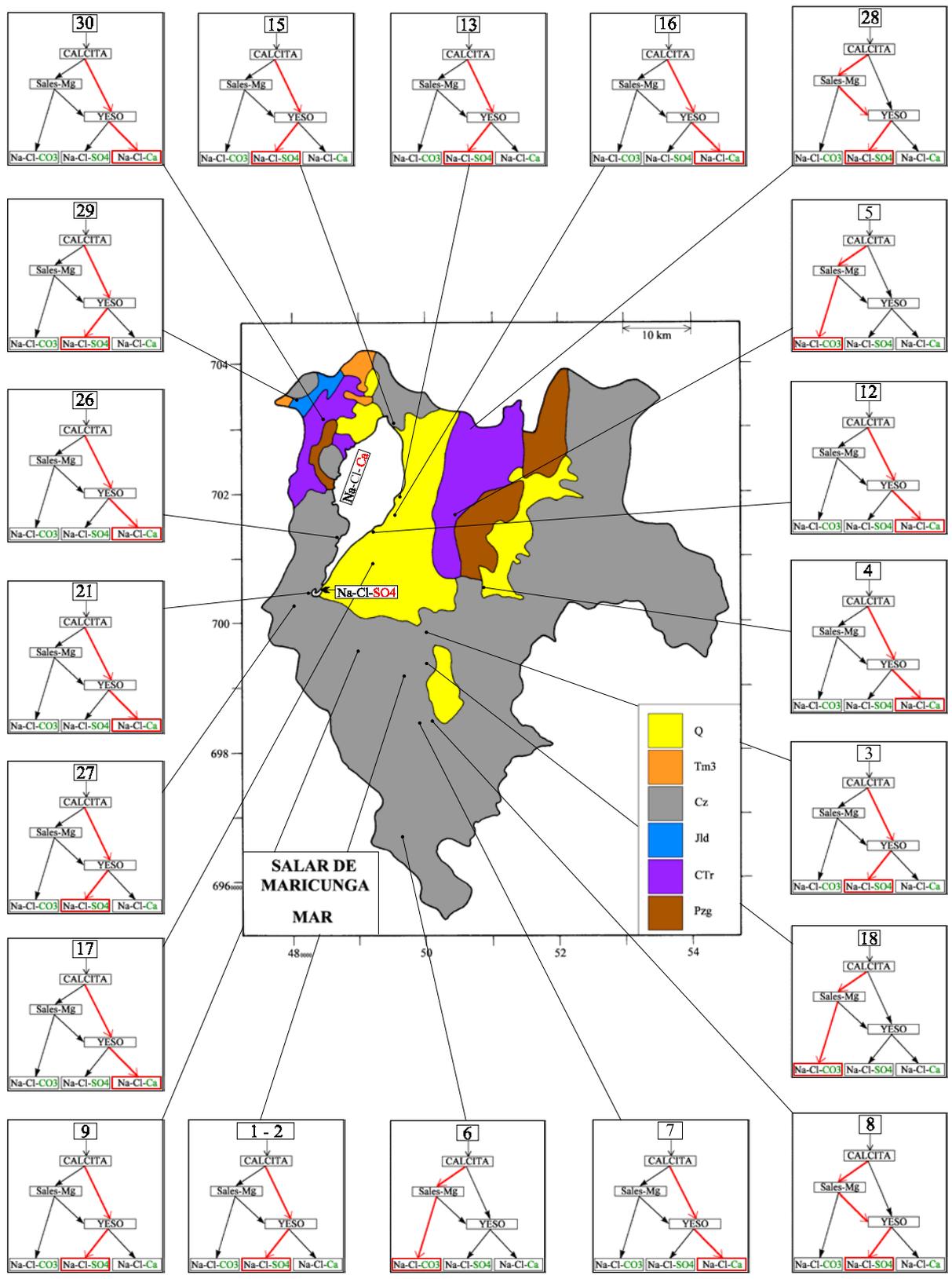




MAPA GEOLOGICO Y VIAS EVOLUTIVAS

MAR

- Q** : *Cuaternario*. Sedimentos fluviales, lacustres, glaciales, eólicos aluviales, coluviales y laháricos.
- Tm3** : *Mioceno*. Gravas de Atacama. Gravas, arenas y limos subordinados, localmente con litificación incipiente e intercalaciones de ignimbritas.
- Cz** : *Cenozoico*. Rocas volcánicas: dacitas - andesitas.
- Jld** : *Jurásico (Lias - Dogger)*. Areniscas, areniscas calcáreas, calizas, margas, lutitas, conglomerados y cherts. Desarrollo de facies evaporíticos en el Jurásico sup. de la Cordillera de los Andes.
- CTR** : *Carbonífero - Triásico (?)*. Tobas, brechas, coladas e ignimbritas principalmente riolíticas y dacíticas, con intercalaciones de sedimentitas clásticas. Cuerpos hipabisales dacíticos y riolíticos asociados.
- Pzg** : *Paleozoico*. Rocas plutónicas e hipabisales.



LAGUNA DEL NEGRO FRANCISCO

Introducción

Siguiendo la Cordillera de los Andes desde el extremo norte de Chile hacia el sur, se encuentra más de cincuenta cuencas cerradas ocupadas por lagos, lagunas o salares. La última cuenca cerrada, la más austral, contiene la laguna del Negro Francisco en la Tercera Región. Más al sur, todas las cuencas andinas están abiertas hacia el océano Pacífico. La presencia de ríos y vertientes con aguas de buena calidad incentivo desde hace más de ochenta años varios estudios hidrológicos de la cuenca y de la laguna para el aprovechamiento de sus aguas. Los dos más importantes y confiables son los de Niemeyer (1968) y de Behncke (1987). Estos estudios se centran en gran parte en el balance hídrico de la laguna, el cual depende de la superficie de la laguna. Se ha reportado así la gran variabilidad de la superficie reflejando por lo tanto importantes variaciones del caudal entrante. Los valores de la superficie medidos entre 1909 y 1987 fluctúan entre 14 y 31 km². La profundidad máxima varía entre 0,5 y 7 metros. En el mapa topográfico IGM 1/100 000, aparece una sola laguna de 28 km² de superficie con una isla alargada en dirección este-oeste.

