



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 II 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).

APORTES	SALINIDAD mg/l	PH	TIPO QUÍMICO		VIA EVOLUTIVA
			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
LAGUNAS					
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.

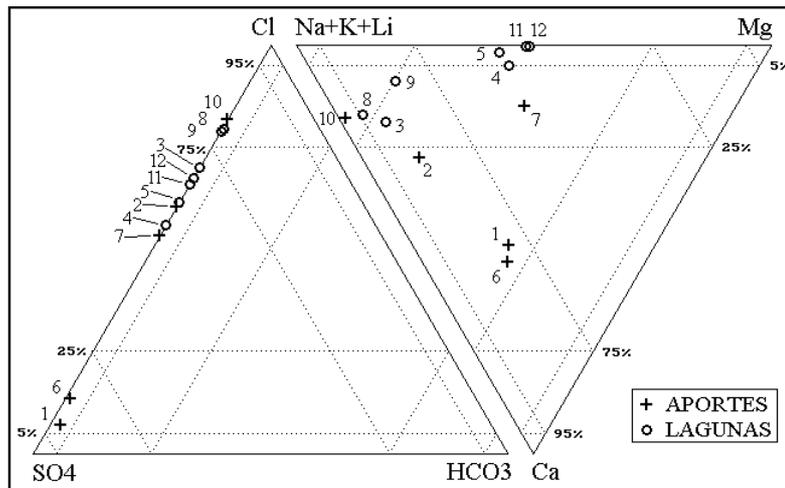


Fig.1: Composición de aguas y salmueras del salar de Gorbea.

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:

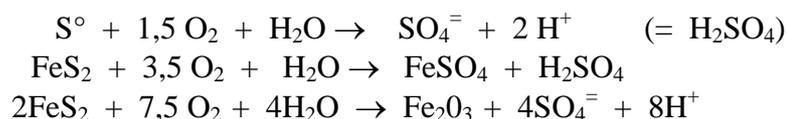
- en el centro y al sur del salar (7, 4, 5, 11, 12), las aguas contienen mucho magnesio y sulfato
- en el extremo norte (2, 3, 8, 9, 10), las aguas contienen menos Mg y SO₄ y más Na y Cl.

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 azufrera 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.

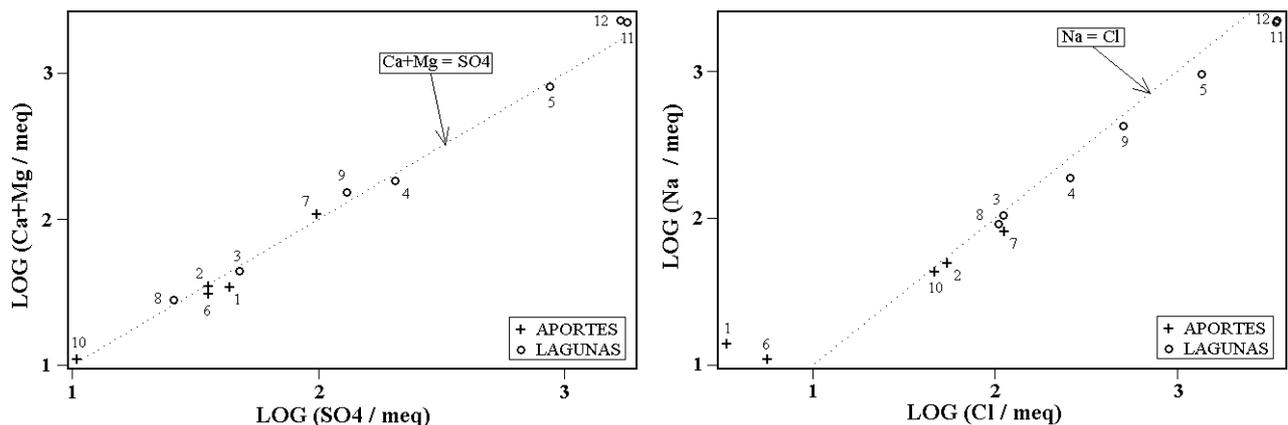


Fig.2 : Relaciones Ca+Mg versus SO_4 y Na versus Cl en aguas del salar de Gorbea.

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).

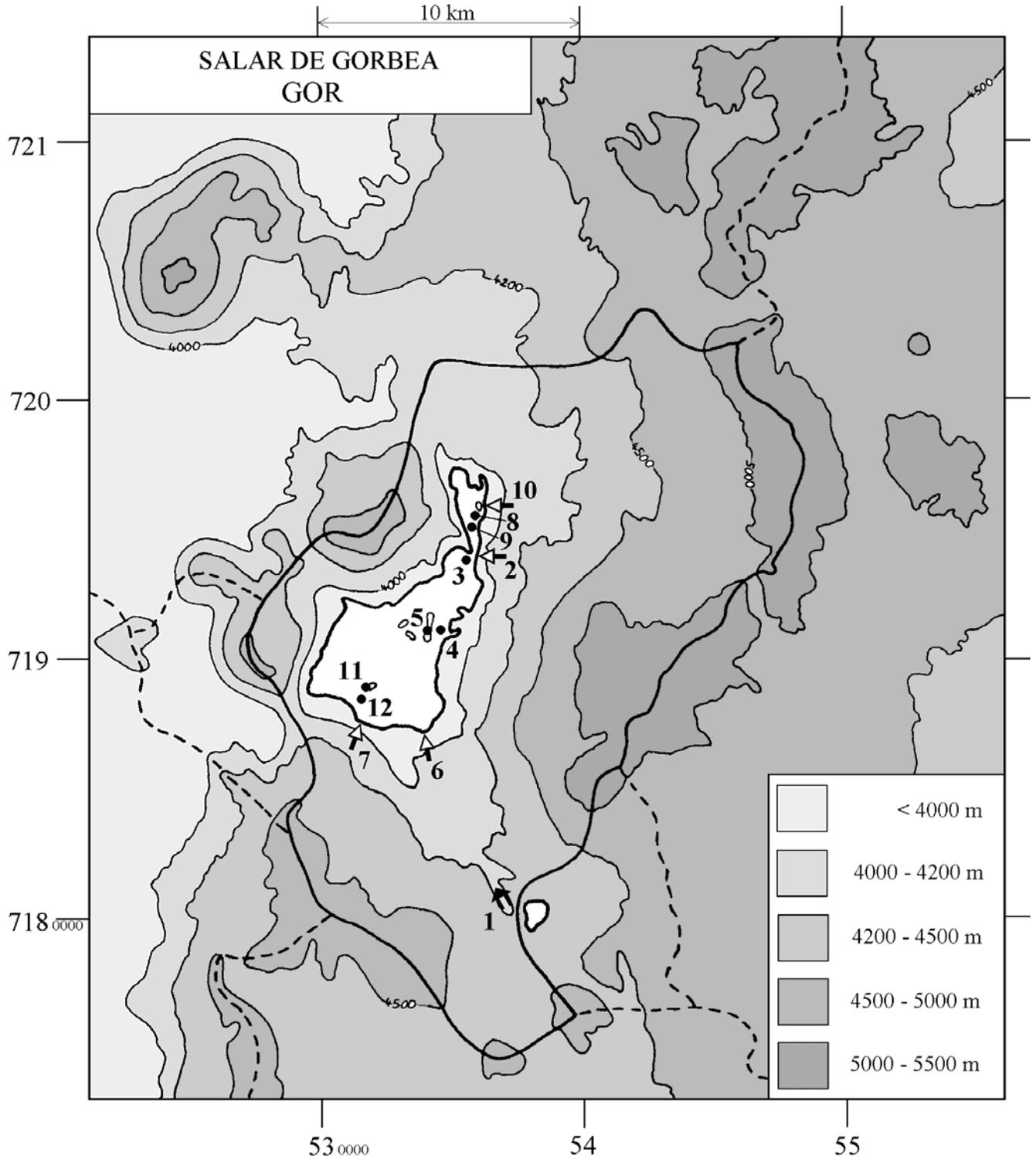
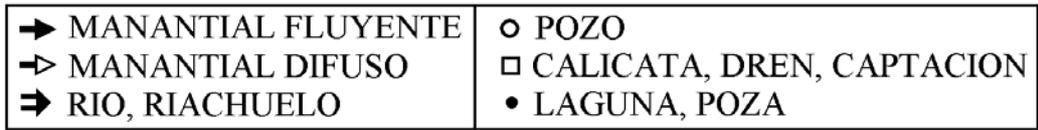
Conclusiones

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**

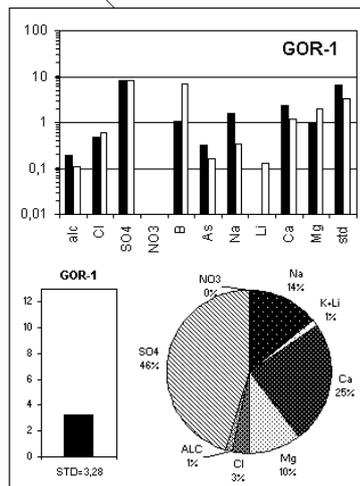
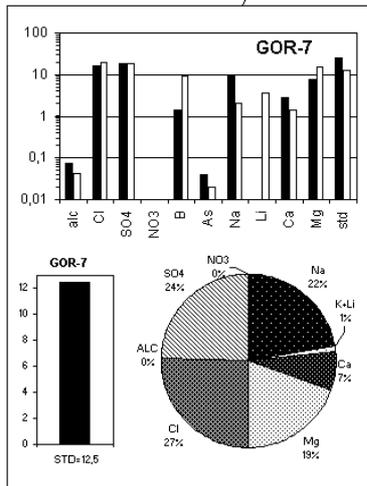
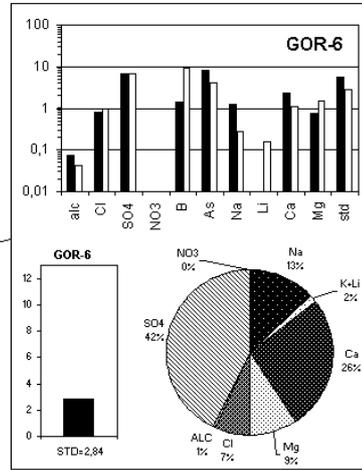
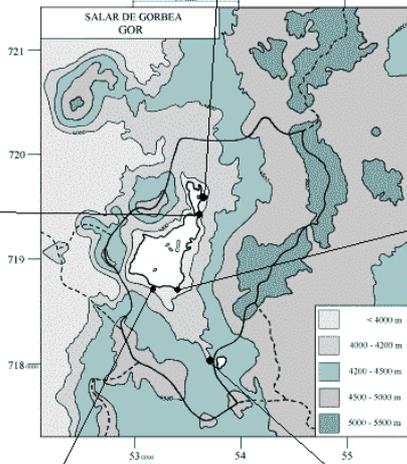
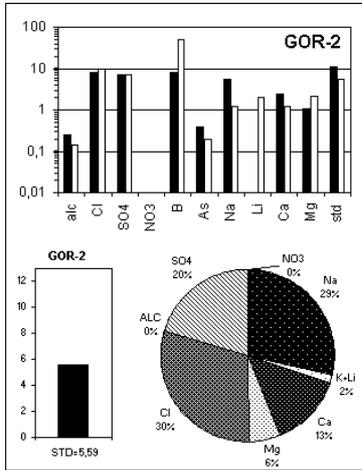
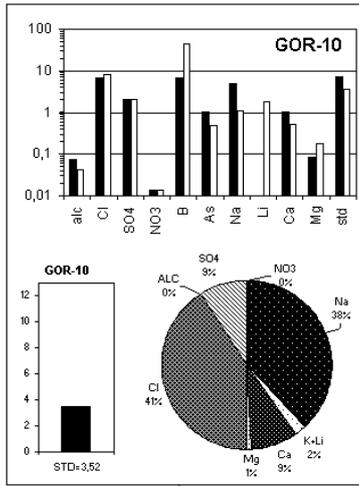
NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
GOR-1	3360	17,3	5,4	1,002	7,19	1,09	119	0,058	0,0072	2090	nd	5,34	29,7	0,017	317	43,0	0,319	481	120
GOR-2	7810	10	4,0	1,005	3,64	-0,370	1930	3,24	0,339	1720	nd	38,9	58,2	0,020	1120	95,8	5,01	477	130
GOR-3	14000	8,8	5,9	1,008	4,17	-0,130	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	$\delta^{18}O$	δ^2H
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	Análisis de oxígeno-18 y deuterio		
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

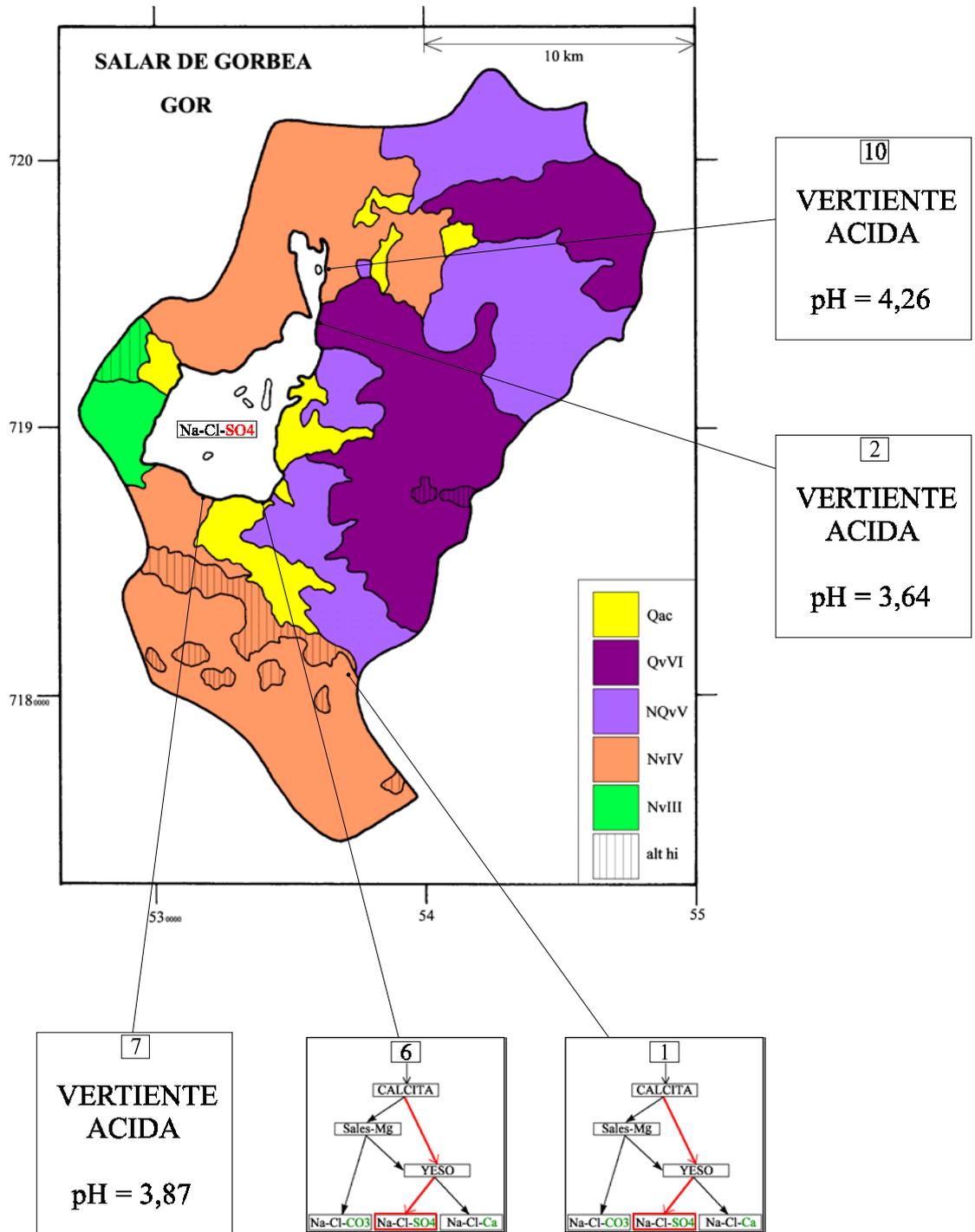
Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.
S(+) = suma cationes; S(-) = suma aniones (meq/l);
DIF.% = diferencia en %



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.

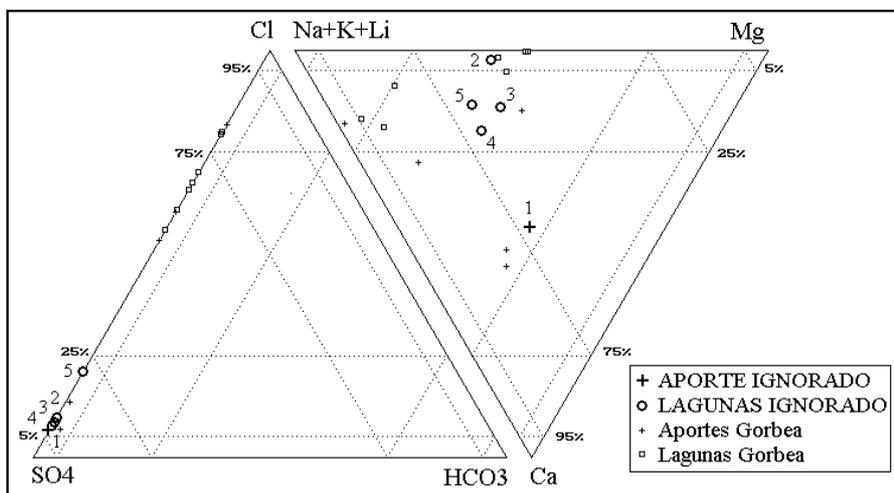


Fig.1: Composición de aguas y salmueras del salar Ignorado.

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.

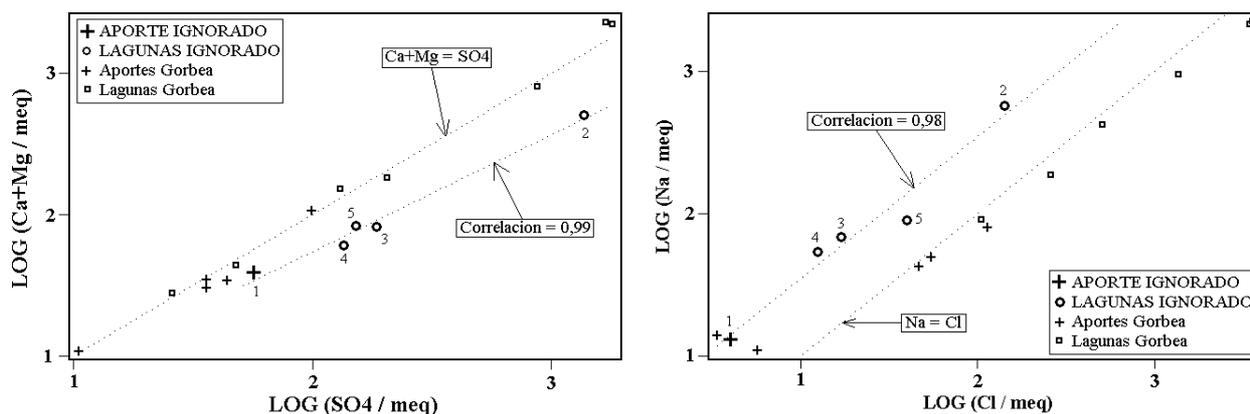


Fig.2 : Relaciones Ca+Mg versus SO₄ y Na versus Cl en aguas de Gorbea e Ignorado.

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

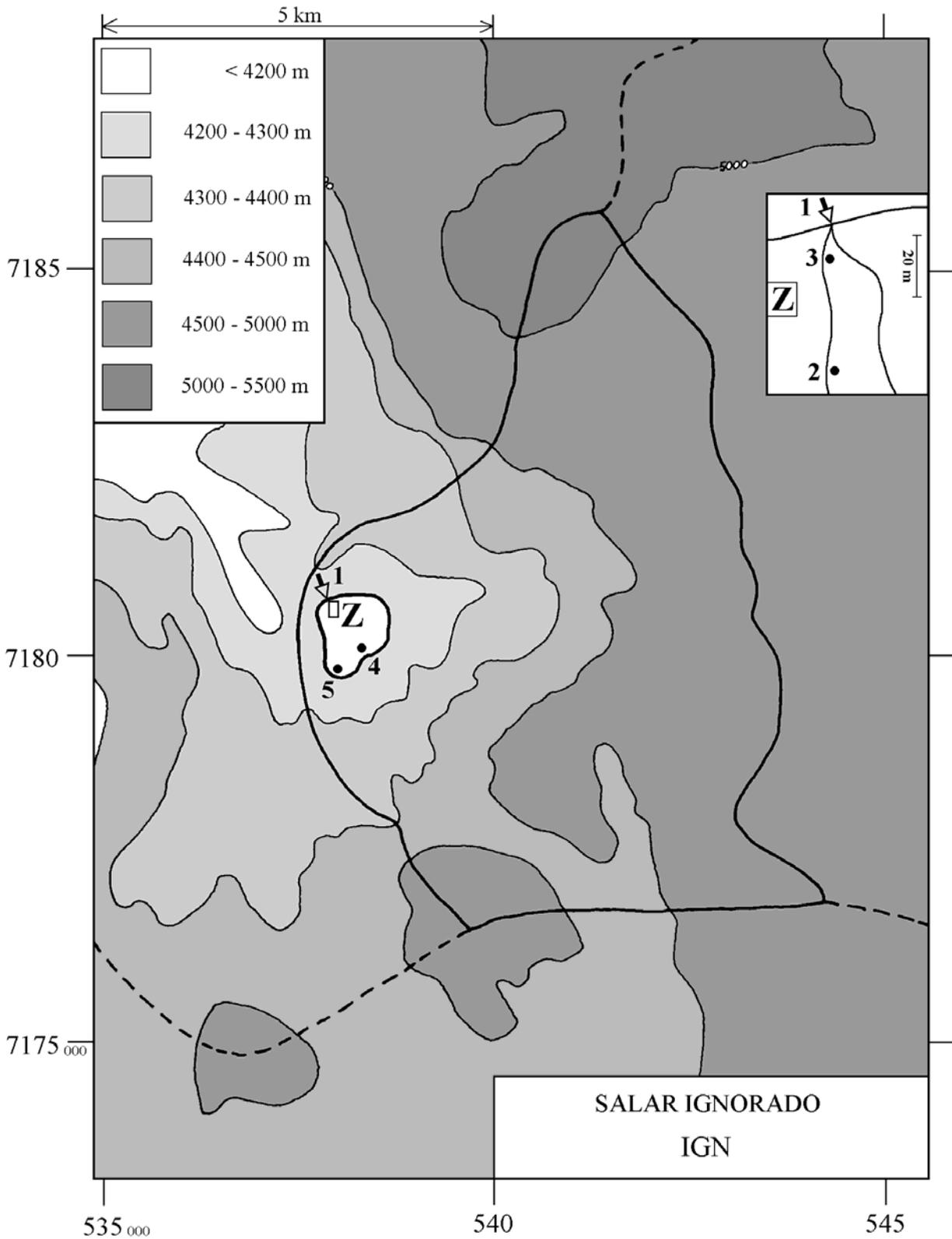
El salar Ignorado es un salar excepcional en el ámbito de los Andes Centrales. Todas sus aguas son ácidas. Solamente el vecino salar de Gorbea presenta la misma característica. Los pH bajan hasta 2,65. La acidez proviene probablemente de la oxidación del azufre o de mineralizaciones sulfuradas. Generalmente, 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)

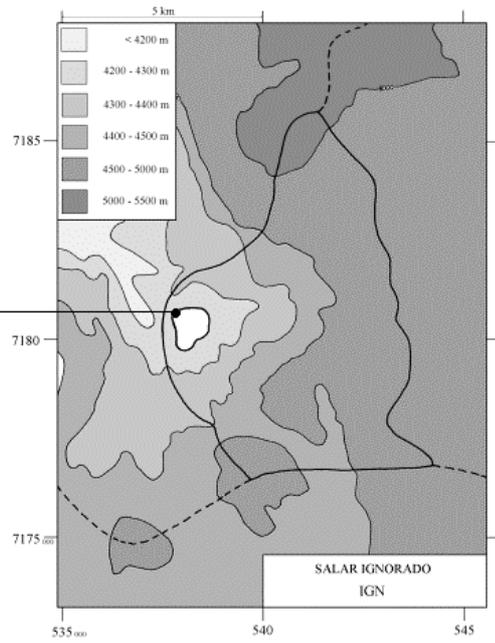
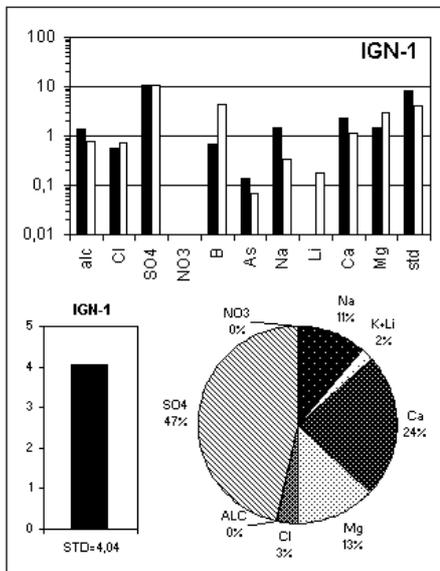
NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
IGN-1	3950	8,8	8,5	1,004	3,88	-0,11	142	0,088	0,0124	2750	nd	3,38	43,4	0,007	301	84,1	0,458	469	182
IGN-2	55400	9	3,7	1,086	2,65	-5,32	5010	na	0,213	65600	0,341	193	115	0,273	13100	4030	14,7	529	5760
IGN-3	11570	11,5	5,5	1,012	3,28	-1,15	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

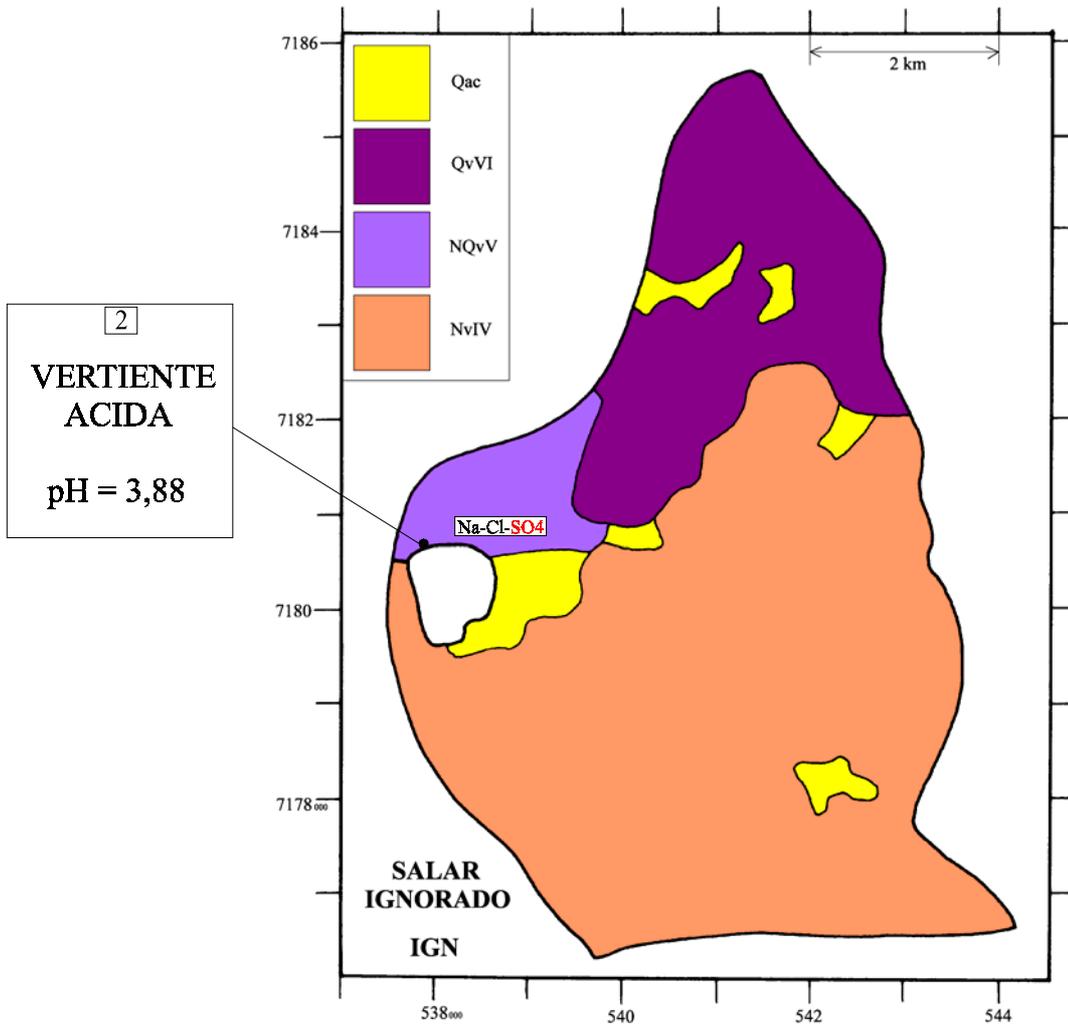
Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.
S(+) = suma cationes; S(-) = suma aniones (meq/l)
DIF.% = diferencia en %



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 morfométricas 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.

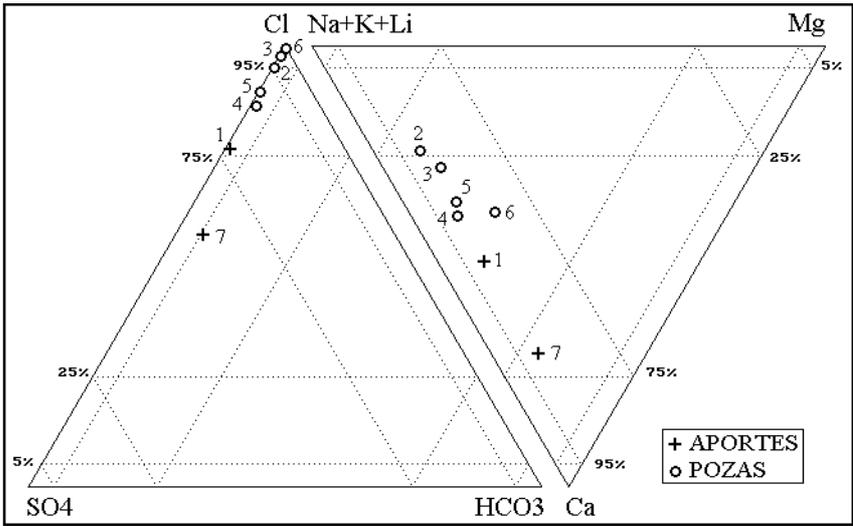
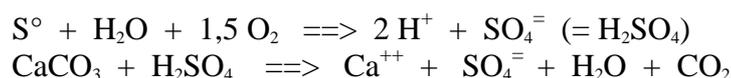


Fig.1: Composición de aguas y salmueras del salar de la Azufrera.

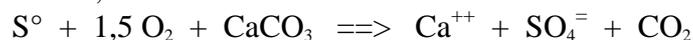
Origen de los componentes disueltos

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

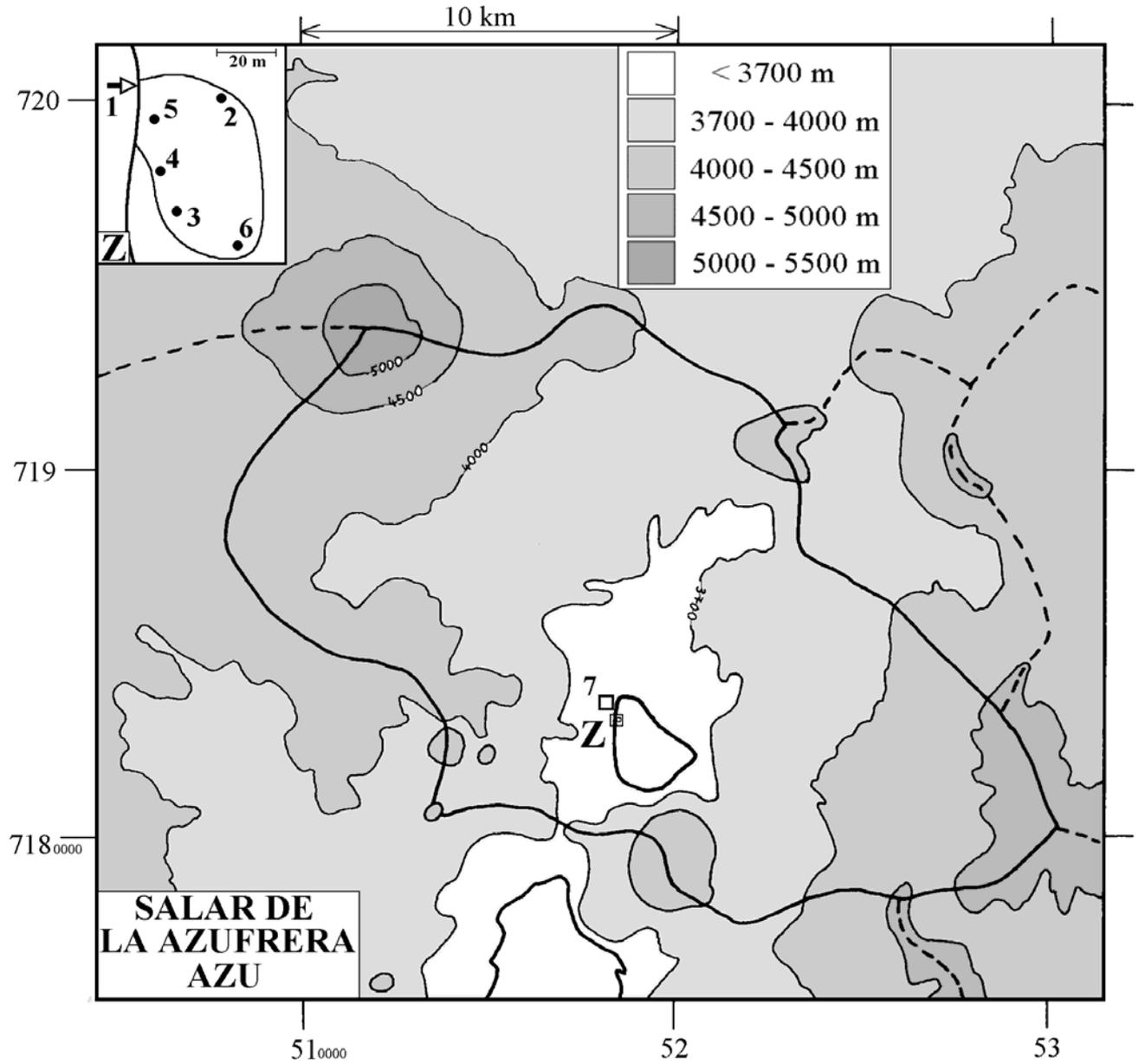
El salar de la Azufrera recibe muy poca agua superficial en su orilla oeste. Se forman pequeñas lagunas de 100 a 200 m de diámetro. Las aguas de aporte son las más cálcicas de todas las aguas estudiadas en los 52 salares de la Cordillera Andina chilena. Esta composición y la vía evolutiva cálcica de 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**

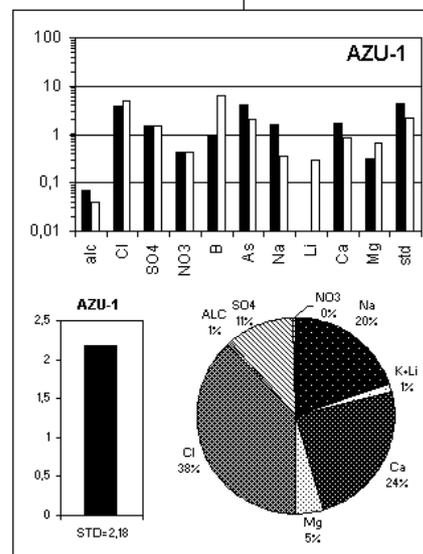
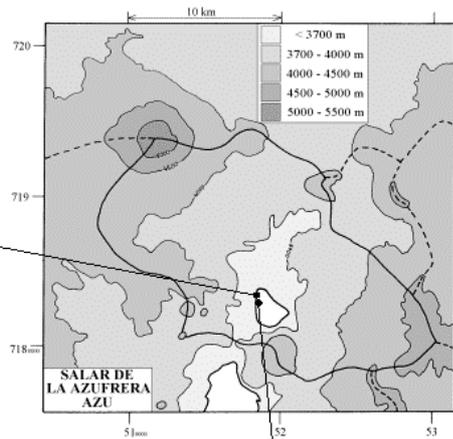
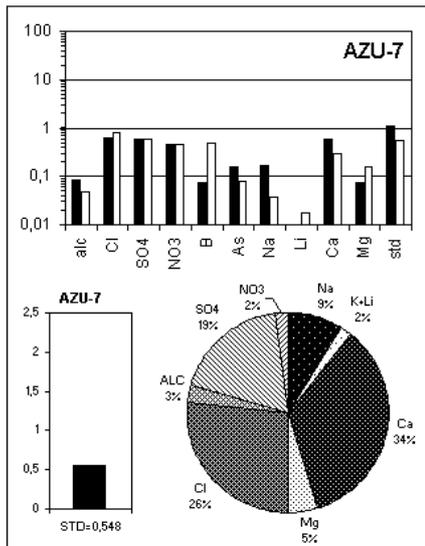
NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
AZU-1	14/03/96	11 ^H 14	518298	7183303	3580	Manantial difuso
AZU-2	14/03/96	11 ^H 30	518318	7183296	3580	Lagunita superficial
AZU-3	14/03/96	11 ^H 45	518308	7183259	3580	Lagunita superficial
AZU-4	14/03/96	11 ^H 50	518304	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			

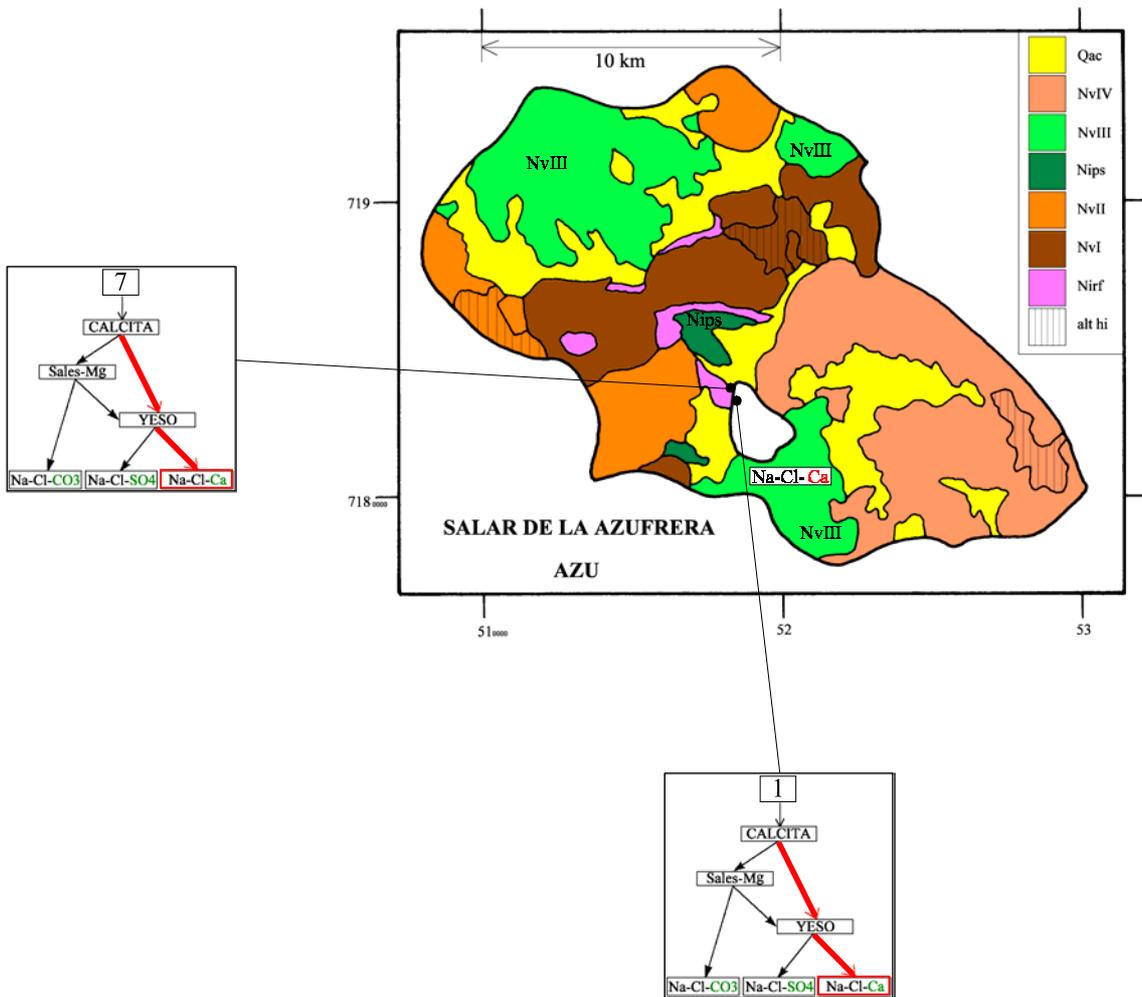
Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.
 S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l)
 DIF.% = diferencia en %



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-volvanes 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 mega-grupo 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.

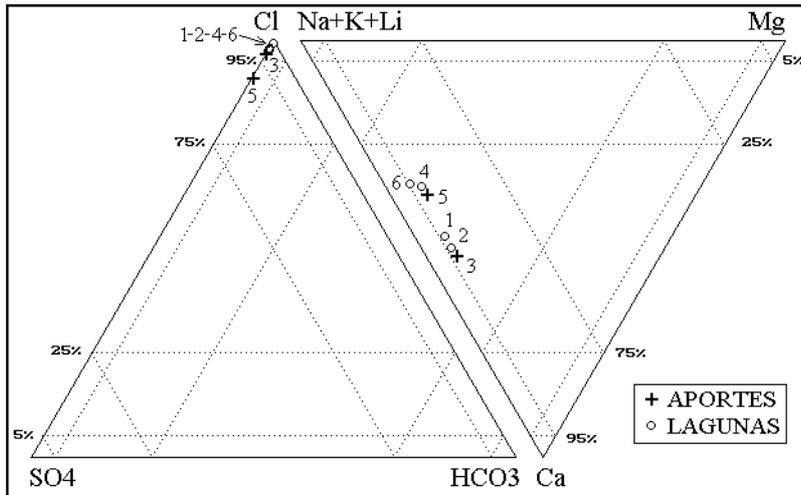


Fig.1: Composición de aguas y salmueras del salar de Agua Amarga.