Durante nuestra campaña, en mayo de 1995, hemos observado dos lagunas separadas por un cordón de material de aluvión y conectadas por un canal pegado a la orilla sur :

- una laguna salobre al sur-este de 10,5 km²
- una laguna muy salada al nor-oeste de 14,3 km²

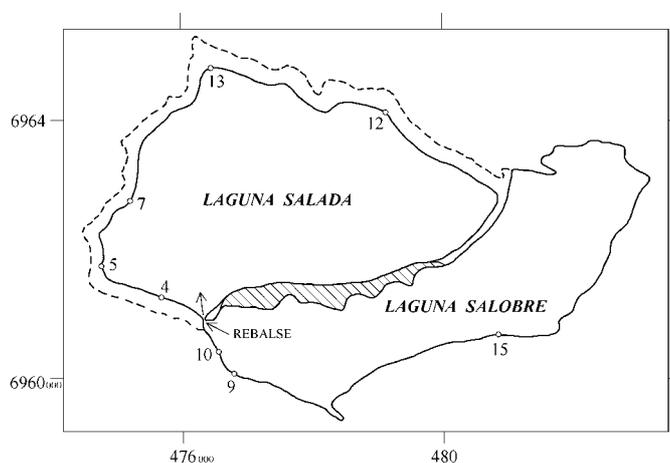


Fig.1 : Extensión de las lagunas del Negro Francisco en mayo de 1995.

En puntillas: orilla en el mapa al 1/100 000; En rayas: isla en el mapa al 1/100 000

El nivel del agua ha bajado y la isla se ha transformado en un cordón casi continuo entre las orillas norte y sur. Hemos localizado varios puntos de muestreo de vertientes y lagunas a metros de la orilla con precisión decamétrica, mediante un GPS. Reportando estos puntos en el mapa topográfico IGM 1/100 000, además de medir las superficies se pudo observar que la laguna salobre no había cambiado de tamaño en relación a lo figurado en el mapa, pero que la superficie

de la laguna salada había disminuido notablemente (Fig.1). La superficie de la laguna salobre está controlada exclusivamente por la altura del punto de rebalse y no por parámetros climáticos. Es una laguna abierta. Al contrario, la superficie de la laguna salada, totalmente cerrada, depende de la evaporación, de la pluviosidad y del volumen de aportes.

Behncke (1987) también encontró dos lagunas durante sus campañas y midió un desnivel de unos 20 cm entre las dos, siendo la laguna salada más baja que la laguna salobre, lo que es muy lógico en vista de la diferencia de salinidad entre las dos lagunas. El fondo de la laguna salada esta tapizado con una costra de mirabilita ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$).

El principal aporte a la laguna parece ser el río permanente Astaburuaga (FRA-16 y 17) que drena el sur-este de la cuenca. Sin embargo, el río se infiltra en sedimentos superficiales antes de llegar a la laguna. Por otra parte, Niemeyer (1968) reportó que en periodos de crecida parte del río rebalsa hacia la cuenca colindante del salar de Maricunga.

Las principales características morfométricas y climatológicas de la laguna del Negro Francisco son :

- altura de la laguna: 4110 m
- superficie de la cuenca: 933 km²
- superficie de las lagunas: 24,8 km² (mayo de 1995)
- precipitaciones: 200 mm/año
- evaporación potencial: 1000 mm/año
- temperatura media: -1°C

La principal contribución de este estudio es presentar e interpretar un conjunto de análisis completos y bien controlados de aguas y salmueras de la laguna y de su cuenca de drenaje.

Composición de las aguas

Presentamos la composición de las aguas de la laguna del Negro Francisco en la figura 2 y en la tabla 1.

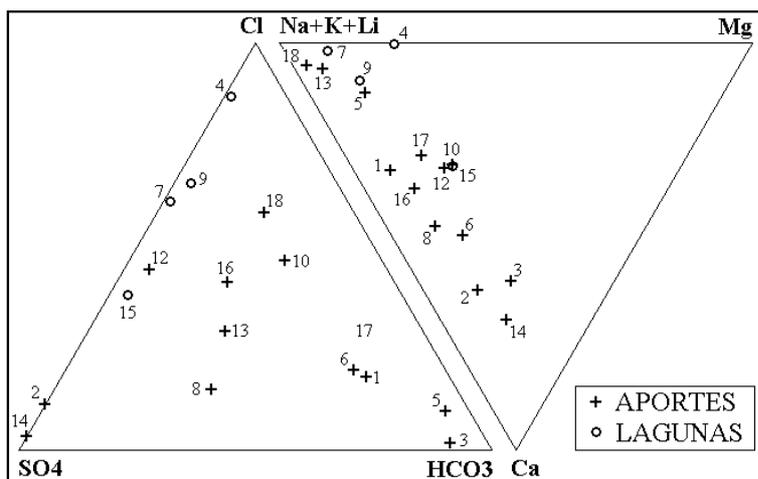


Fig.2: Composición de las aguas y salmueras de la laguna del Negro Francisco

Se puede observar que la composición aniónica de las aguas de aporte es muy variada. Los puntos representativos se reparten en casi todo el triángulo. Se nota la presencia de aguas muy carbonatadas (3, 5) con poco sulfato y otras, totalmente distintas, ácidas (pH ~ 4) y muy sulfatadas (2, 14). En el triángulo de cationes, los puntos de los aportes y de las lagunas se reparten a lo largo de una línea paralela al lado Na-Ca, lo que indica una proporción aproximadamente constante de Mg en las aguas de la laguna del Negro Francisco. Las dos lagunas son de tipo cloro-sulfatado: Na / Cl-SO₄. En vista del gran número de tipos químicos de las aguas de aportes, es mucho mejor considerar las vías evolutivas para clasificarlas.

<u>APORTES</u>	<u>SALINIDAD</u> mg/l	<u>TIPO QUÍMICO</u>		<u>VIA EVOLUTIVA</u>
		CATIONES	ANIONES	
FRA-3	130	Ca- (Na) - (Mg)	/ HCO ₃ - (SO ₄)	CO ₃
FRA-6	183	Ca-Na- (Mg)	/ HCO ₃ - (Cl) - (SO ₄)	SO ₄ (A)
FRA-1	205	Na-Ca- (Mg)	/ HCO ₃ - (Cl) - (SO ₄)	CO ₃
FRA-17	261	Na-Ca- (Mg)	/ HCO ₃ -SO ₄ - (Cl)	CO ₃
FRA-13	280	Na- (Ca) - (Mg)	/ SO ₄ -HCO ₃ -Cl	CO ₃
FRA-8	333	Ca-Na- (Mg)	/ SO ₄ -HCO ₃ - (Cl)	SO ₄ (N)
FRA-16	536	Na-Ca- (Mg)	/ Cl-SO ₄ - (HCO ₃)	SO ₄ (N)
FRA-10	549	Na-Ca- (Mg)	/ Cl-HCO ₃ - (SO ₄)	SO ₄ (A)
FRA-14	756	Ca- (Na) - (Mg)	/ SO ₄	<i>acida</i>
FRA-5	868	Na- (Ca) - (Mg)	/ HCO ₃ - (Cl) - (SO ₄)	CO ₃
FRA-2	1660	Ca-Na- (Mg)	/ SO ₄ - (Cl)	<i>acida</i>
FRA-12	1722	Na-Ca- (Mg)	/ SO ₄ -Cl- (HCO ₃)	SO ₄ (N)
FRA-18	9706	Na- (Ca)	/ Cl- (HCO ₃) - (SO ₄)	CO ₃
<u>LAGUNAS</u>				
FRA-15	3454	Na-Ca- (Mg)	/ SO ₄ -Cl	SO ₄
FRA-9	9467	Na- (Mg) - (Ca)	/ Cl-SO ₄	SO ₄
FRA-7	44753	Na- (Mg)	/ Cl-SO ₄	SO ₄
FRA-4	323143	Na- (Mg)	/ Cl- (SO ₄)	SO ₄

Tabla 1 : Salinidades, tipos químicos y vías evolutivas de las aguas de la laguna del Negro Francisco.