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.

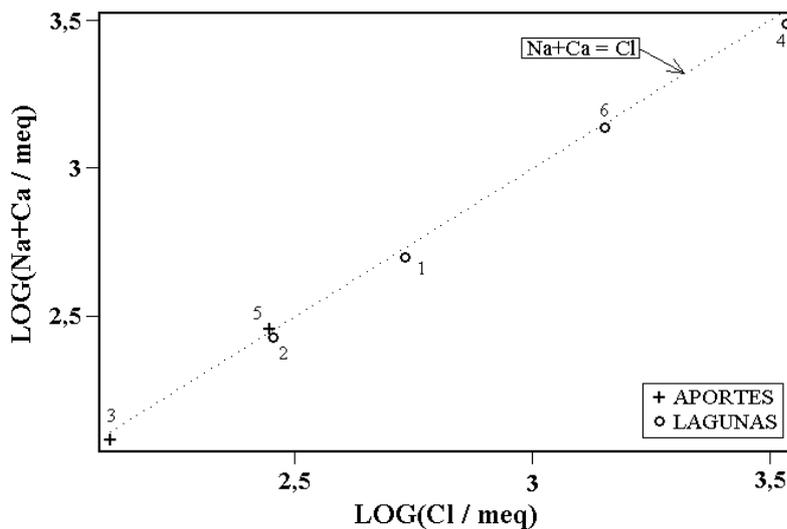


Fig.2 : Relación entre Na+Ca y Cl en aguas del salar de Agua Amarga

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.

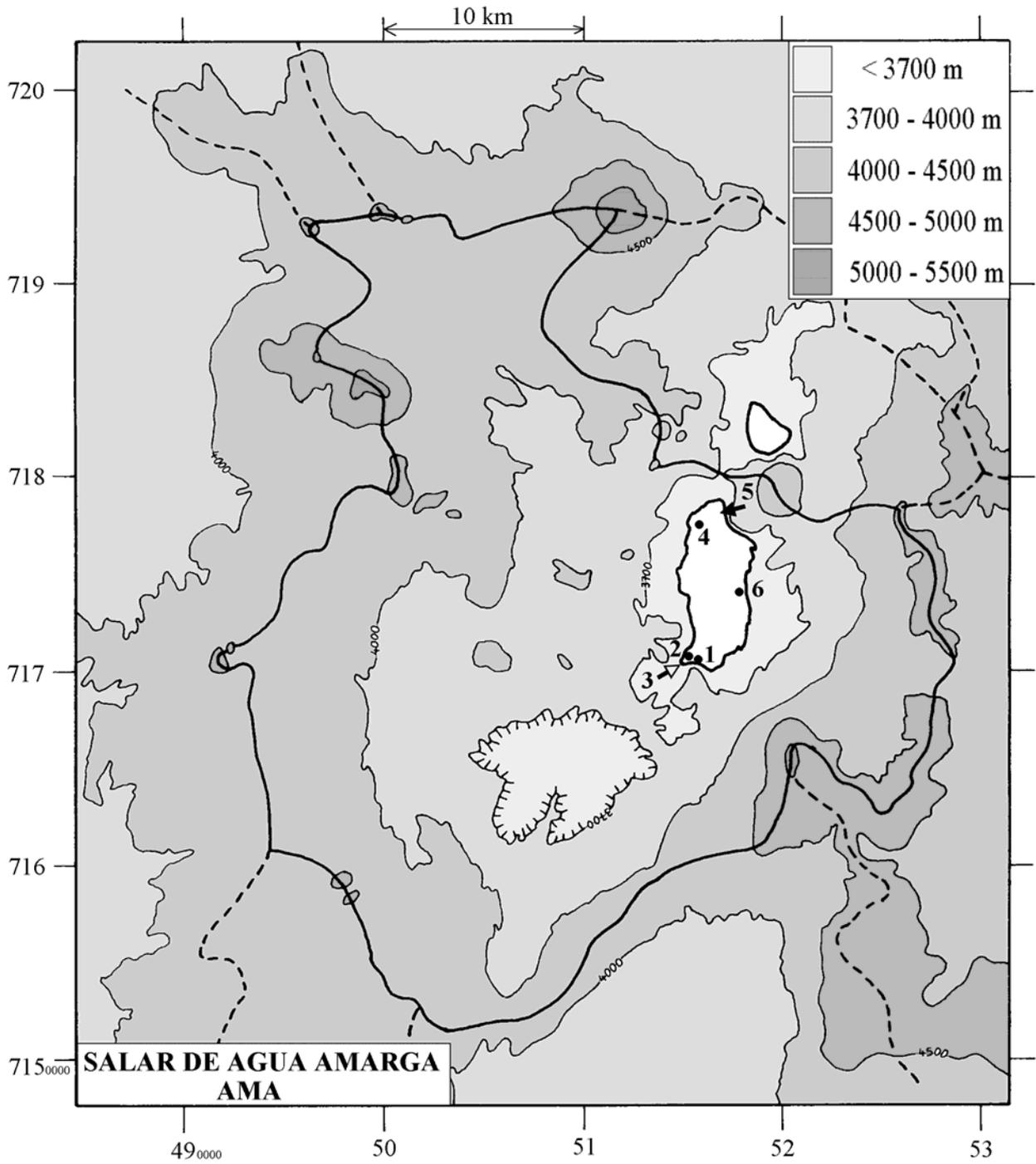
Calidad de aguas

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**

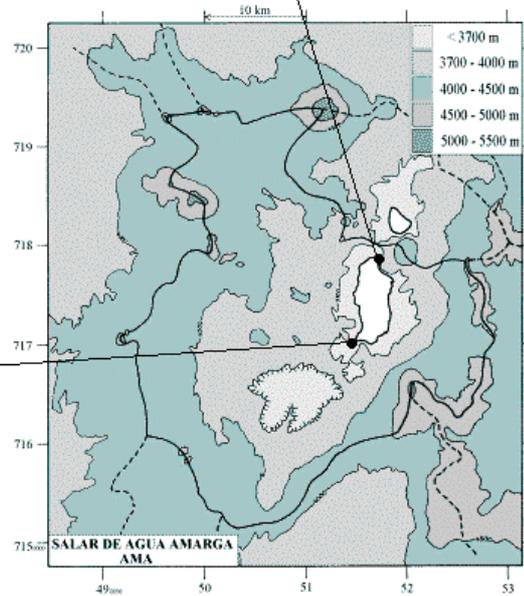
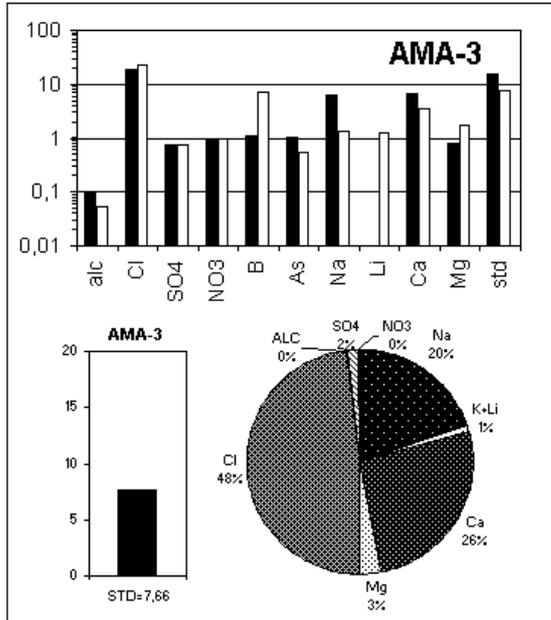
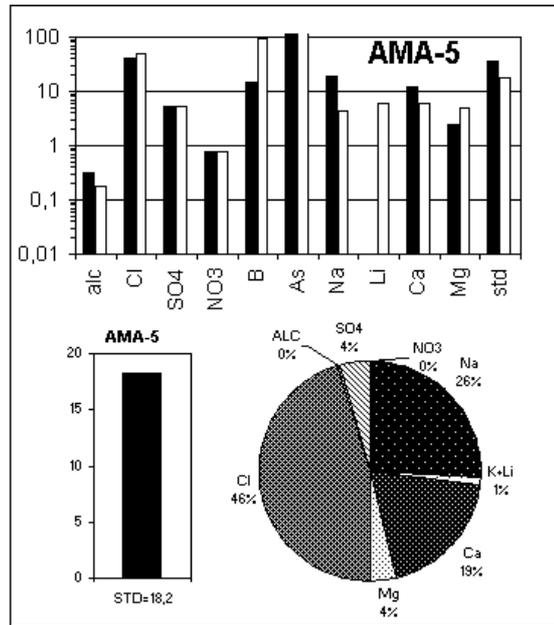
NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
AMA-1	19/03/96	14 ^H 30	515457	7170559	3557	Laguna
AMA-2	19/03/96	15 ^H 30	514980	7170364	3557	Laguna
AMA-3	19/03/96	15 ^H 45	514966	7170330	3558	Manantial difuso
AMA-4	24/03/96	16 ^H 00	515802	7178004	3557	Napa del salar (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			

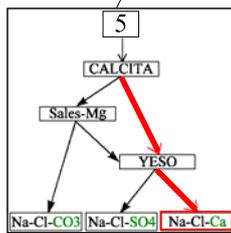
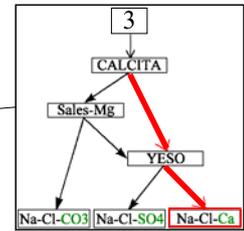
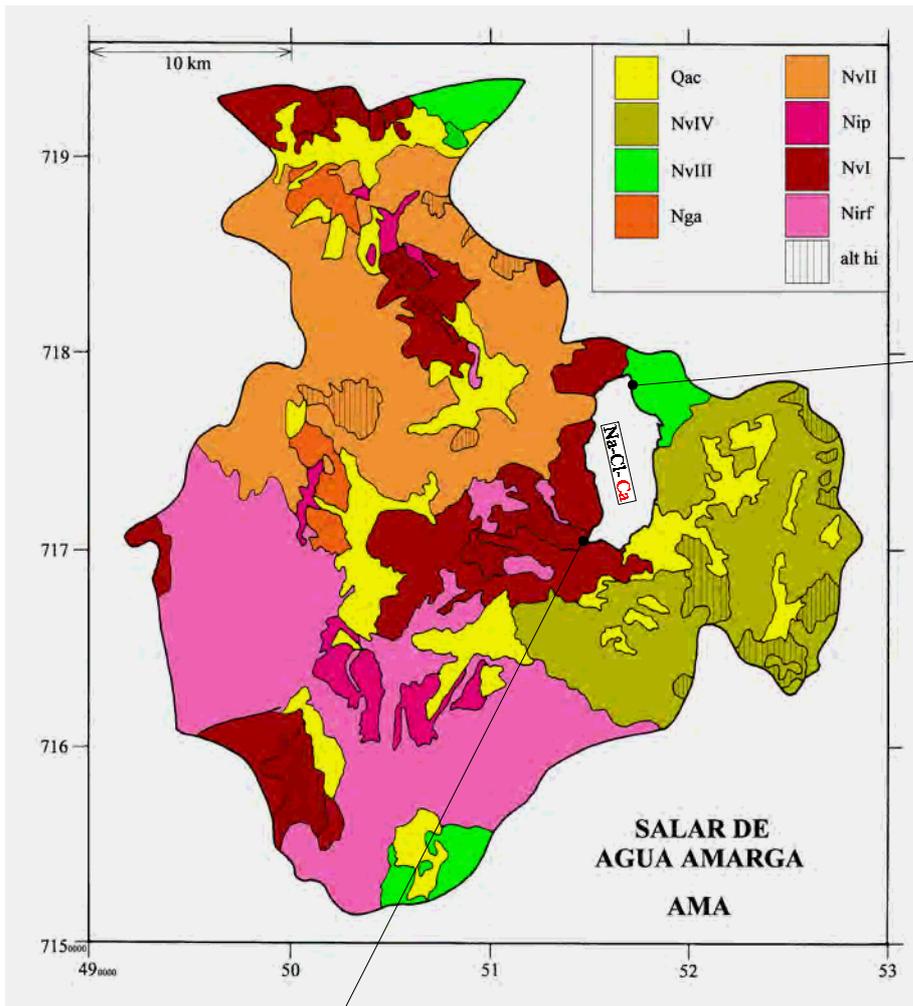
Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.
S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l)
DIF.% = diferencia en %



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 morfológicas 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).

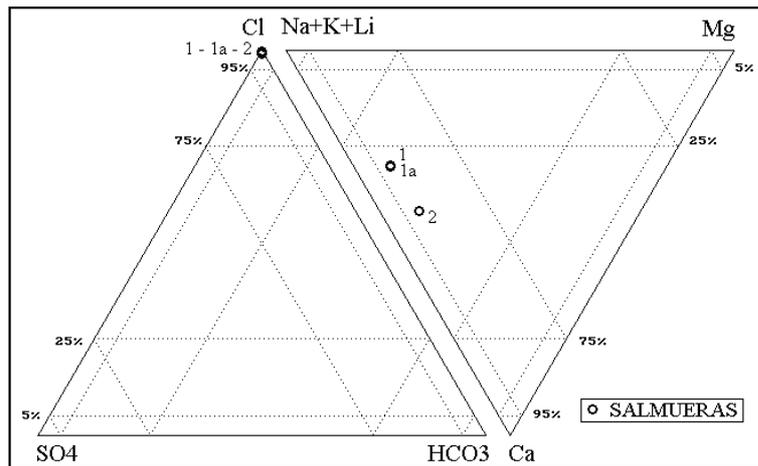


Fig.1: Composición de las salmueras del salar de Aguilar

Balance hídrico

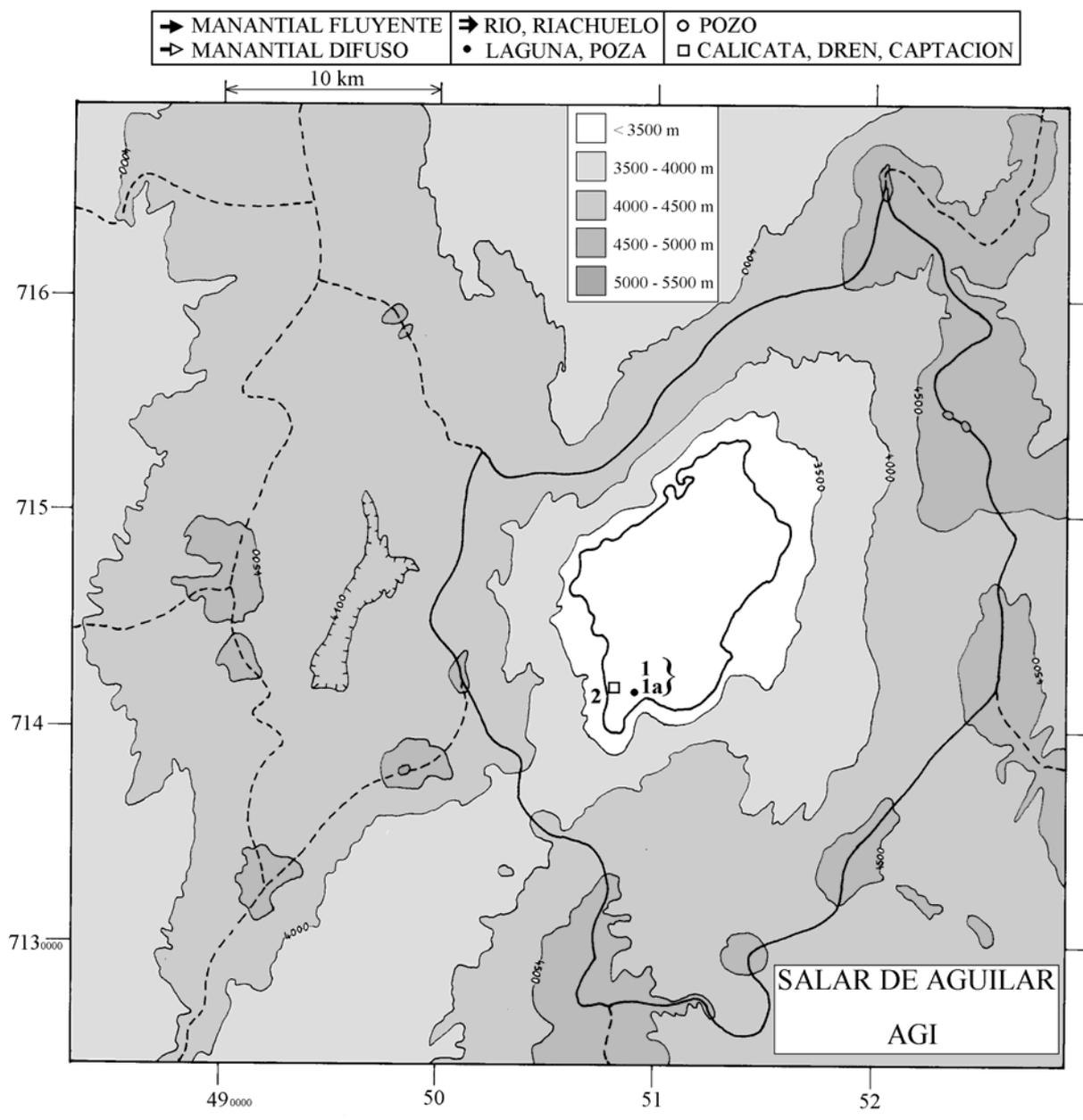
La superficie total de las pozas es del orden de unos 200 m². Eso corresponde a un volumen de aporte del orden de:

$$V_{ap} = S(H_e - H_p) = 160 \text{ m}^3/\text{año} = 5 \text{ ml/s}$$

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 cálculo 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 correcta 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

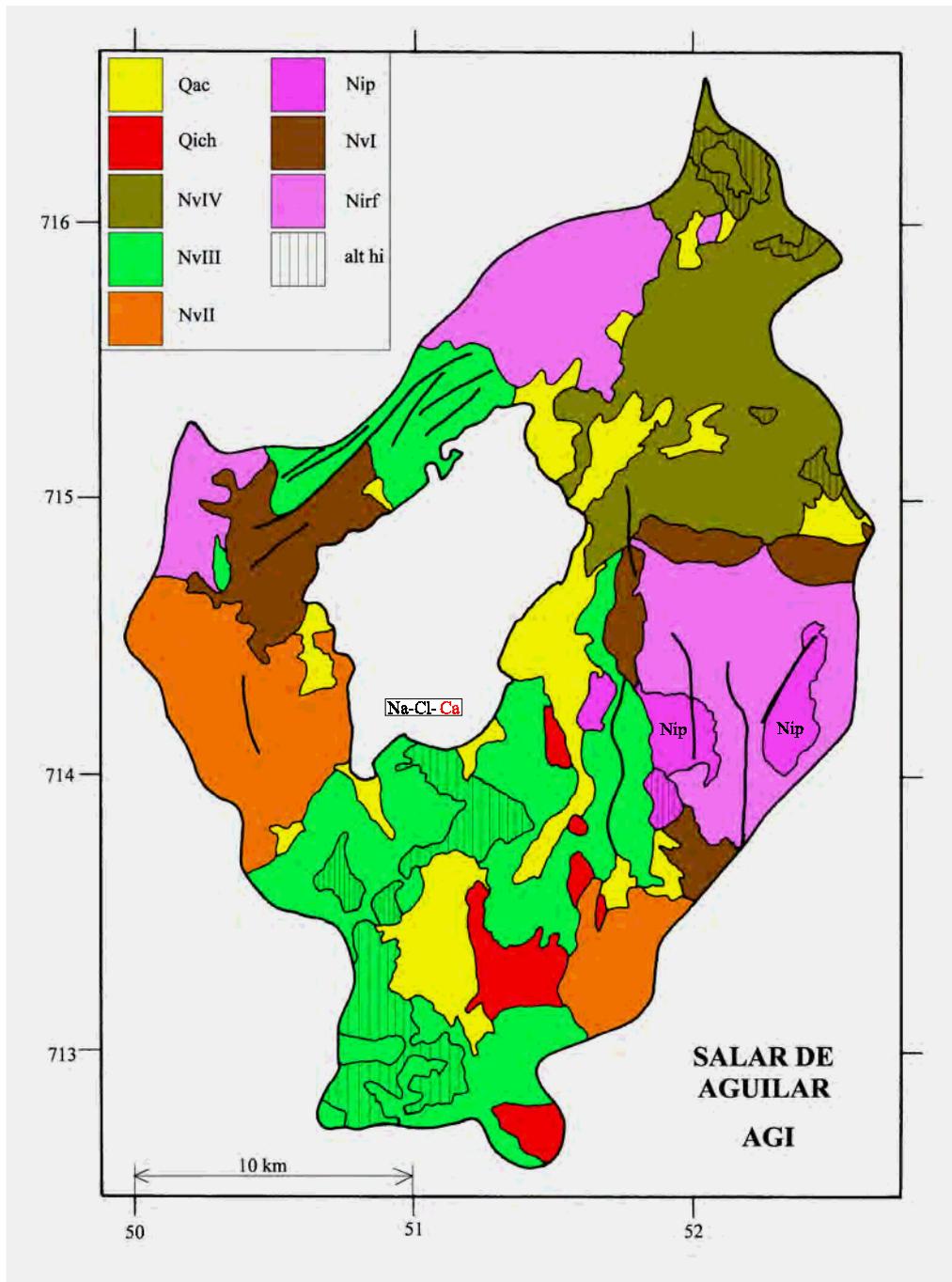
Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.

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 Frío. 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-(SO4)	SO4
ISL-12	312003	Na- (Mg)	/ Cl	SO4
ISL-17	313963	Na- (Mg)	/ Cl-(SO4)	SO4
ISL-2	329693	Na- (Mg)	/ Cl-(SO4)	SO4

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.

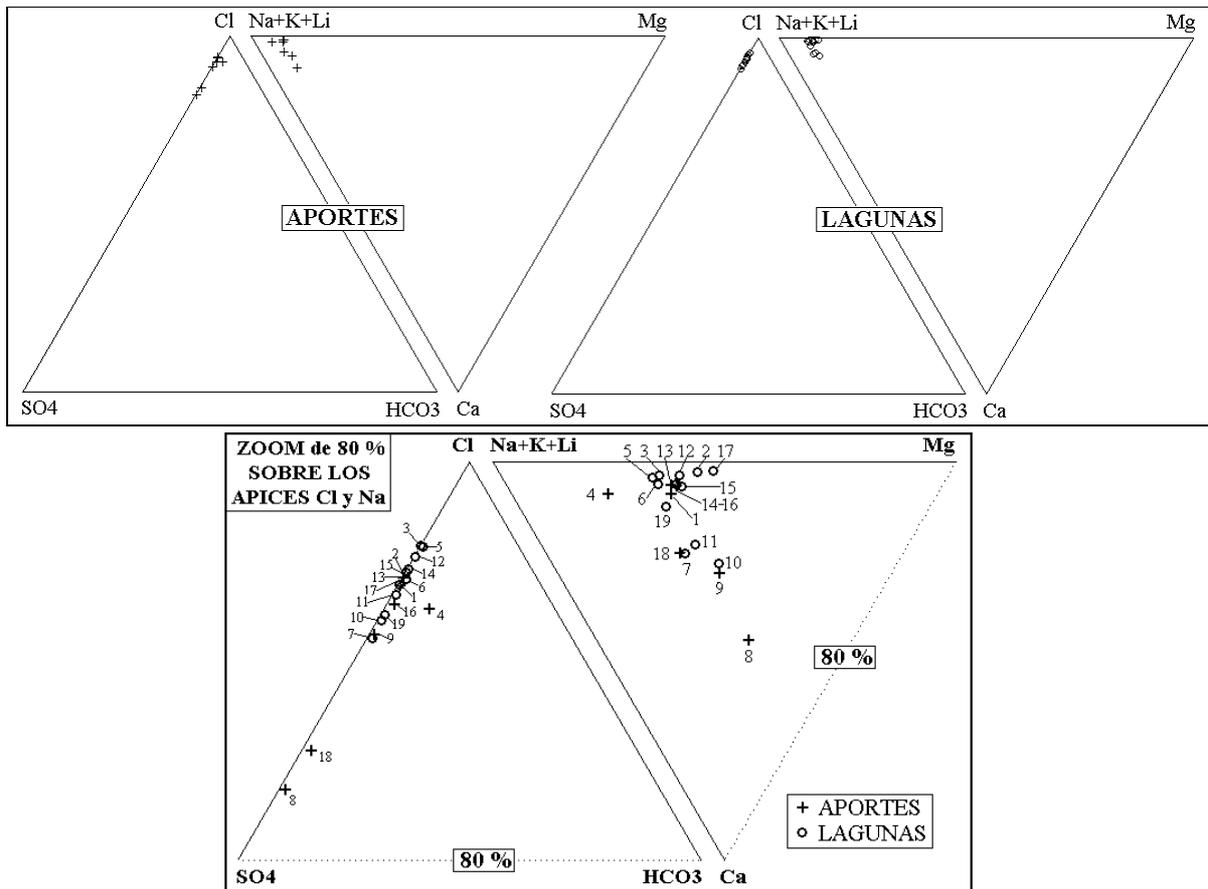


Fig.1: Composición de las aguas y salmueras del salar de la Isla.

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.

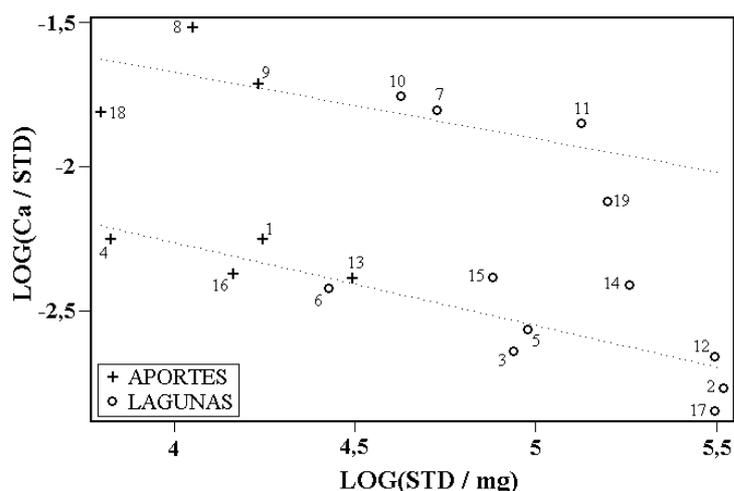


Fig.2 : Relación entre Ca y salinidad en aguas del salar de la Isla.

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.

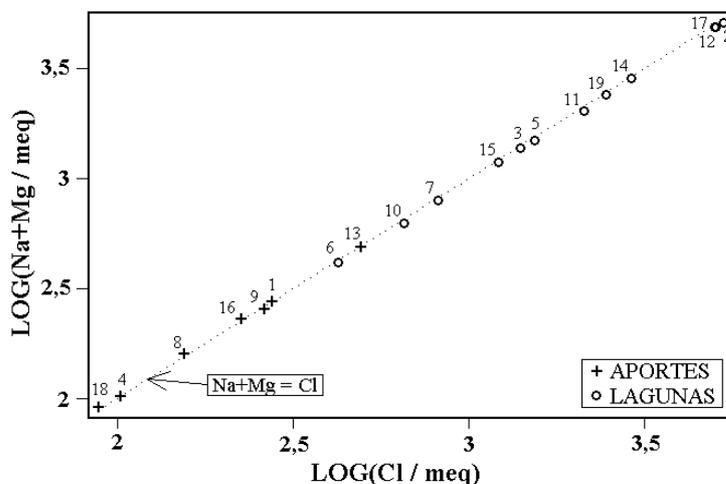


Fig. 3 : Relación entre Na+Mg y Cl en aguas del salar de la Isla.

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.

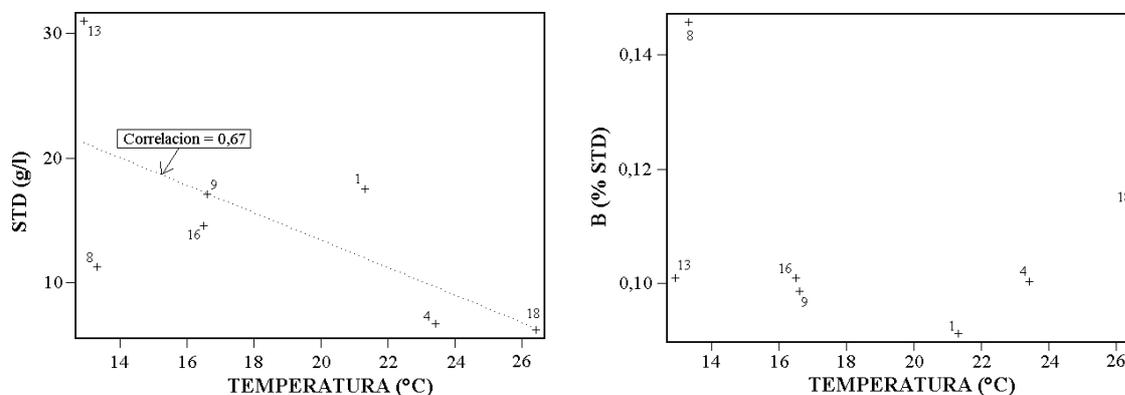


Fig. 4 : Relaciones entre temperatura de los aportes y salinidad y concentración porcentual del boro.

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.

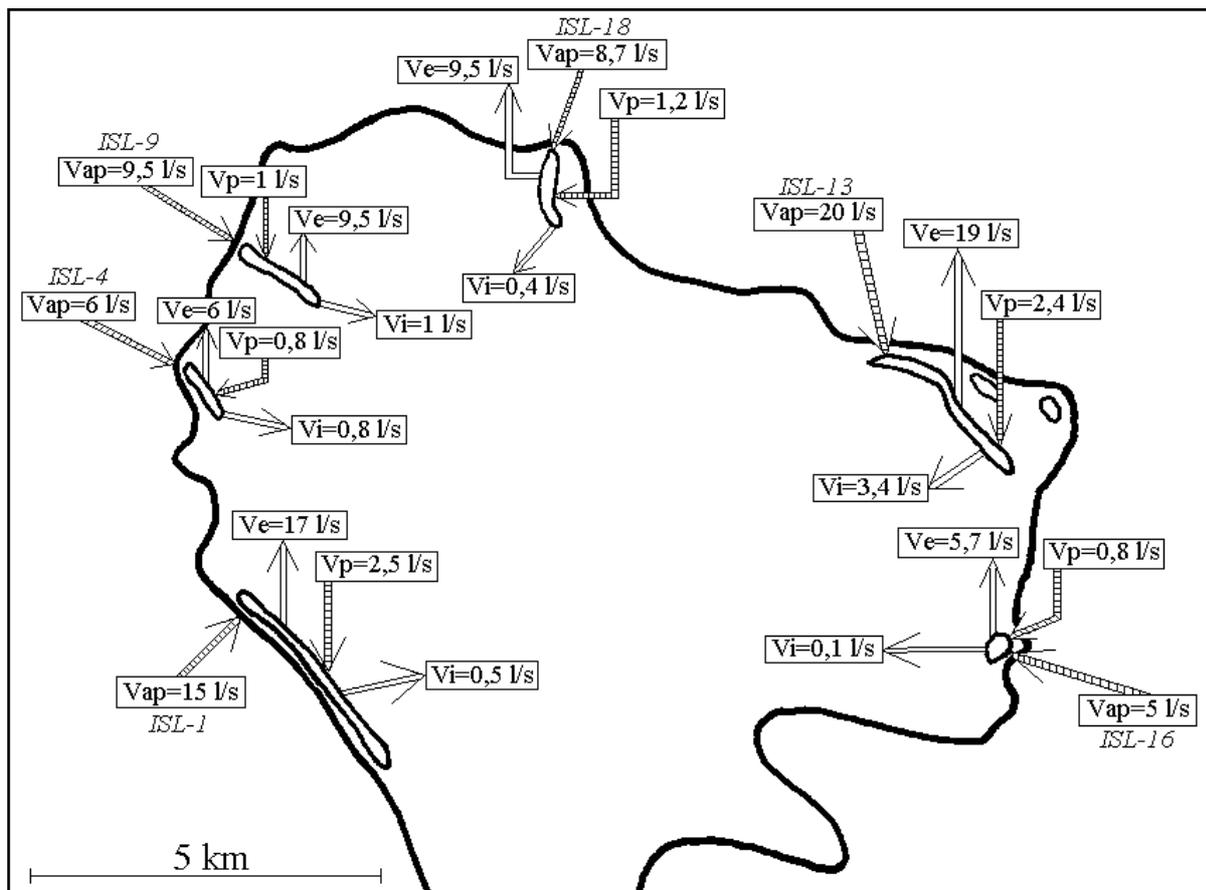
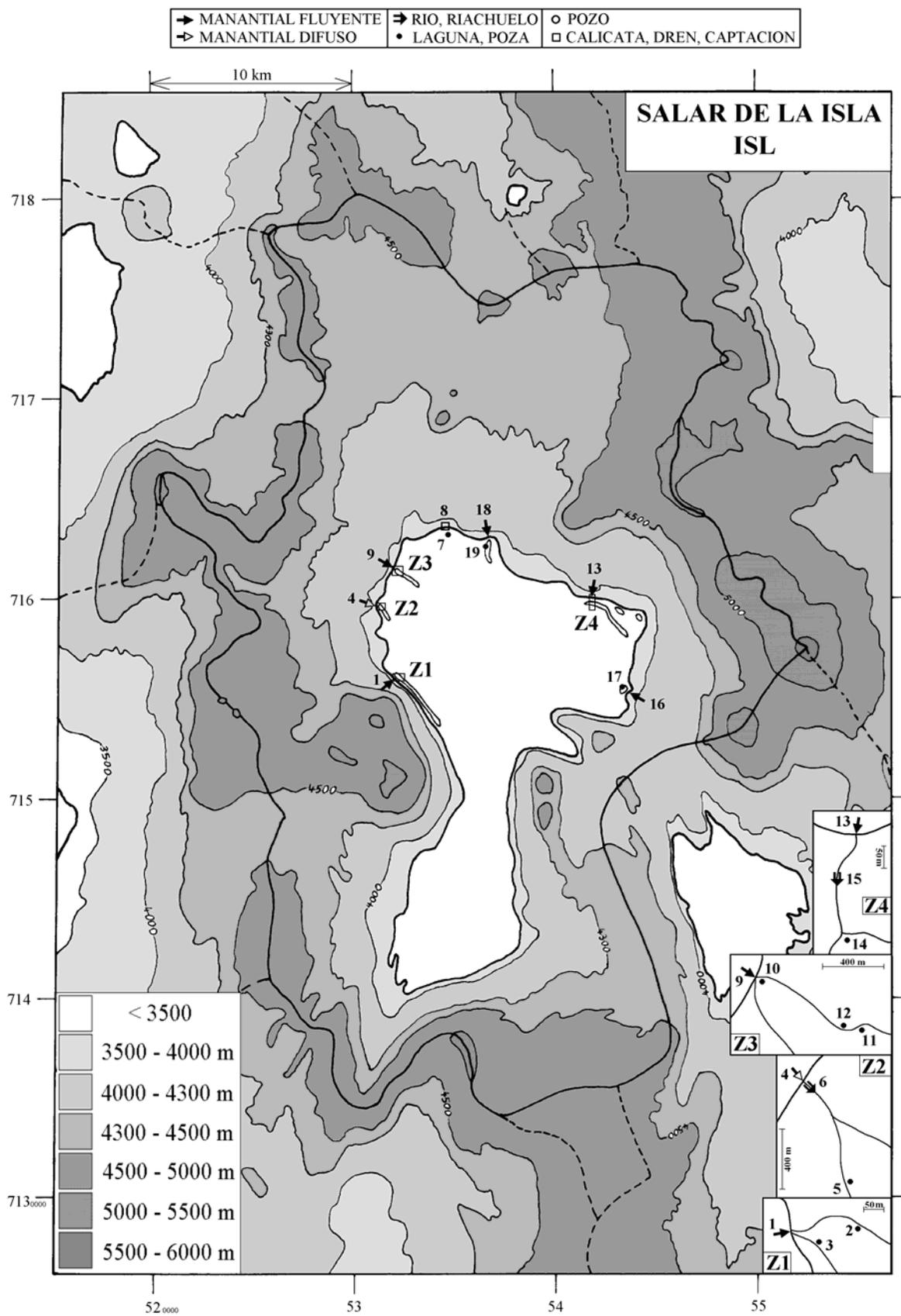


Fig.5 : Balances hídricos de las principales lagunas del salar de la Isla.

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.

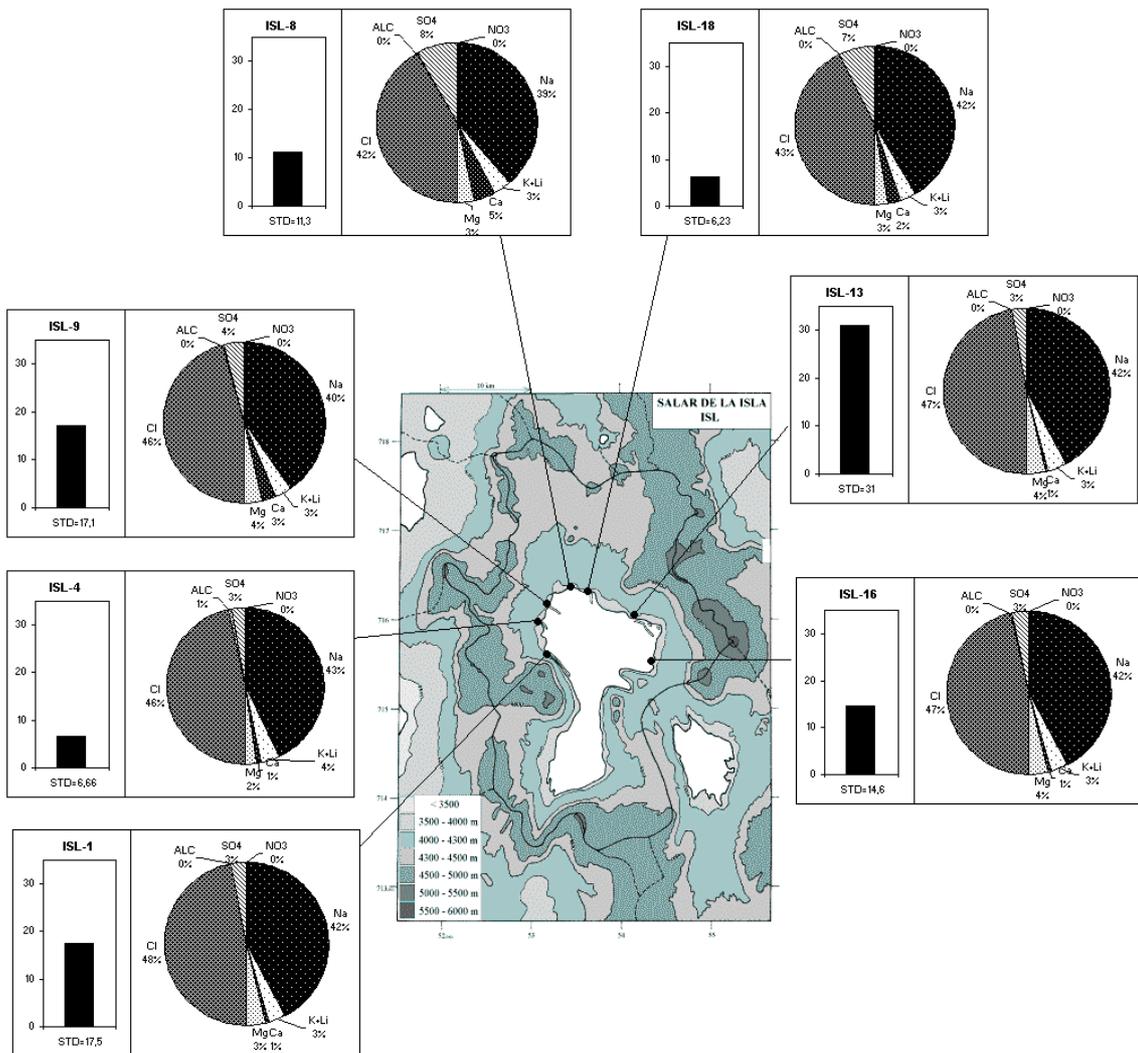
**SALAR DE LA ISLA
ISL**

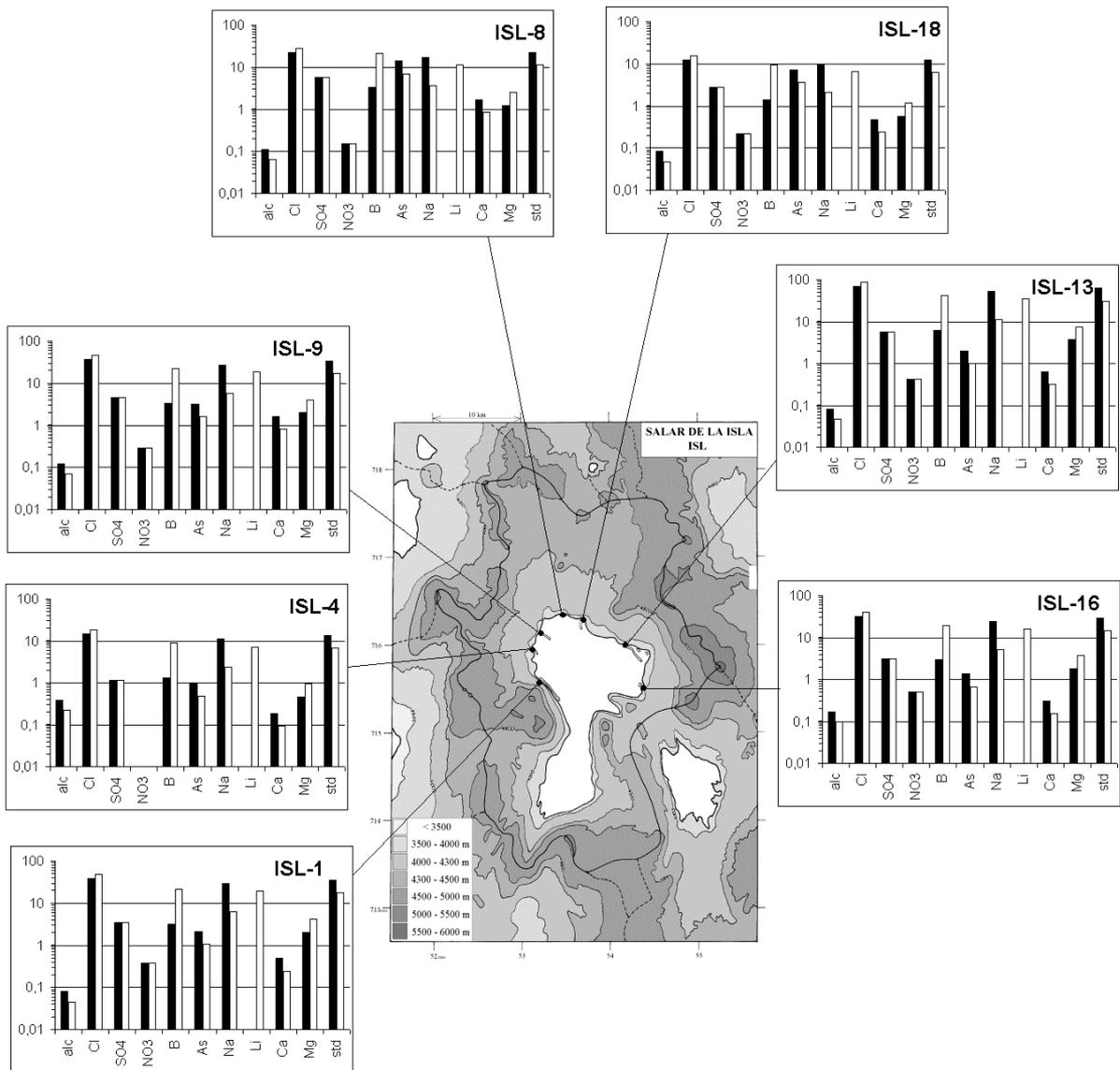
NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF. %
ISL-1	17521	23,4	0,24	0,62	300,3	294,6	1,9
ISL-2	329693	-	-	-	5612	5624	0,2
ISL-3	86916	40,9	0,60	1,7	1490	1473	1,2
ISL-4	6662	134	0,42	7,9	112,7	110,2	2,3
ISL-5	94773	104	3,84	1,9	1616	1609	0,4
ISL-6	26729	28,3	1,44	0,16	454,9	451,6	0,7
ISL-7	53369	73,8	3,12	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 %