CO₃ = vía carbonatada ; SO₄ (A) = vía alcalina sulfatada

SO₄ (N) = vía neutra sulfatada ; *acida* = agua ácida.

Origen de las sales disueltas

Se observa en la figura 3 que la mayoría de las aguas de aporte se ubican por encima de la recta equimolar Na = Cl, lo que indica un origen de los componentes mayores por alteración de las rocas de la cuenca de drenaje. La vertiente difusa 12, al borde de la laguna, cuyo punto representativo se encuentra sobre la recta equimolar puede ser influenciada por la cuña salina de la laguna. La vertiente corriente FRA-10 también se encuentra sobre la recta equimolar, pero su baja salinidad (549 mg/l), y su posición alejada de los ápices Na y Cl en los diagramas de la figura 1, no abogan por un origen principal de Na y Cl por redisolución de antigua halita. La única agua que ha redisoluelto antiguas evaporitas o salmueras es la vertiente termal FRA-18, en la sub-cuenca del río Astaburuaga, que tiene una salinidad elevada de 9,7 g/l. Su composición (Fig.2) sugiere una redisolución de sales o salmueras más complejas de tipo Na / Cl-HCO₃-SO₄.

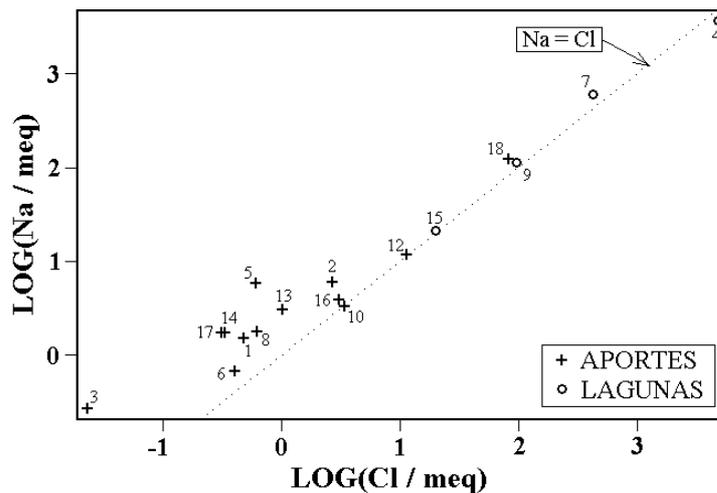


Fig.3 : Relaciones Na versus Cl y en aguas de la Laguna del Negro Francisco.

Vías evolutivas y relación con la geología

Las vías evolutivas están indicadas en la tabla 1 y en el mapa geológico. Solamente disponemos de informaciones geológicas sobre la mitad de la cuenca. Seis aportes, sobre los 13 muestreados, siguen la vía carbonatada al evaporarse. Es una de la proporciones más elevada en todos los salares chilenos que hemos estudiado (con el salar del Huasco en la Primera Región). La laguna del Negro Francisco está al límite de contener salmueras de carbonato de sodio. Lo que impide tal evolución, es la presencia de aportes ácidos que neutralizan los carbonatos cuando se mezclan con otras aguas. También hay cinco aguas que pertenecen a las vías sulfatadas, lo que también contribuye a la composición neutra sulfatada de las lagunas. La relación con la geología de la cuenca no es muy nítida. Las aguas diluidas de vía evolutiva carbonatada, reflejan terrenos volcánicos sin o con poco azufre. Las aguas de vía evolutiva sulfatada, indican lixiviación de rocas volcánicas con azufre o volcano-sedimentarias. La principal formación que aparece en el mapa geológico es el "Volcán Sierra del Azufre" de edad miocena, lo que sugiere la presencia de notables concentraciones de azufre en las rocas volcánicas. Estas concentraciones pueden ser lo suficientemente altas como para producir ácido sulfúrico y volver ácidas algunas aguas superficiales. El mapa geológico no indica las zonas de mayor contenido en azufre, lo que impide relacionar con más detalle la composición de las aguas de aporte con la litología.

La vertiente salada FRA-18 pertenece a la vía evolutiva carbonatada. Con 9,7 g/l de salinidad, es el agua más concentrada que hemos encontrado en todo el norte chileno que sigue la vía carbonatada. Casi todas las aguas de aporte de vía evolutiva carbonatada son muy diluidas porque son aguas de alteración de rocas volcánicas o plutónicas sin impurezas. El anión principal es el bicarbonato, que proviene del gas carbónico del aire. La composición de la vertiente FRA-18 es la más anómala que se ha encontrado en las 52 cuencas estudiadas. La hipótesis más simple es que se trata de la redisolución de sales o salmueras de carbonato de sodio de un antiguo salar recubierto por formaciones volcánicas recientes.

Evolución cuantitativa de aguas

Veamos ahora la evolución cuantitativa de las aguas de aporte cuando se evaporan. La tabla 2 presenta la composición calculada de todas las aguas de aporte evaporadas por simulación computacional hasta la salinidad de las aguas de la laguna. Hemos también simulado la evaporación de las dos aguas de la laguna salobre (15 y 9), puesto que pueden alimentar la laguna salada. 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 (FRA-xxE) y las aguas de laguna. Presentamos solamente las cuatro aguas evaporadas que mejor se ajustan. Las demás tienen un coeficiente de desviación demasiado alto. La laguna salobre proviene principalmente de la evaporación del río Astaburuaga (16) y de la vertiente difusa y salobre (12). Sin embargo, comparando las aguas de aporte evaporadas con el agua de la vertiente salobre (12), se nota que ésta proviene también de la evaporación del río Astaburuaga. El coeficiente de desviación (no incluido en la tabla 2) entre FRA-16E y FRA-12 es de 0,09, lo que sugiere que FRA-12 proviene de una napa alimentada principalmente por el río Astaburuaga. No se puede evaluar la influencia del aporte ácido (14) al nor-este de la laguna, puesto que no podemos simular la evaporación de este tipo de agua.