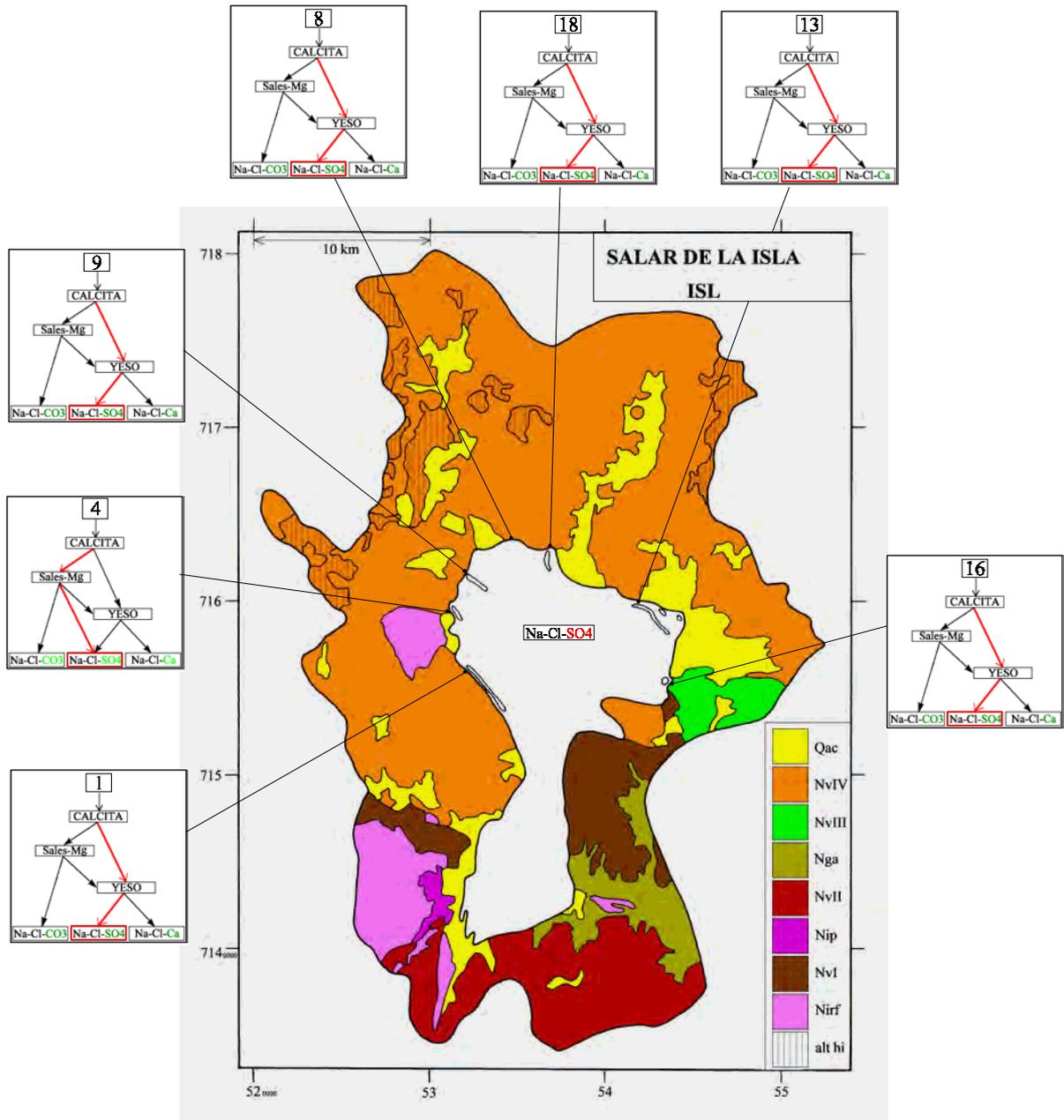




MAPA GEOLOGICO
Y
VIAS EVOLUTIVAS

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.

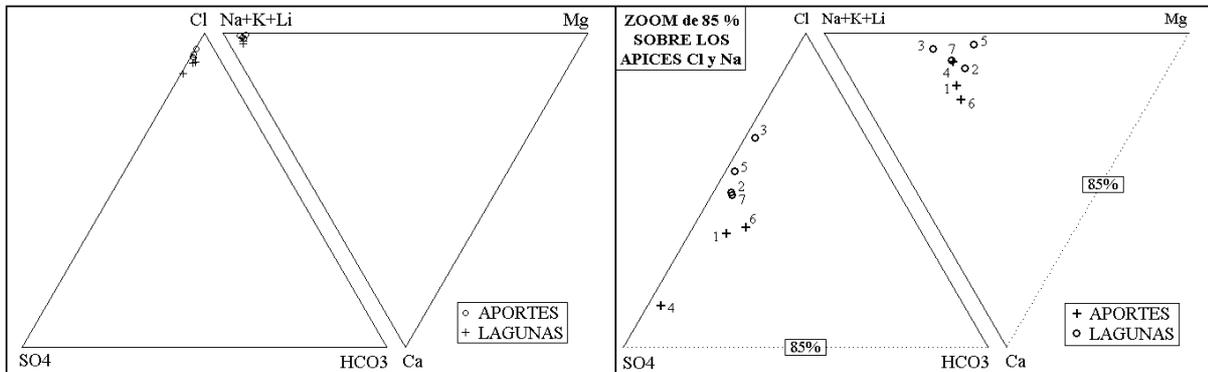


Fig.1: Composición de las aguas y salmueras del salar de las Parinas.

Origen de los componentes disueltos

La mejor relación de equimolaridad entre componentes mayores que se ha encontrado es entre Na y Cl (Fig.2).

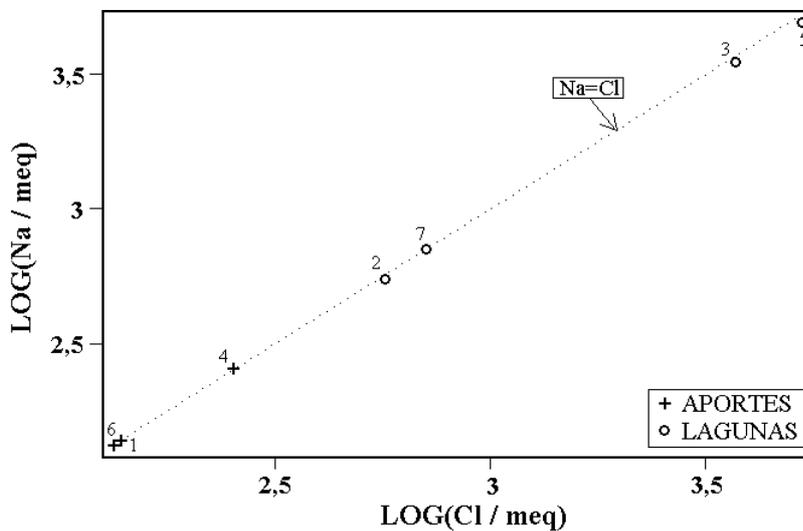


Fig. 2 : Relación entre Na y Cl en aguas del salar de las Parinas.

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 SO_4 y Ca, lo que descarta la asociación de yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) 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	SO ₄	B	SI	NA	K	LI	CA	MG	DESV.
PAR-2	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
PAR-3	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
PAR-5	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
PAR-7	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 _e =	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 :

$$\text{Volumen de aporte : } V_{ap} = S(H_e - H_p) / (1 - C_{ap} / C_L) = 24\,500 \text{ m}^3/\text{año} = 0,8 \text{ l/s}$$

$$\text{Volumen de infiltraciones : } V_i = S(H_e - H_p) / (1 - C_L / C_{ap}) = 1700 \text{ m}^3/\text{año} = 0,05 \text{ l/s}$$

y para la laguna PAR-7 :

$$\text{Volumen de aporte : } V_{ap} = S(H_e - H_p) = 860\,000 \text{ m}^3/\text{año} = 27 \text{ l/s}$$

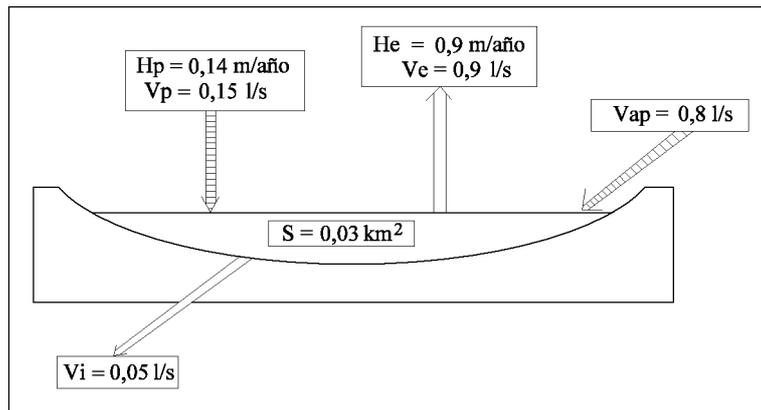


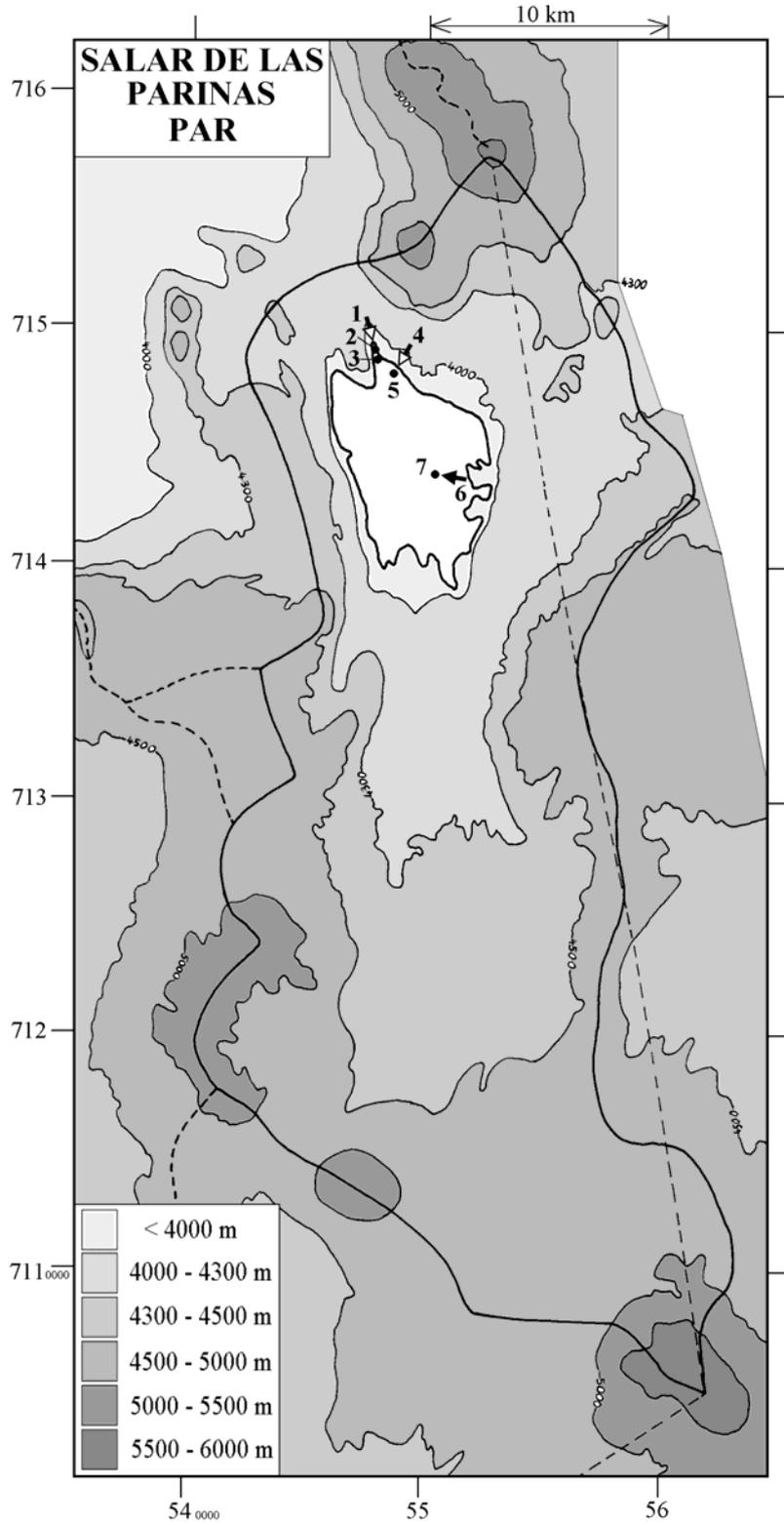
Fig.3 : Balance hídrico muy aproximado de la laguna norte del salar de las Parinas

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 METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
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.

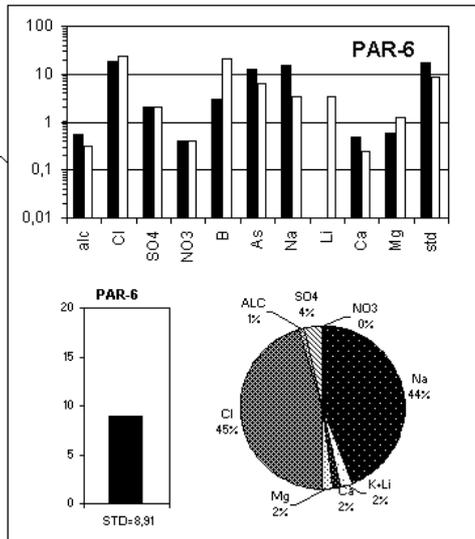
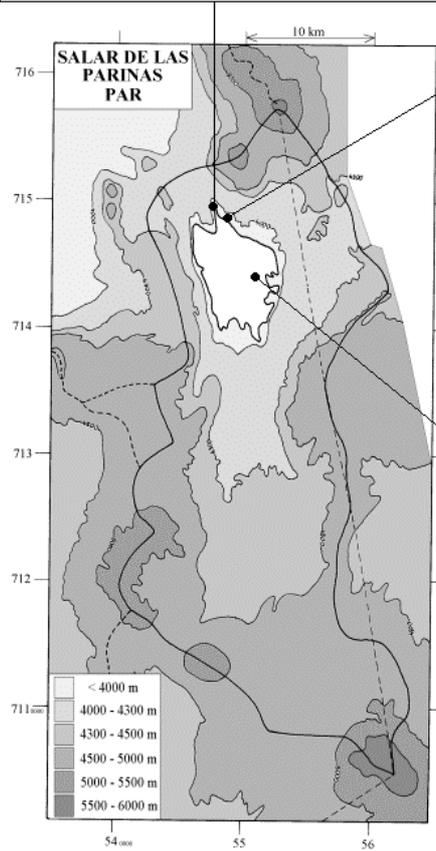
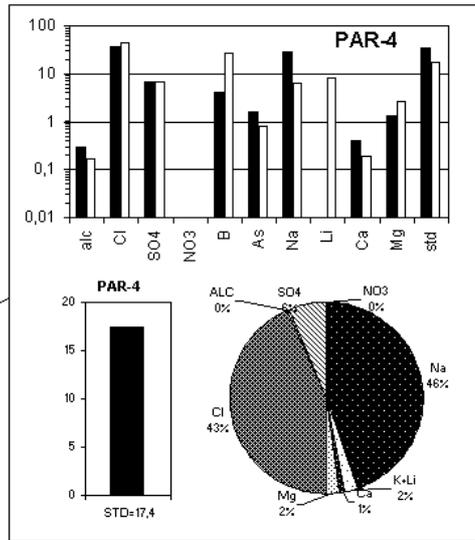
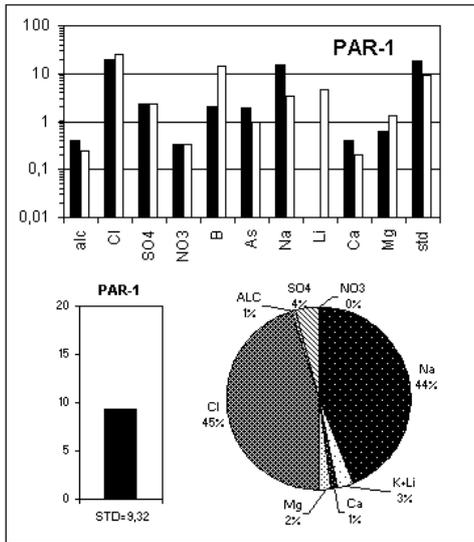
CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

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)

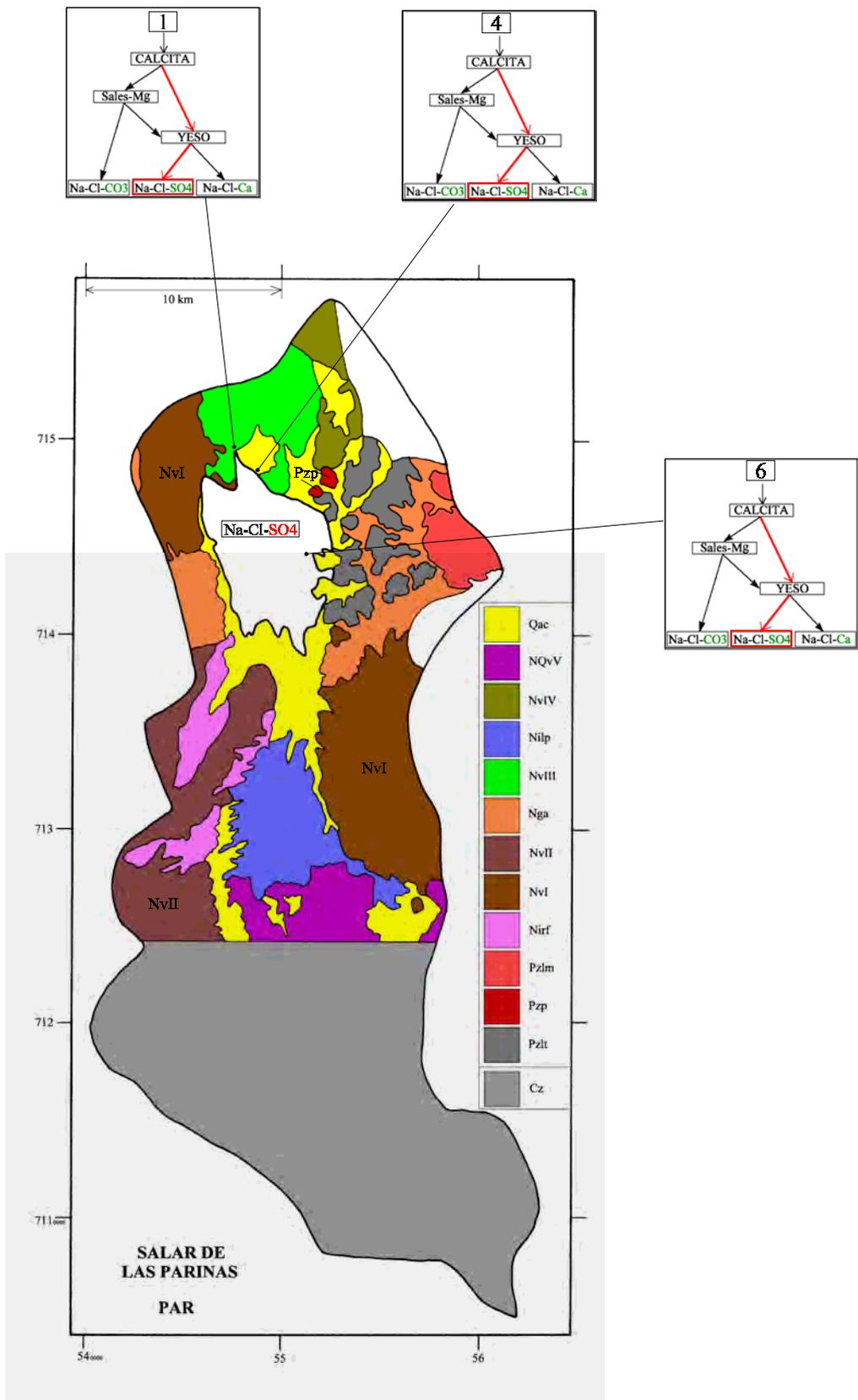
DIF.% = diferencia en %



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 anfibola; allanita y circón como accesorios.
- Pzp** : *Carbonífero* - *Pérmico*. Plutón Parinas. Granito porfídico (plg, feldK, bi).
- Pzlt** : *Carbonífero* - *Pérmico*. Fm. La Tabla. Tobas soldadas y porfidios 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-(SO ₄)-(HCO ₃)	SO ₄ (N)
<u>LAGUNAS</u>				
GRA-2	20394	Na-(Ca)-(Mg)	Cl-(SO ₄)	SO ₄
GRA-4	28955	Na-(Ca)-(Mg)	Cl-(SO ₄)	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.

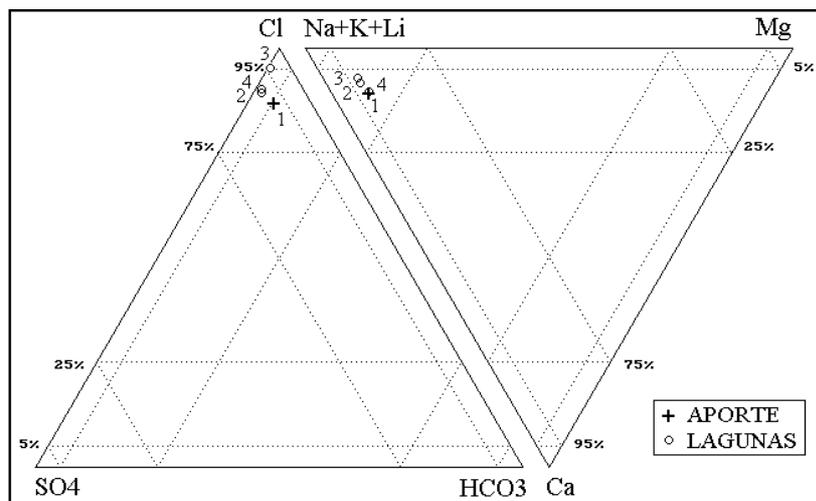


Fig.1: Composición de aguas y salmueras del salar Grande

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.

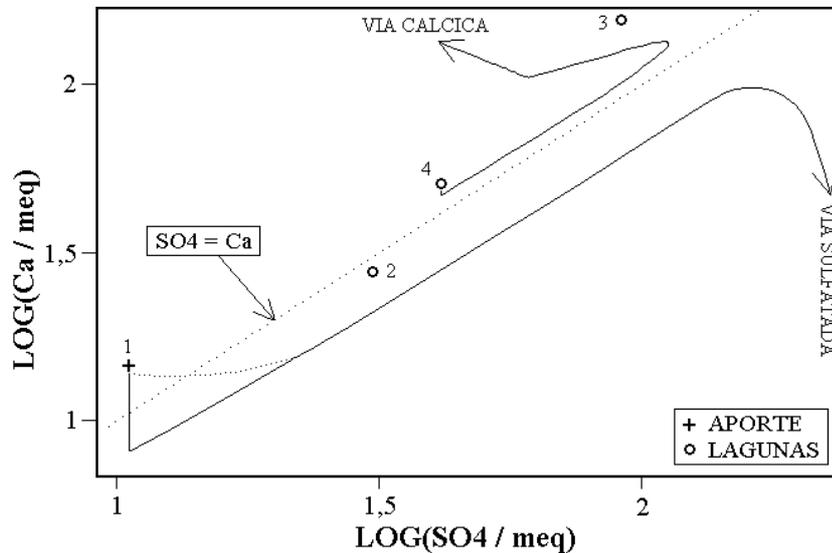


Fig.2 : Relación entre SO_4 y Ca en aguas del Salar Grande con dos trayectos evaporatorios.

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	DESV.
<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

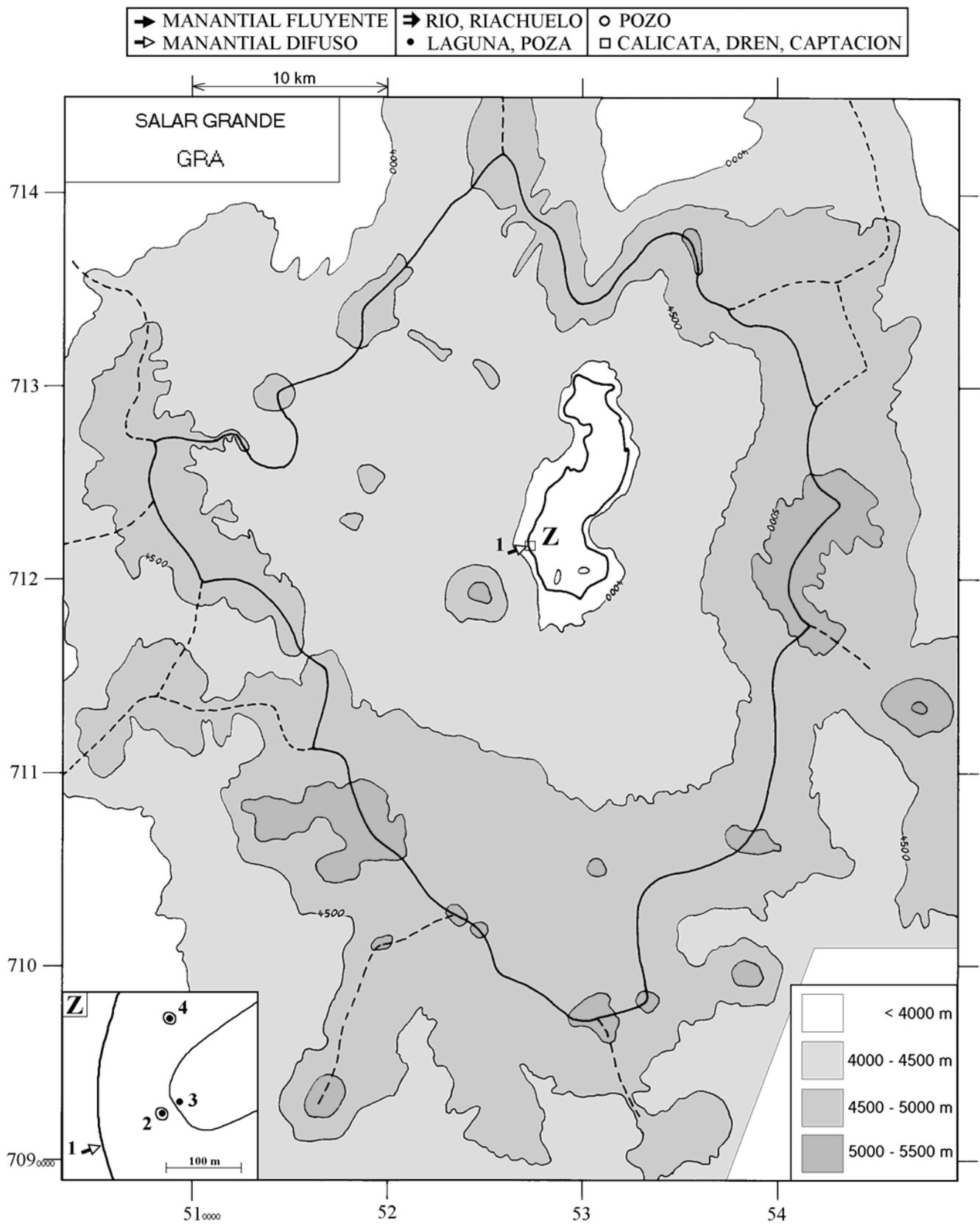
Volumen de aporte : $V_{ap} = S(H_e - H_p) = 300\ 000$ m³/año = 10 l/s

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

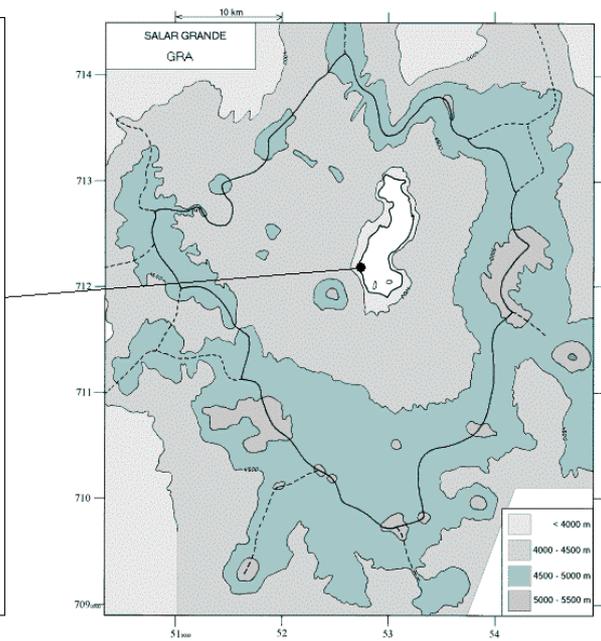
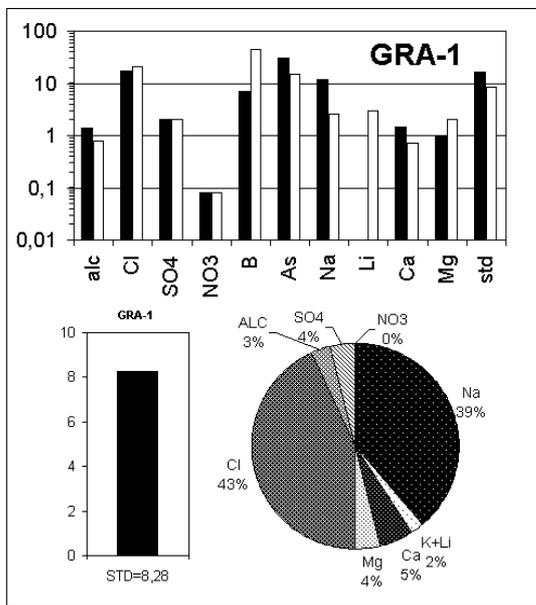
NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE	METROS	
GRA-1	14/11/95	15 ^H 00	527132	7121396	3951	Manantial difuso
GRA-2	14/11/95	15 ^H 30	527236	7121442	3950	Poza de preconcentración
GRA-3	14/11/95	16 ^H 00	527246	7121445	3950	Laguna
GRA-4	14/11/95	16 ^H 30	527208	7121530	3950	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			

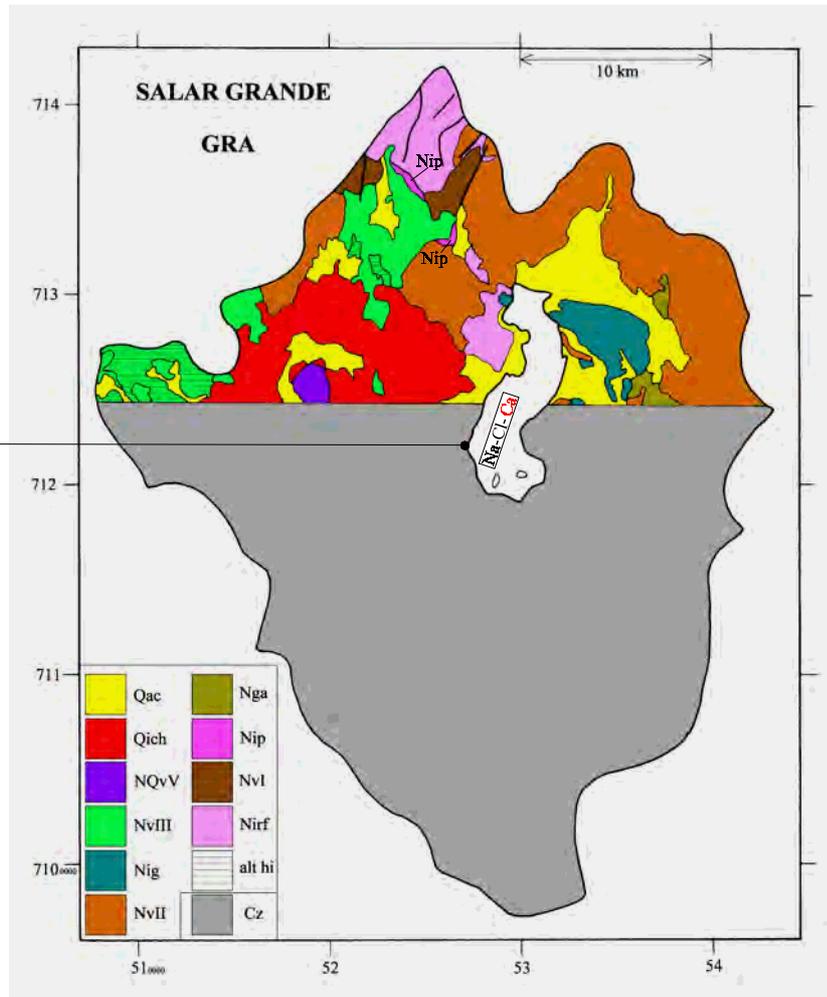
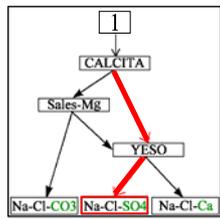
Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.
S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l)
DIF.% = diferencia en %



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 un 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-(HCO ₃)-(SO ₄)	SO ₄ (A)
INF-6	8575	Na-(Ca)-(Mg)	Cl-(SO ₄)	SO ₄ (N)
<u>POZAS</u>				<u>MEGA-GRUPO</u>
INF-2	12710	Na-(Ca)-(Mg)	Cl-SO ₄	SO ₄
INF-5	20199	Na-(Ca)-(Mg)	Cl-(SO ₄)	Ca
INF-4	75700	Na-(Mg)-(Ca)	Cl-(SO ₄)	Ca
INF-3	318743	Na-(Mg)-(Ca)	Cl	Ca

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

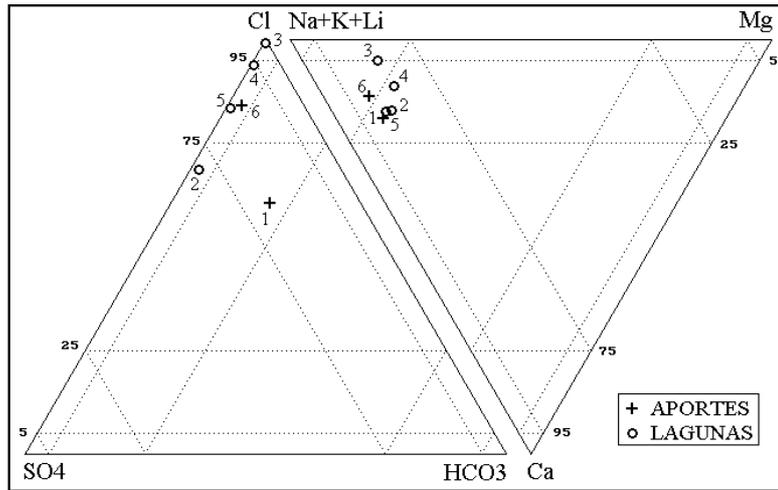


Fig.1: Composición de aguas y salmueras del salar de Infieles.

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.

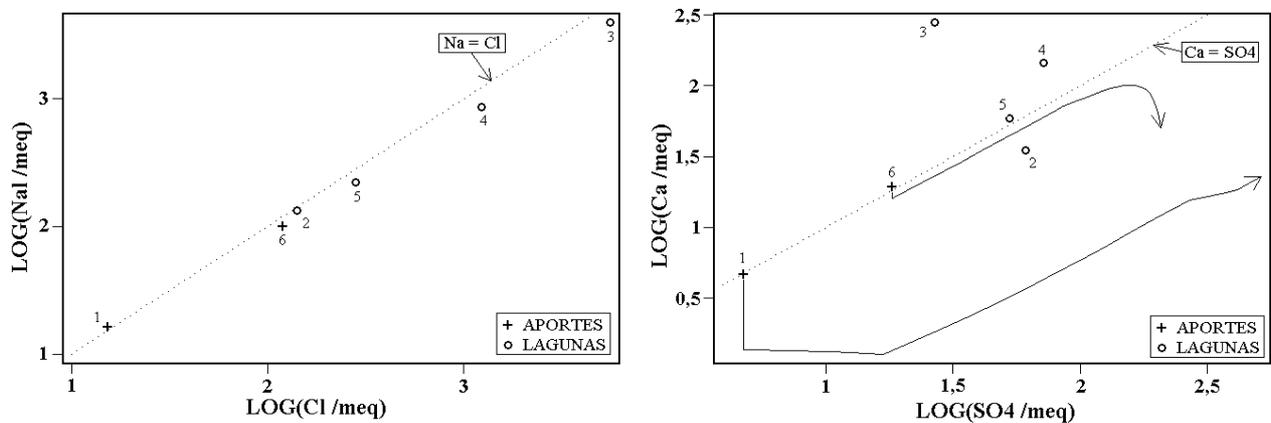


Fig.2 : Relaciones Na versus Cl y Ca versus SO₄ en aguas del salar de Infieles.

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.