NUMERO	PH	ALC	CL	SO4	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
<u>FRA-15</u>	8,60	2,15	714	1470	6,59	16,9	492	134	2,90	317	136	
FRA-12E	8,15	0,81	870	1340	11,8	33,1	579	72,1	4,48	300	131	0,136
FRA-16E	8,23	1,02	1000	1120	19,0	33,2	772	60,4	2,90	201	87,8	0,270
FRA-8E	8,28	1,13	378	1830	17,5	33,3	696	64,3	5,48	189	94,9	0,304
FRA-10E	8,55	2,12	1260	775	16,3	33,5	794	105	5,45	43,9	176	0,485
<u>FRA-9</u>	8,95	5,39	3440	2210	38,3	16,2	2580	225	13,8	281	231	
FRA-16E	8,11	1,10	2810	3140	53,2	32,6	2160	169	8,12	525	246	0,148
FRA-12E	8,08	0,95	2680	3440	36,4	32,4	1780	222	13,8	605	404	0,168
FRA-10E	8,42	2,19	3580	2200	46,3	32,7	2250	298	15,5	116	459	0,174
FRA-15E	8,16	1,03	2360	3830	21,8	27,3	1650	442	9,58	520	450	0,252
<u>FRA-7</u>	8,57	10,7	15200	12600	199	8,79	13700	794	59,7	281	775	
FRA-9E	8,18	3,05	17500	10400	190	23,9	12600	1120	68,7	686	1150	0,191
FRA-16E	8,15	4,38	15600	12100	296	29,2	12000	940	45,1	660	1370	0,239
FRA-10E	8,20	4,10	17200	10500	222	28,8	10800	1420	74,0	545	2120	0,290
FRA-12E	8,17	3,80	15500	13100	210	28,6	10300	1280	79,6	636	2330	0,312
<u>FRA-4</u>	7,50	88,5	171000	30700	2130	12,5	85300	11400	916	349	16000	
FRA-10E	6,89	8,36	158000	40400	1590	7,83	76900	13100	584	392	19400	0,066
FRA-16E	6,50	5,12	163000	32800	2300	7,99	87300	9830	472	445	14300	0,073
FRA-12E	6,75	8,67	156000	44600	1650	5,94	68400	12900	801	264	23400	0,103
FRA-9E	6,47	2,14	182000	15300	1390	4,57	92900	11600	714	511	11900	0,182

Tabla 2 : Comparación de las aguas de aporte evaporadas (FRA-xxE) con las aguas de la laguna del Negro Francisco. ALC = alcalinidad en meq/l. Otros componentes en mg/l.

Las salmueras de la laguna salada provienen en mayor parte de la evaporación del río Astaburuaga (16 y 12), de la vertiente fluyente (10) al sur de la laguna salobre, y, en menor proporción, de la laguna salobre (FRA-9E). Se nota así que la alimentación de las dos lagunas se

hace sobre todo a partir de su cuenca de drenaje oriental. No se detecta la influencia de aportes por el lado occidental.

Calidad de agua

Las aguas de mejor calidad para el consumo humano y el riego se encuentran al oeste de la cuenca (FRA-3, 6 y 8). Varias otras aguas diluidas no cumplen con la norma potable debido a un exceso de arsénico. Por ejemplo, FRA-5 tiene una salinidad no muy elevada (868 mg/l) pero una concentración en arsénico de 1,5 mg/l, o sea 30 veces más que la norma de potabilidad, FRA-17 es un agua muy diluida (261 mg/l), pero con un contenido en arsénico 13 veces superior a esa norma. El río Astaburuaga cumple con las exigencias de potabilidad para todos los componentes, excepto el arsénico (6 veces encima de la norma). En resumen, las aguas diluidas del este de la cuenca son las más abundantes, pero su calidad no es buena, especialmente por el contenido de arsénico; mientras que las aguas del oeste no son importantes, pero de buena calidad.

Balance hídrico

El balance hídrico de 1986-1987 ha sido evaluado con muchos detalles por Behncke (1987). Presentamos aquí el balance correspondiente a mayo de 1995 suponiendo el sistema en equilibrio dinámico. En cada laguna tenemos dos muestras de distinta salinidad :

- laguna salobre : FRA-15 de 3454 mg/l
FRA-9 de 9467 mg/l
- laguna salada : FRA-7 de 44 753 mg/l
FRA-4 de 323 143 mg/l

No sabemos cual valor es más representativa de cada laguna. Behncke (1987) midió en varios puntos de la laguna salada concentraciones del orden de 330 000 mg/l. Para la laguna salobre, este autor dio una concentración de 5000 mg/l, no muy lejos del promedio de los dos valores nuestros (6460 mg/l). Esta incertidumbre no tiene mucha importancia para estimar los aportes a cada laguna, pero sí para determinar las pérdidas por infiltraciones o rebalse. Entregamos entonces rangos de valores.

Laguna salobre :

La altura de evaporación ha sido reducida en 10 % para tomar en cuenta la congelación de la laguna en los meses de invierno. Las pérdidas corresponden a infiltraciones por el fondo de la laguna y al rebalse en la laguna salada. Las formulas no permiten distinguir entre los dos. Sin embargo, hemos visto que la superficie de la laguna está controlada por el punto de salida, lo que indica que las pérdidas de la laguna salobre se hacen mayormente por rebalse. Se utiliza el cloruro como elemento conservativo. Los parámetros retenidos son :

- H_e = 0,9 m/año (1m menos 0,1m)
- H_p = 0,2 m/año
- S = 10,5 km²
- C_{ap} = 108 mg/l (FRA-16, río Astaburuaga)
- C_L = 714 - 3440 mg/l (FRA-15 y 9)

Volumen de aporte : $V_{ap} = S(H_e - H_p)/(1 - C_{ap}/C_L) = 7\,590\,000 - 8\,660\,000 \text{ m}^3/\text{año}$
 $= 241 - 275 \text{ l/s}$ (promedio = 258 l/s)

Volumen de perdidas : $V_{ex} = S(H_e - H_p)/(1 - C_L/C_{ap}) = 240\,000 - 1\,300\,000 \text{ m}^3/\text{año}$
 $= 8 - 42 \text{ l/s}$

Laguna salada :

Se utiliza el cloruro como elemento conservativo. La evaporación potencial debe ser reducida en un 30 % para tomar en cuenta la alta salinidad de la laguna. Hemos visto que esta laguna recibe aportes diluidos de napas alimentadas por el río Astaburuaga y también aportes salados por rebalse de la laguna salobre. Los parámetros considerados son :