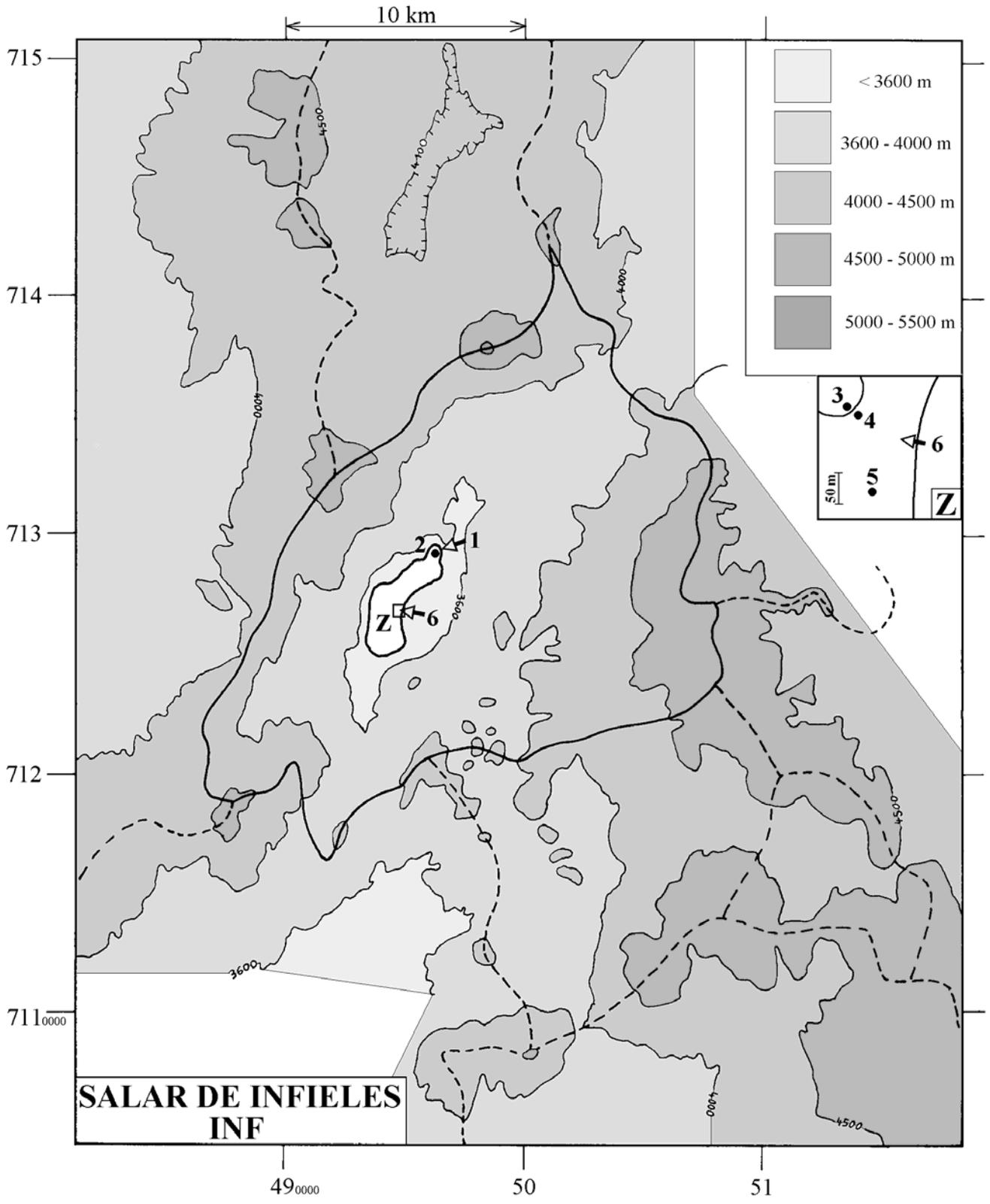
Calidad de aguas

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

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

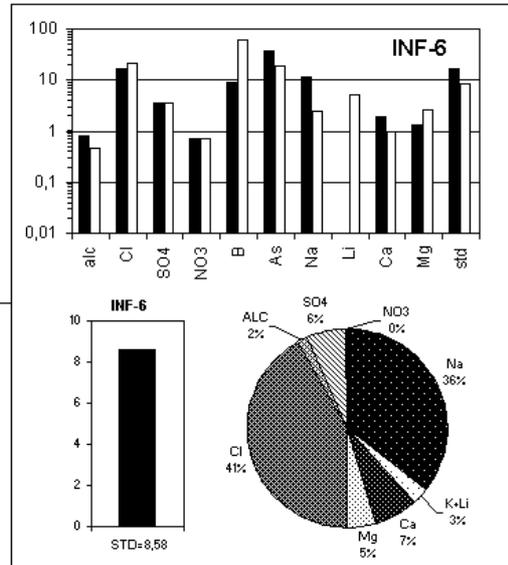
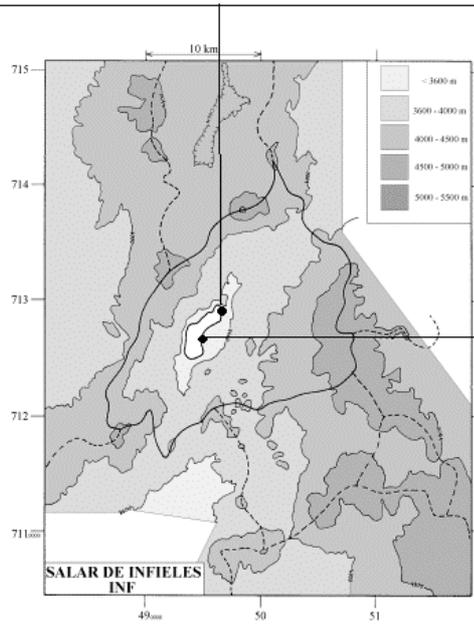
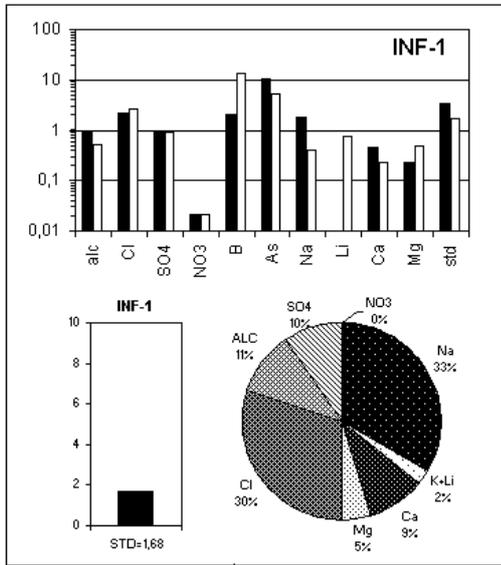
NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
INF-1	1820	23,5	5,8	1,001	7,90	5,23	543	0,497	0,303	227	0,905	10,2	42,3	0,54	370	34,3	1,87	93,4	29,2
INF-2	10800	21,7	5,6	1,010	8,02	3,97	5040	3,26	0,782	2920	0,136	72,2	55,7	3,85	3080	267	16,0	698	309
INF-3	200000	19	0,3	1,209	6,66	19,2	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 %

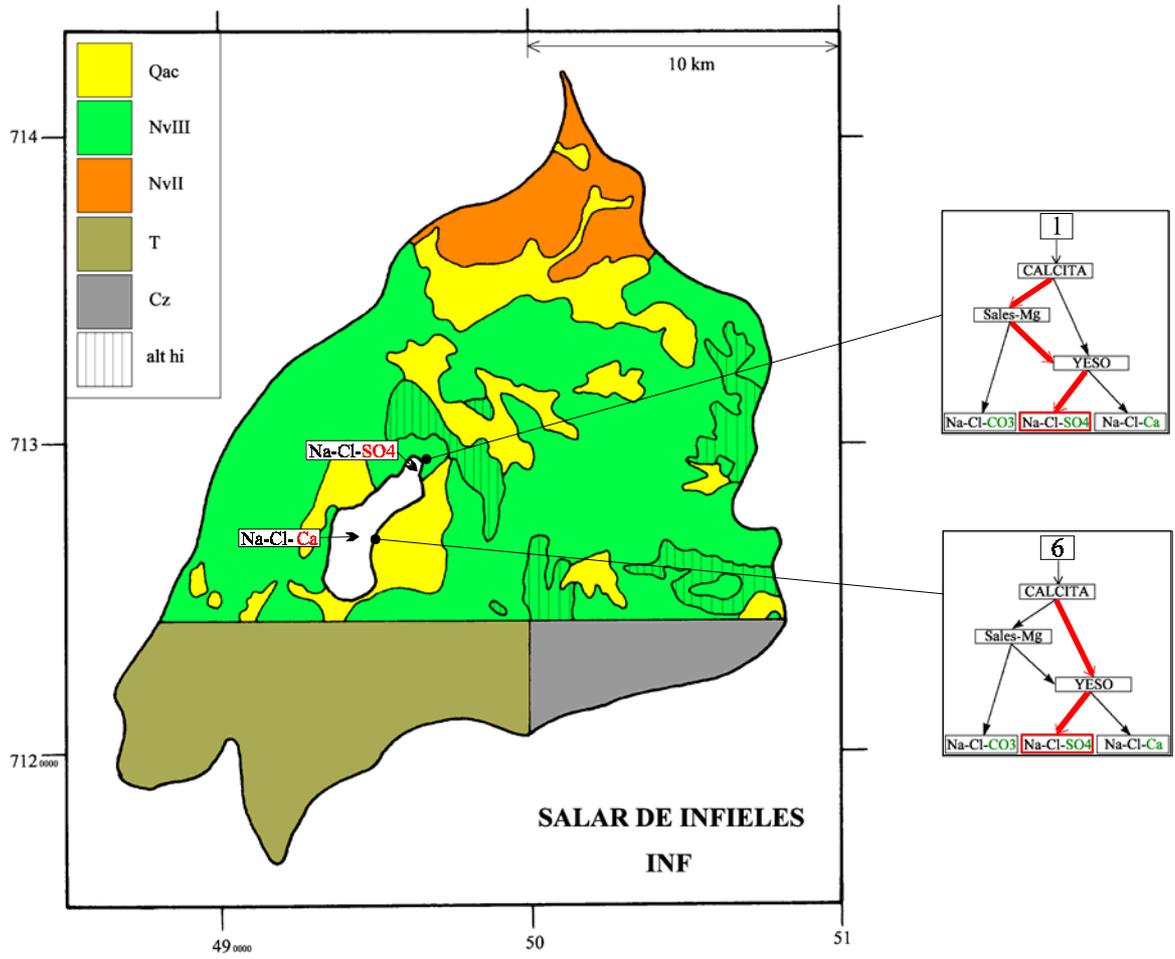
Análisis de oxígeno-18
y deuterio



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

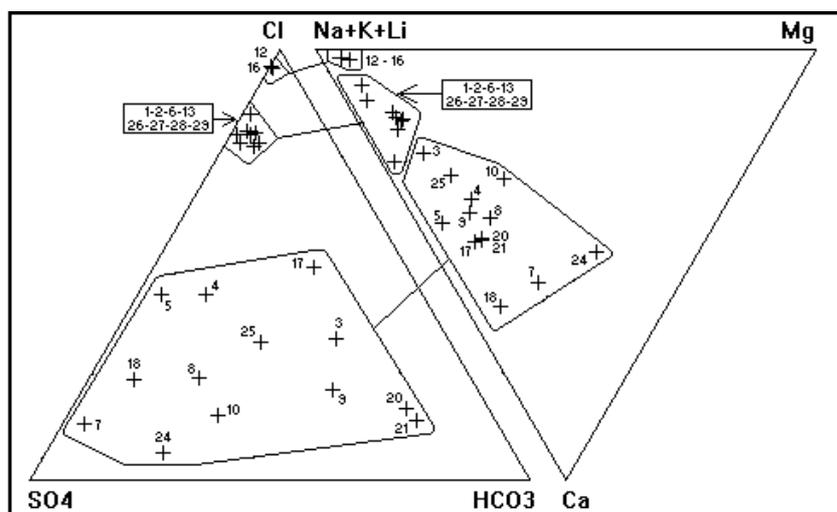


Fig.1 : Composición de las aguas de aporte al salar de Pedernales.

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 .

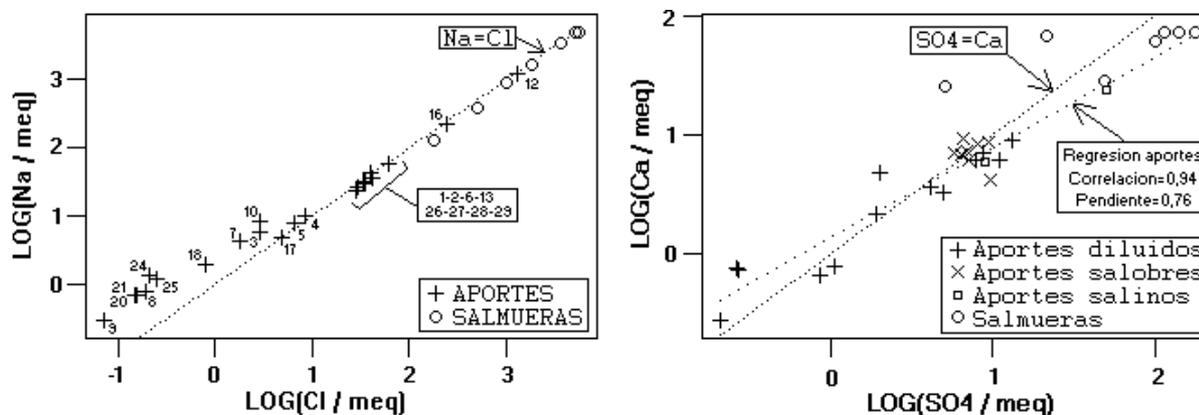


Fig.2 : Relaciones Na/Cl y Ca/ SO_4 en las aguas y salmueras del salar de Pedernales.

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.

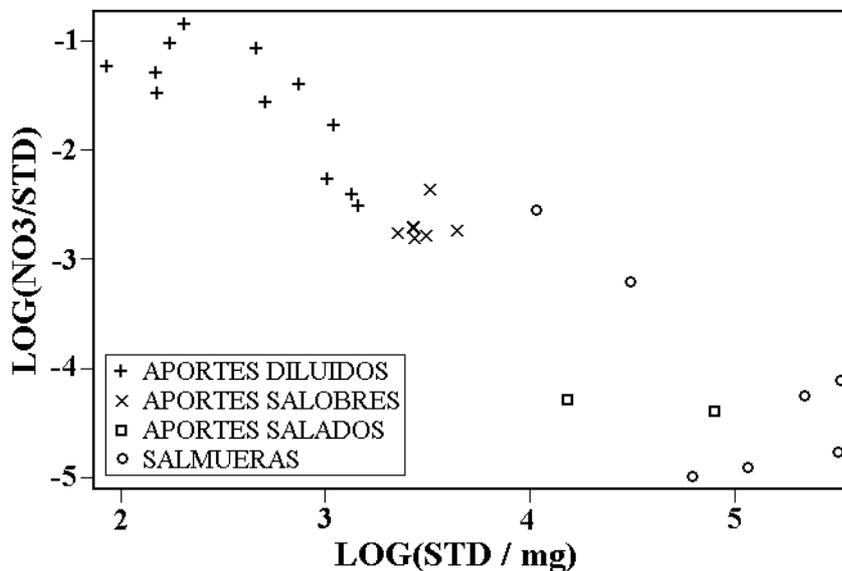


Fig.3 : Concentraciones de NO₃ relativas a la salinidad en las aguas de Pedernales.

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.

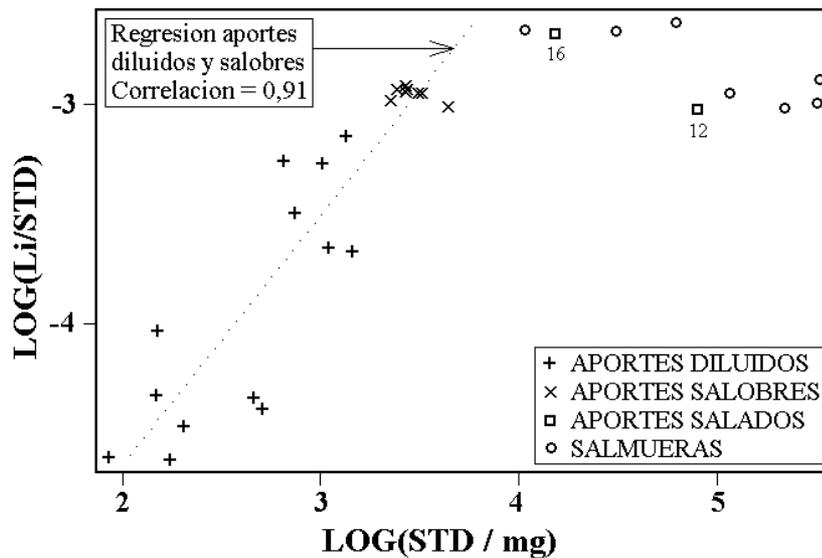


Fig.4 : Concentraciones de Li relativas a la salinidad en las aguas de Pedernales.

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	DES.V.
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 un línea de evaporación. No se diferencian las aguas diluidas de las aguas salobres por su composición isotópica.

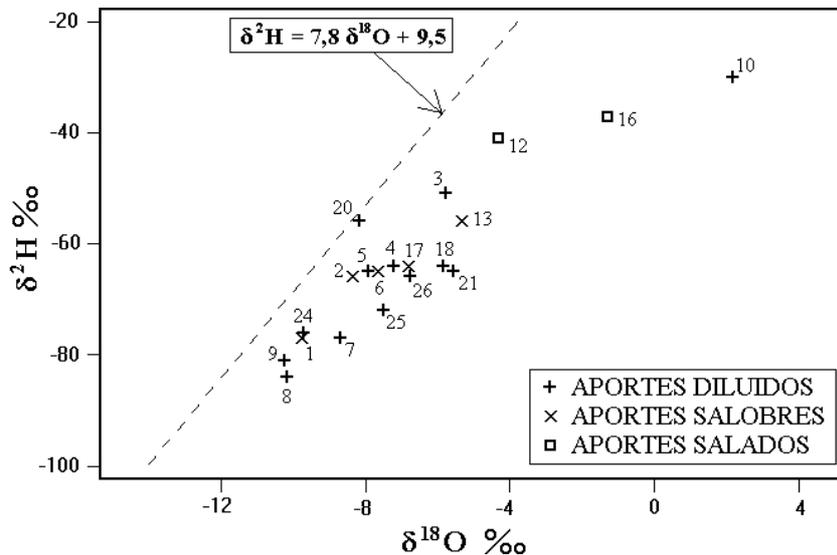


Fig.5 : Composición isotópica $\delta^2\text{H}$ versus $\delta^{18}\text{O}$ de las aguas de aporte al salar de Pedernales.

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 formulas 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) :	1600x10 ⁶	1600x10 ⁶
Altura de precipitación (m/año) :	0,1	0,15
Volumen de precipitación (m ³ /año) :	160x10 ⁶	240x10 ⁶
Agua que entra al salar (m ³ /año):	160 x10 ⁶ xE	240 x10 ⁶ xE
Cl que entra al salar (ton/año):	99 200xE	696 000xE

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.

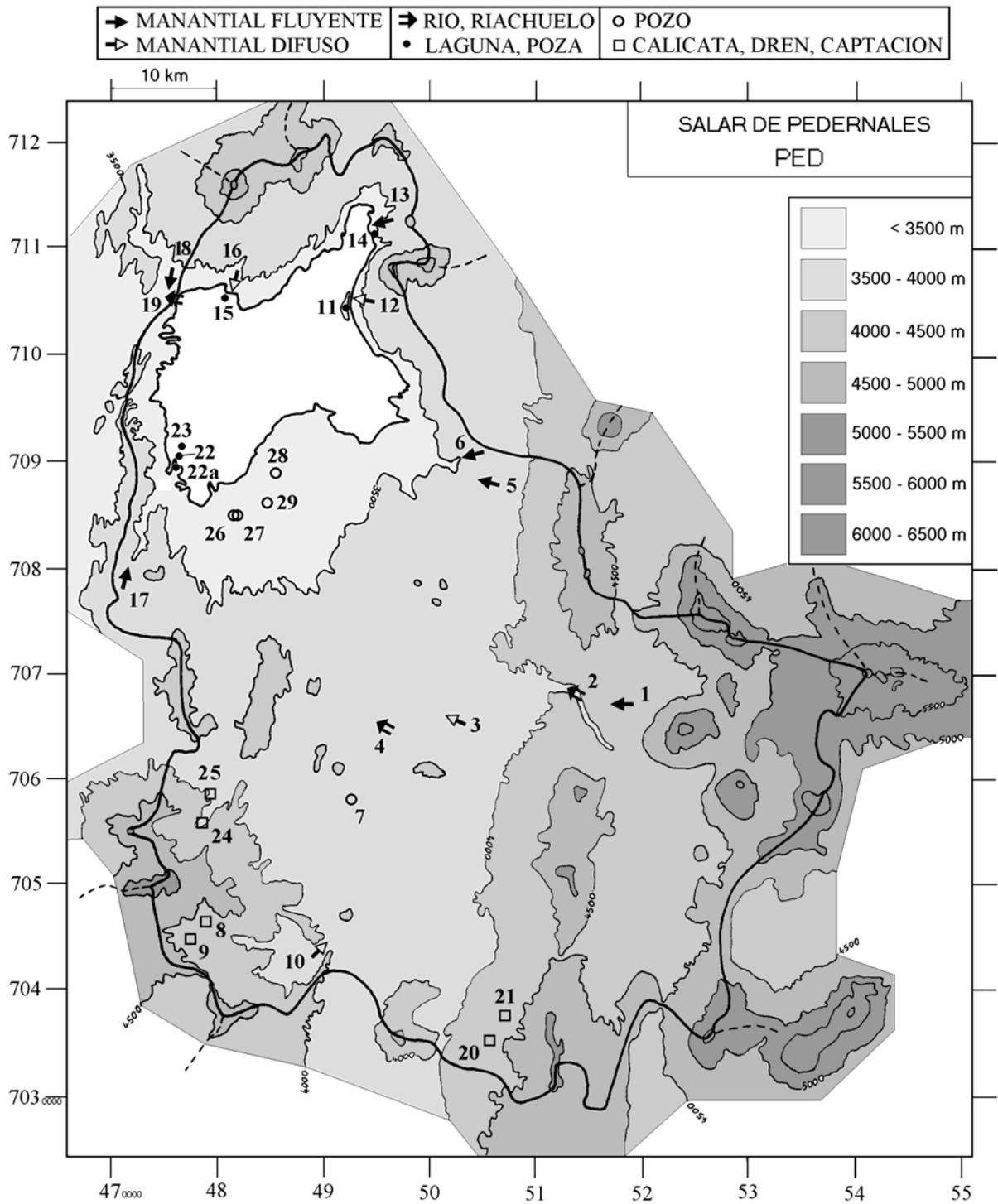
La salinidad elevada de las aguas de aporte salobres proviene de la redisolución de sales evaporíticos antiguos (halita y yeso). Se sospecha también un aporte de componentes eólicos en las aguas diluidas (SO_4 y NO_3). La mayor parte de las aguas diluidas y todas las salobres siguen la vía evolutiva 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