- $H_e = 0,7 \text{ m/año}$ (1m menos 0,3m)
- $H_p = 0,2 \text{ m/año}$
- $S = 14,3 \text{ km}^2$
- $C_{ap} = 108 - 3440 \text{ mg/l}$ (FRA-16 y 9)
- $C_L = 171\,000 \text{ mg/l}$ (FRA-4)

Volumen de aporte : $V_{ap} = S(H_e - H_p)/(1 - C_{ap}/C_L) = 7\,150\,000 - 7\,300\,000 \text{ m}^3/\text{año}$
 $= 227 - 231 \text{ l/s}$ (promedio = 229 l/s)

Volumen de infiltraciones : $V_{ex} = S(H_e - H_p)/(1 - C_L/C_{ap}) = 4500 - 150\,000 \text{ m}^3/\text{año}$
 $= 0,15 - 5 \text{ l/s}$

El volumen de aporte corresponde a la suma de lo que entra por el canal de rebalse desde la laguna salobre más los aportes diluidos de la cuenca. En la figura 4, que resume el balance hídrico, notamos el volumen de aporte diluido en la laguna salada :

$$V_{dil} = V_{ap}(\text{Lag. salada}) - V_{ex} = 187 - 221 \text{ l/s}$$

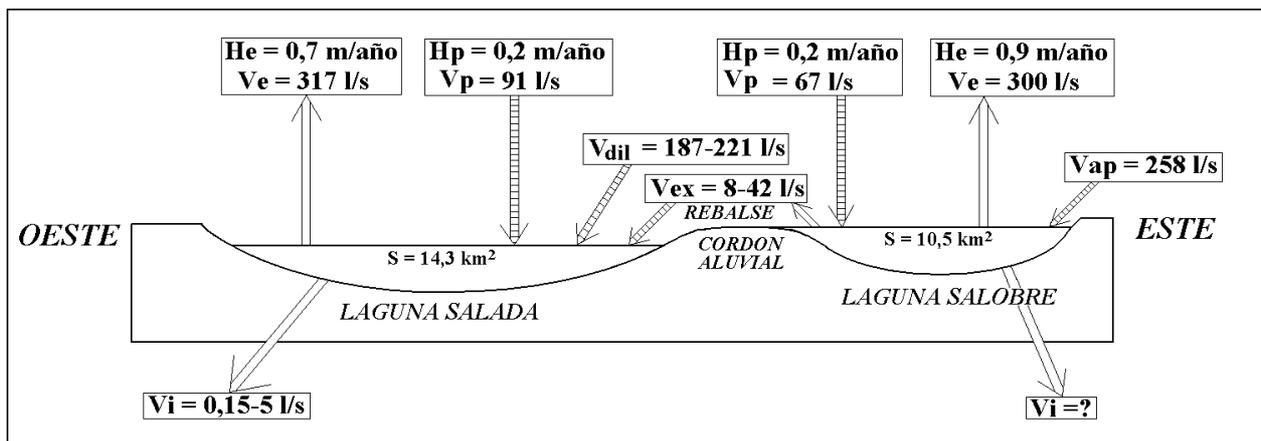


Fig.4 : Balance hídrico de las lagunas del Negro Francisco en mayo de 1995 y asumiendo el equilibrio dinámico.

El orden de magnitud del volumen total de aporte a las dos lagunas es entonces de unos 490 l/s. Behncke (1987) estimó los aportes en unos 300 l/s, pero las lagunas tenían una superficie menor: 16 km² en 1987 en vez de 24,8 km² en 1995. Las pérdidas de la laguna salobre corresponden

probablemente al rebalse, y no a infiltraciones que deben ser del mismo orden de magnitud que las de la laguna salada, es decir despreciables para el balance hídrico. El caudal máximo del rebalse ha sido calculado en 38 l/s. Behncke da caudales variando entre 20 y 100 l/s. Parece entonces que el rebalse es un aporte secundario para la laguna salada. Lo esencial de su alimentación proviene directamente de aguas diluidas, probablemente por descarga de napas por su larga orilla norte (FRA-12) o también, como lo sugiere Behncke, por el cordón que separa las dos lagunas.

La pregunta es porque el rebalse se hace desde la laguna oriental hacia la laguna occidental y no al revés. Es decir, porque no es salada la laguna oriental y salobre la occidental ? Eso se debe a la importancia relativa de los flujos de agua al este y al oeste de la cuenca. Ya hemos visto, en base a consideraciones exclusivamente hidroquímicas, que las soluciones de las dos lagunas provienen principalmente del sector oriental de la cuenca de drenaje, en particular del río Astaburuaga. El sector occidental contribuye menos a la recarga de las lagunas. La laguna salobre no es cerrada ya que tiene un exutorio que controla a la vez la superficie de la laguna y su salinidad.

Conclusiones

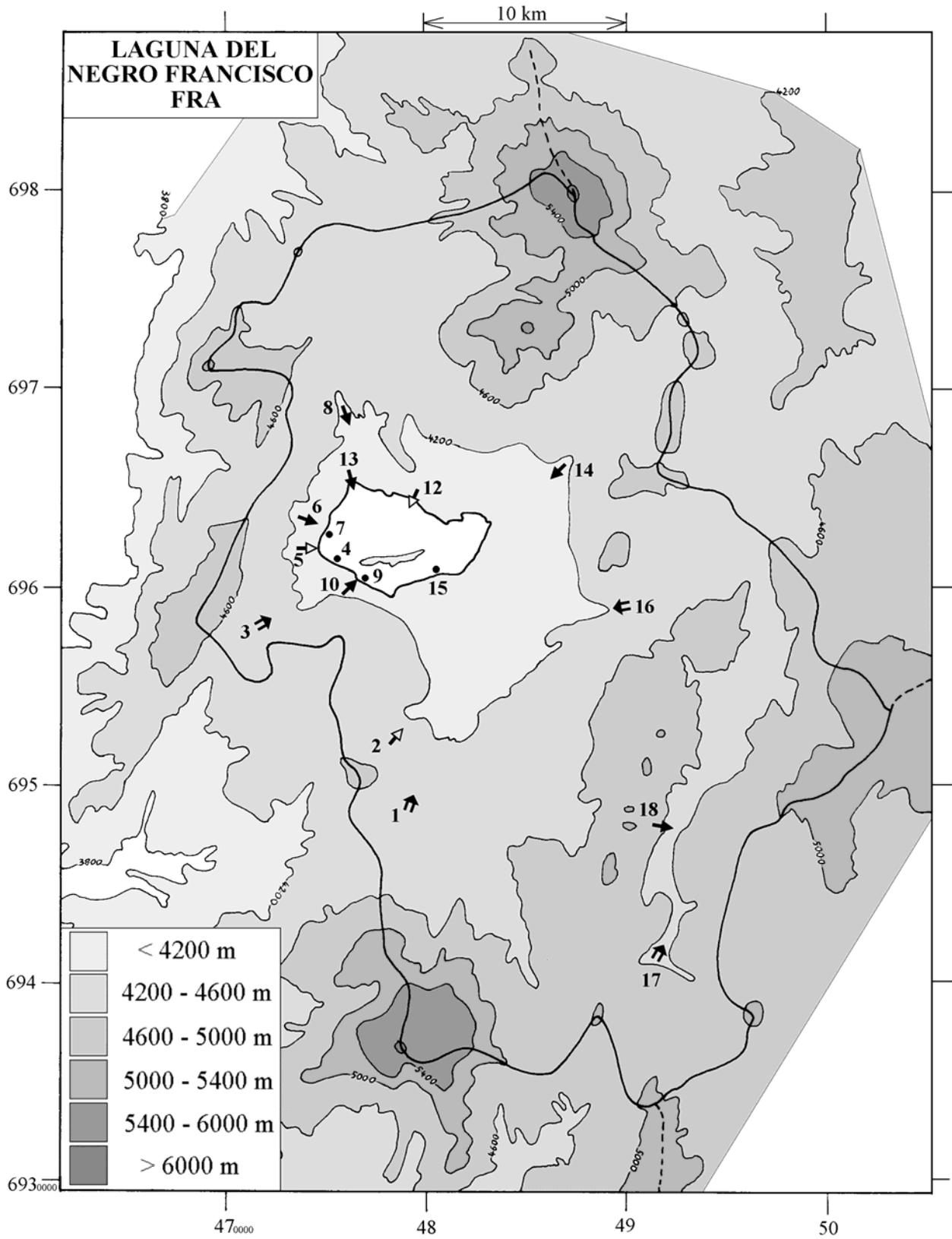
En 1995, la laguna del Negro Francisco estaba constituida por dos lagunas distintas separadas por un cordón de material aluvial y conectadas por un estrecho canal. Las lagunas reciben aguas diluidas de varias composiciones y vías evolutivas. Aunque predominan las aguas de vía evolutiva carbonatada, en las mezclas predominan las aguas sulfatadas, probablemente gracias a la contribución de aportes ácidos. Los componentes disueltos en las aguas de aporte provienen sobre todo de la alteración de las rocas de la cuenca. Las dos lagunas son de tipo Na / Cl-SO₄, precipitando sulfato de sodio en la laguna salada. El principal aporte proviene del sector oriental de la cuenca, en particular por el río Astaburuaga. El río alimenta napas que se descargan en la laguna. Las aguas de aporte del sector occidental presentan la mejor calidad para cualquier uso, pero no parecen ser muy abundantes. No se detecta su influencia en la composición química de la laguna salada donde se vierten. Las aguas diluidas del sector oriental son más abundantes pero no de tan buena calidad, sobre todo a causa del arsénico. La explotación de las aguas diluidas del sector occidental no afectaría notablemente la laguna salobre ; pero la extracción de aguas del río Astaburuaga, o de la napas alimentadas por este río, podría afectar seriamente el ecosistema de la laguna salobre, que se salinizaría.

El balance hídrico presentado es una fotografía de la situación a mayo de 1995 suponiendo el sistema en equilibrio dinámico. Las dos lagunas reciben un volumen de aporte similar : 258 l/s para la laguna salobre y 229 l/s para la laguna salada, pero la laguna salobre es abierta, con un caudal saliente de unos 20 a 30 l/s, lo que limita su salinidad a valores inferiores a 10 g/l. La laguna salada, siendo totalmente cerrada, solamente puede perder salmueras por infiltración con un flujo probablemente inferior a 1 l/s. Behncke (1987) supone infiltraciones rigurosamente nulas, lo que produciría un aumento del espesor de la costra de sal en el fondo del lago salado y elevaría así su nivel hasta llegar a la misma altura que la laguna salobre. Sin embargo, con una tasa de infiltración muy baja, entre 0,15 y 5 l/s, se llega al equilibrio dinámico, es decir, no se concentran las salmueras ni precipitan las sales más solubles, pues entra y se filtra la misma cantidad de componentes.

Referencias y estudios anteriores

Behncke, R. 1987. Informe preliminar sobre la factibilidad técnica ecológica de extraer aguas de la laguna del Negro Francisco, III Región. Dirección General de Aguas, Departamento de Estudios, Publicación interna, Santiago, 40p.

Niemeyer, H. 1968. Estudio de las cuencas cerradas de la cuenca de Copiapó. Ministerio de Obras Publicas y Transportes, Dirección de Riego, 110p.



**LAGUNA DEL NEGRO FRANCISCO
FRA**

NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
FRA-1	12/05/95	11 ^H 00	479279	6948651	4300	Río
FRA-2	12/05/95	11 ^H 50	478754	6952981	4250	Manantial difuso
FRA-3	12/05/95	13 ^H 00	471531	6958159	4350	Río La Gallina
FRA-4	12/05/95	14 ^H 30	475710	6961280	4110	Laguna salada
FRA-5	12/05/95	14 ^H 50	474778	6961855	4110	Manantial difuso
FRA-6	12/05/95	15 ^H 30	474628	6963169	4120	Manantial corriente
FRA-7	12/05/95	15 ^H 55	475241	6962792	4110	Laguna salada
FRA-8	12/05/95	16 ^H 45	475730	6969074	4190	Manantial corriente
FRA-9	13/05/95	10 ^H 15	476798	6960117	4110	Laguna salobre
FRA-10	13/05/95	10 ^H 35	476593	6960365	4110	Manantial corriente
FRA-12	13/05/95	12 ^H 05	479178	6964055	4110	Manantial difuso
FRA-13	13/05/95	12 ^H 40	476394	6964790	4110	Manantial corriente
FRA-14	13/05/95	13 ^H 40	486880	6965940	4190	Manantial corriente
FRA-15	13/05/95	15 ^H 40	480783	6960655	4110	Laguna salobre
FRA-16	13/05/95	16 ^H 20	489573	6958553	4250	Río Astaburuaga
FRA-17	14/05/95	13 ^H 30	491641	6941663	4550	Río Astaburuaga alto
FRA-18	14/05/95	15 ^H 00	491796	6946892	4500	Manantial termal corriente

LAGUNA DEL NEGRO FRANCISCO
FRA

NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
FRA-1	274,0	2,1	5,6	1,000	9,12	1,75	17,1	0,014	0,0133	22,8	nd	0,319	30,0	0,090	34,5	4,22	0,084	16,7	2,60
FRA-2	2230	8,6	3,8	1,001	4,09	-0,103	96,9	0,104	0,0207	1050	nd	1,90	21,8	0,009	138	13,9	0,545	285	33,0
FRA-3	132,0	4,1	5,1	1,000	7,14	1,21	0,817	0,002	0,0038	4,99	nd	0,090	11,2	0,0005	6,30	0,661	0,022	15,9	3,28
FRA-4	160000	5,5	0,8	1,219	7,50	88,5	171000	217	33,4	30700	0,676	2130	12,5	90	85300	11400	916	349	16000
FRA-5	760,0	1,7	nd	1,000	9,75	8,18	21,6	0,033	0,164	23,1	18,8	1,07	48,2	1,5	135	30,7	0,812	22,1	13,1
FRA-6	250,0	1,4	4,3	1,000	7,40	1,26	14,4	0,005	0,0039	19,1	nd	0,186	14,4	0,0015	15,6	2,82	0,077	19,3	3,77
FRA-7	60000	4,7	na	1,034	8,57	10,7	15200	13,6	1,70	12600	0,093	199	8,79	28	13700	794	59,7	281	775
FRA-8	448,0	1,6	7,4	1,000	7,88	1,41	22,4	0,008	0,0096	106	nd	1,04	12,1	0,018	41,2	3,80	0,324	39,3	5,61
FRA-9	13000	0	6,6	1,007	8,95	5,39	3440	2,95	0,633	2210	5,94	38,3	16,2	9,0	2580	225	13,8	281	231
FRA-10	782,0	3,6	4,9	1,000	7,50	2,47	121	0,161	0,123	73,9	4,96	1,56	19,8	0,12	75,4	10,0	0,520	44,9	19,7
FRA-12	2230	0,3	6,0	1,001	8,55	1,40	405	0,602	0,185	624	5,19	5,50	28,0	0,46	269	33,5	2,08	160	61,0
FRA-13	406,0	1,3	10	1,000	9,25	1,04	36,2	0,039	0,0154	71,0	0,539	1,04	12,7	0,11	69,5	5,04	0,522	4,81	2,62
FRA-14	1008	1,3	7,9	1,000	4,40	-0,032	12,0	0,024	0,0047	499	0,496	0,415	16,5	0,0016	40,0	5,94	0,107	145	18,0
FRA-15	6500	3,7	6,5	1,002	8,60	2,15	714	0,256	0,127	1470	nd	6,59	16,9	3,8	492	134	2,90	317	136
FRA-16	819,0	1	8,7	1,000	8,19	1,75	108	0,199	0,0838	126	0,942	2,13	12,0	0,28	89,2	6,76	0,325	55,3	9,84
FRA-17	337,0	0,2	9,2	1,000	9,21	1,63	11,4	0,011	0,0060	64,3	4,10	0,796	7,64	0,65	40,3	3,32	0,117	18,4	6,46
FRA-18	13000	17,7	nd	1,007	6,65	32,6	2950	7,05	7,50	1300	0,016	92,9	15,1	15	2830	86,4	10,7	154	53,2

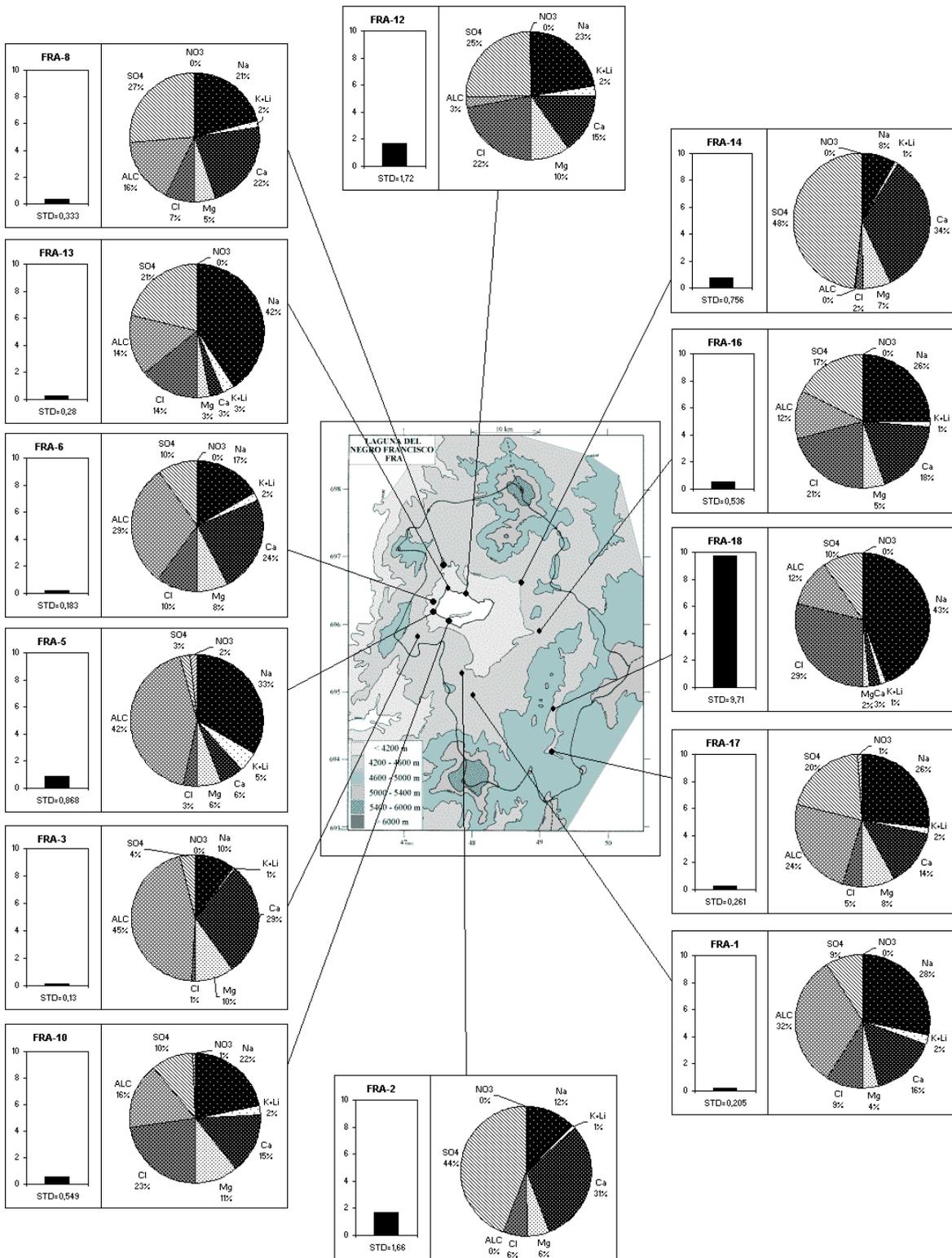
T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l.
CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

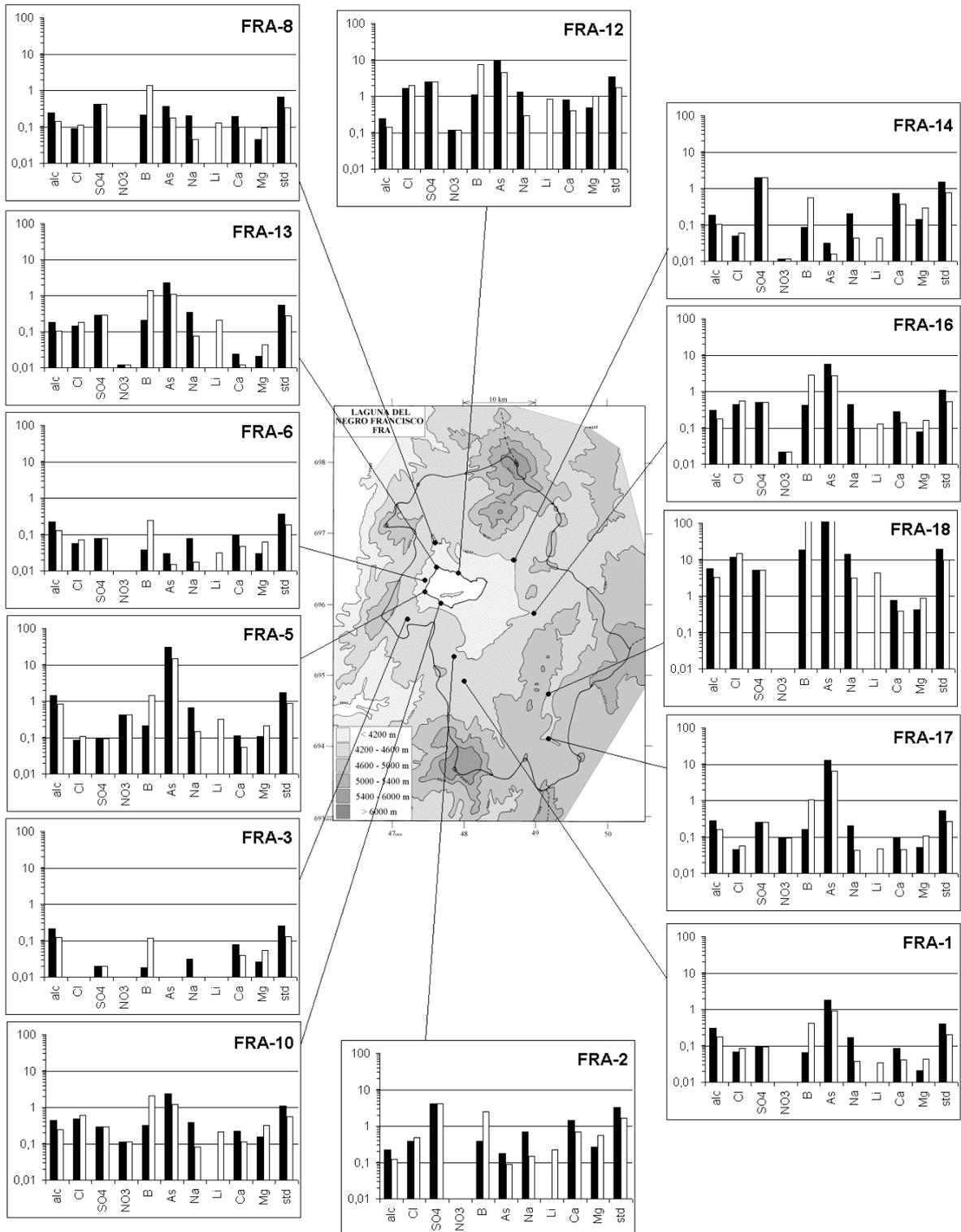
**LAGUNA DEL NEGRO FRANCISCO
FRA**

NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S (+)	S (-)	DIF. %
FRA-1	205,3	95,8	4,92	0,17	2,668	2,709	1,5
FRA-2	1660	-	-	-	23,33	24,43	4,6
FRA-3	129,8	73,8	0,06	12	1,358	1,337	1,6
FRA-4	323143	-	-	-	5470	5539	1,2
FRA-5	868,0	315	77,4	0,13	8,931	9,575	7,0
FRA-6	183,3	76,9	0,06	7,5	2,036	2,063	1,3
FRA-7	44753	321	27,4	1,1	702,7	701,7	0,1
FRA-8	333,1	84,8	0,30	2,6	4,356	4,240	2,7
FRA-9	9467	207	24,6	0,44	152,7	148,5	2,8
FRA-10	548,7	150	0,30	10	7,471	7,501	0,4
FRA-12	1722	75,0	2,58	0,48	25,86	25,89	0,1
FRA-13	279,8	52,7	3,06	0,07	3,680	3,549	3,6
FRA-14	755,7	-	-	-	10,63	10,72	0,8
FRA-15	3454	110	6,54	0,53	52,24	52,85	1,2
FRA-16	535,5	104	0,96	1,6	7,670	7,436	3,1
FRA-17	260,8	85,4	5,46	0,13	3,302	3,358	1,7
FRA-18	9706	1980	1,38	570	138,8	142,8	2,8

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

FRA

- Qal** : *Cuaternario*. Sedimentos fluviales, eólicos y lacustres.
- Tga** : *Terciario*. Gravas de Atacama. Gravas, areniscas, lentes de ignimbritas.
- Tvg** : *Mioceno*. Volcán La Laguna. Dacitas - andesitas.
- Tvc** : *Mioceno*. Volcán Copiapó. Dacitas - andesitas.
- Tvvs** : *Mioceno*. Caldera de Sierra Villalobo y Sierra de la Sal. Dacitas - andesitas.
- Tva** : *Mioceno*. Volcán Sierra del Azufre. Dacitas - andesitas.
- Tvh** : *Mioceno*. Volcán Dos Hermanas. Dacitas - andesitas.
- Kqm** : *Cretácico*. Fm. Quebrada Monardes. Areniscas y conglomerados.
- Mch** : *Mesozoico*. Estratos de Chirigües. Areniscas, tobas, ignimbritas, lavas andesíticas.
- Jl** : *Jurásico*. Fm. Lautaro. Calizas, margas, areniscas, conglomerados.
- Trlt** : *Triásico*. Fm. La Ternera. Lavas andesíticas, brechas, tobas.
- PzTrp** : *Pérmico - Triásico*. Fm. Pantanoso. Riolitas, ignimbritas, areniscas, conglomerados.
- Pzh** : *Carbonífero - Triásico inf.* Batolito El Hielo. Monzogranito, granodiorita, tonalita.
- Pzch** : *Devónico - Carbonífero (?)*. Fm. Chinchas. Areniscas, lutitas, calizas.