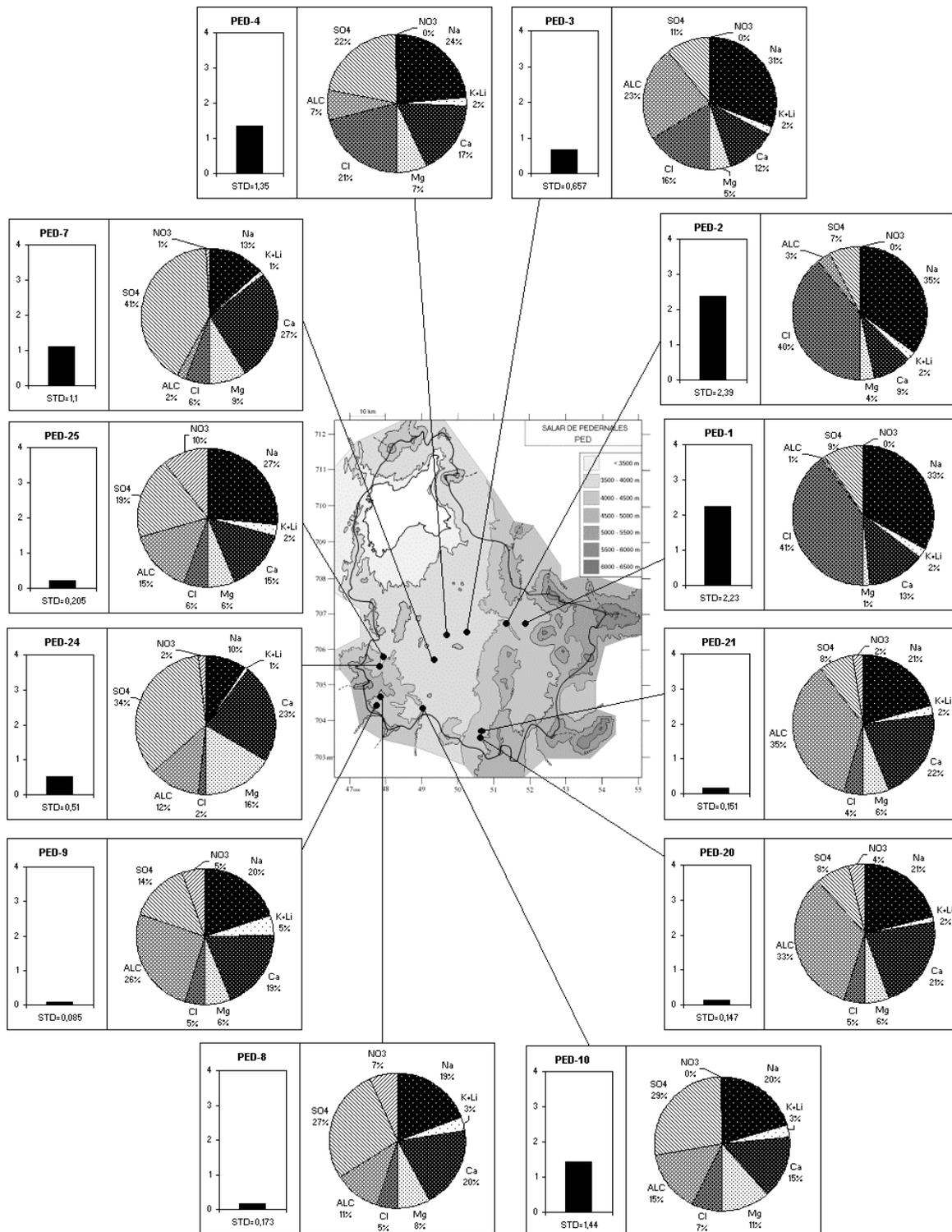
T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l.
CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

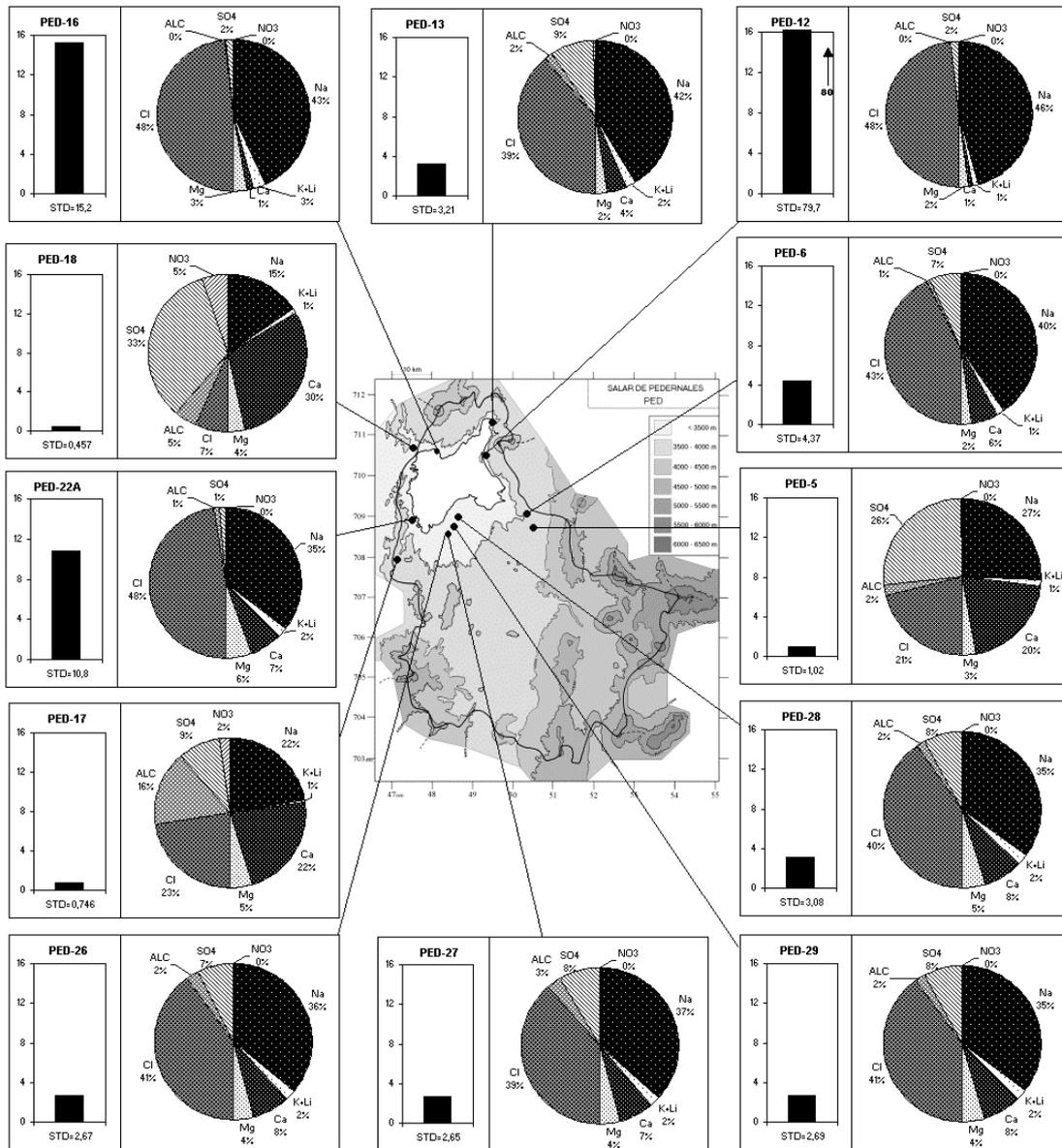
SALAR DE PEDERNALES
PED

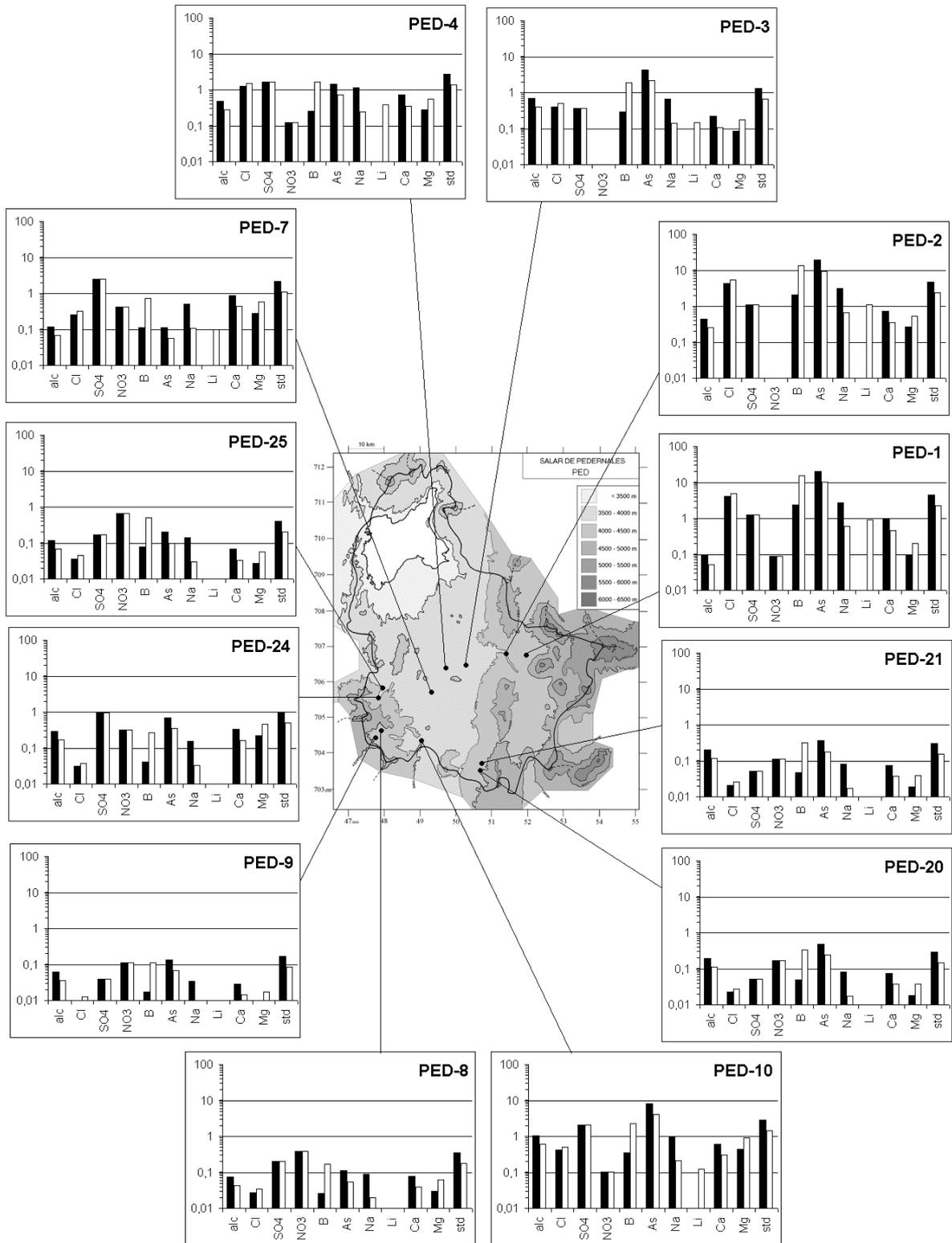
NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF.%	NUMERO	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
PED-1	2230	26,0	0,36	0,66	35,77	35,27	1,4	PED-1	-9,79	-77
PED-2	2393	134	5,34	0,75	38,54	38,19	0,9	PED-2	-8,36	-66
PED-3	656,5	217	8,52	0,79	9,036	8,731	3,4	PED-3	-5,76	-51
PED-4	1354	159	3,90	1,6	20,53	20,20	1,6	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

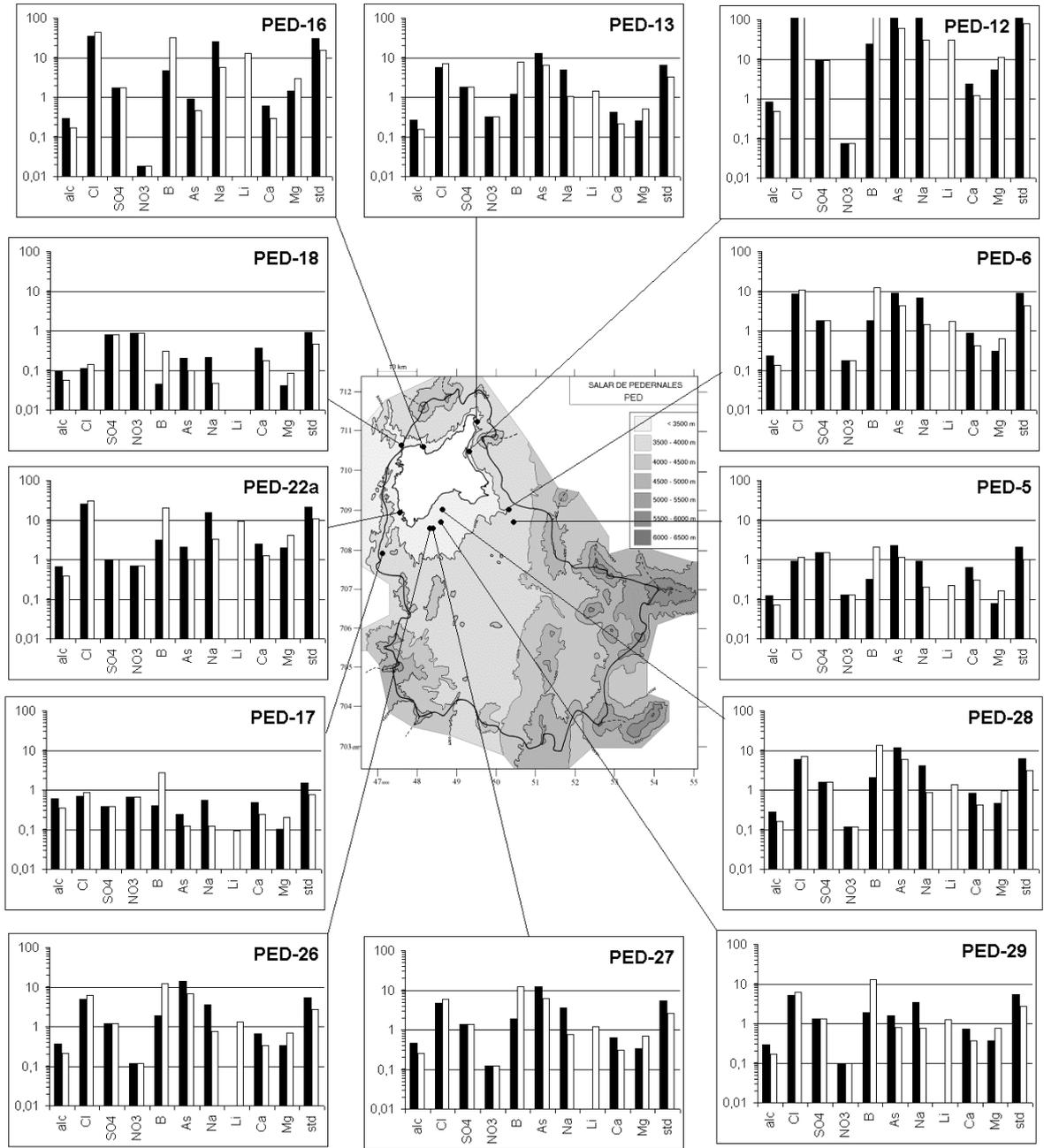
Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.
S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l)
DIF.% = diferencia en %

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.

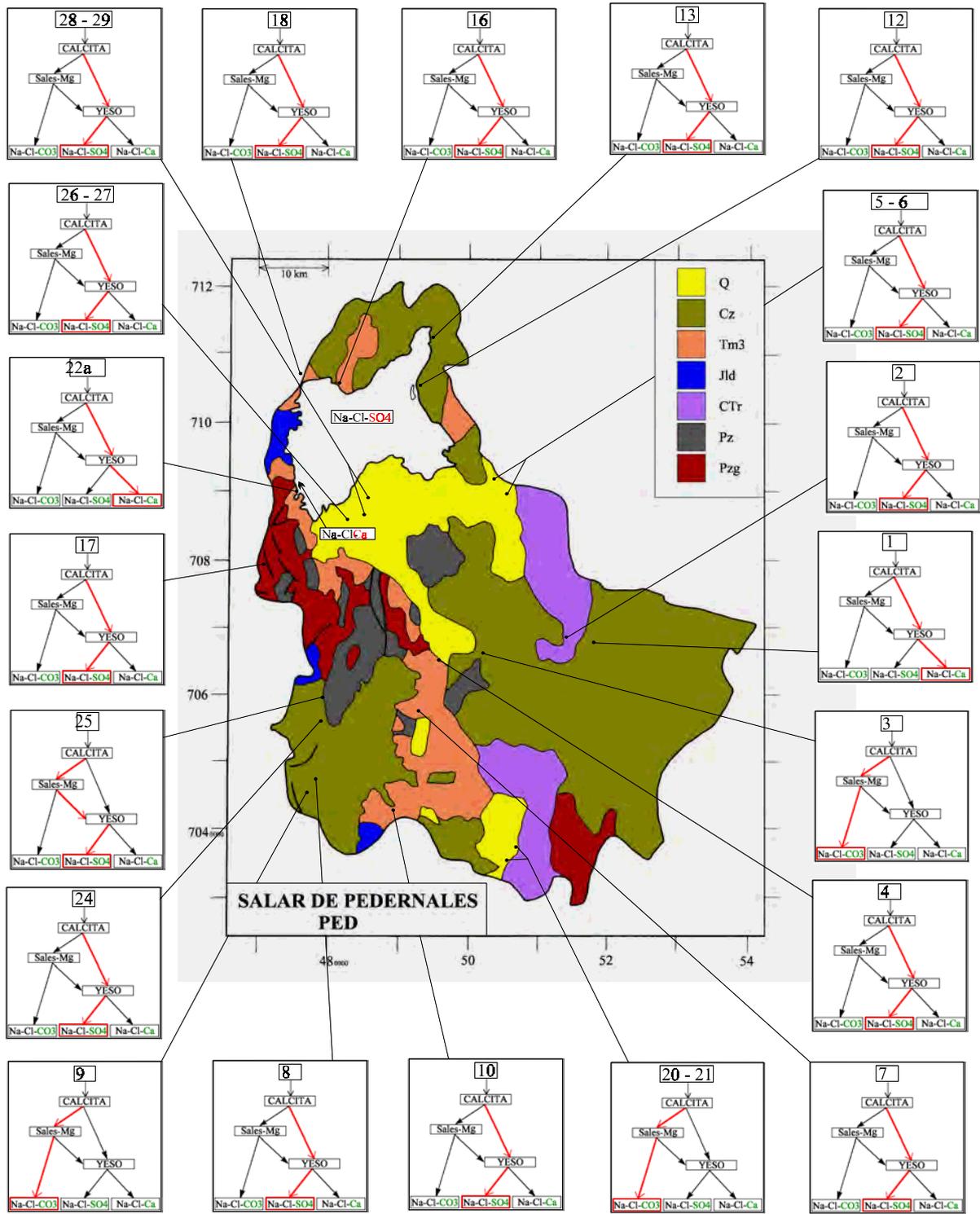
Tm3 : *Mioceno*. Gravas de Atacama. Gravas, arenas y limos subordinados, localmente con litificación incipiente e intercalaciones de ignimbritas.

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-(SO ₄)-(HCO ₃)	SO ₄ (N)
LGN-1	3998	Ca-Na-(Mg)	/ SO ₄ -Cl	SO ₄ (N)
LGN-3	9107	Na-Ca-(Mg)	/ Cl-SO ₄	SO ₄ (N)
<u>LAGUNAS</u>				<u>MEGA-GRUPO</u>
LGN-2	8126	Na-Ca-(Mg)	/ Cl-SO ₄	SO ₄
LGN-4	20430	Na-(Ca)-(Mg)	/ Cl-SO ₄	SO ₄

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.

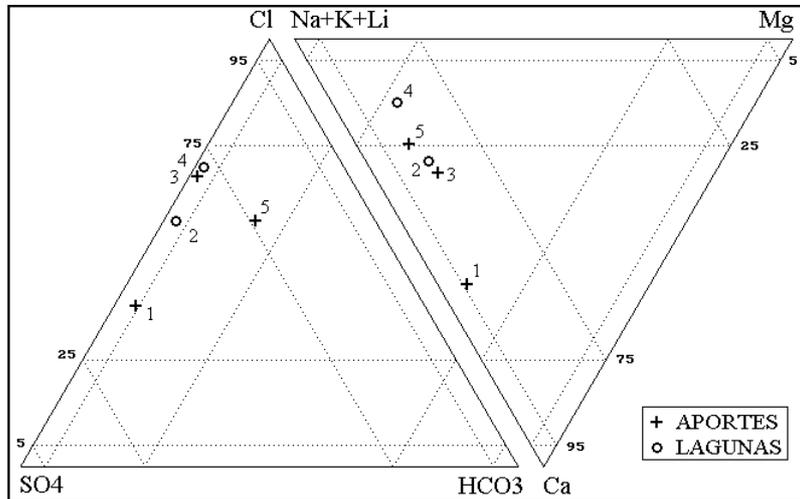


Fig.1: Composición de aguas y salmueras del salar de la Laguna.

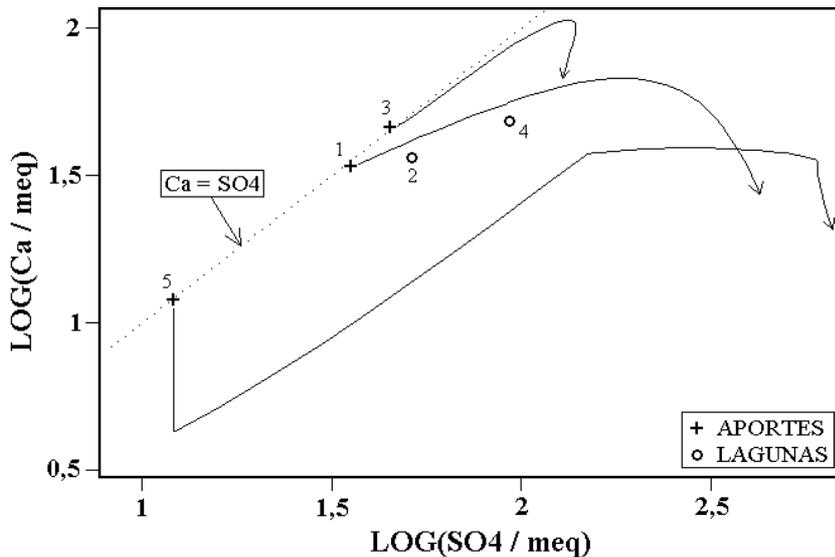


Fig.2 : Relación SO_4 versus Ca en aguas del salar de la Laguna con los trayectos evaporatorios hacia la vía sulfatada.

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.

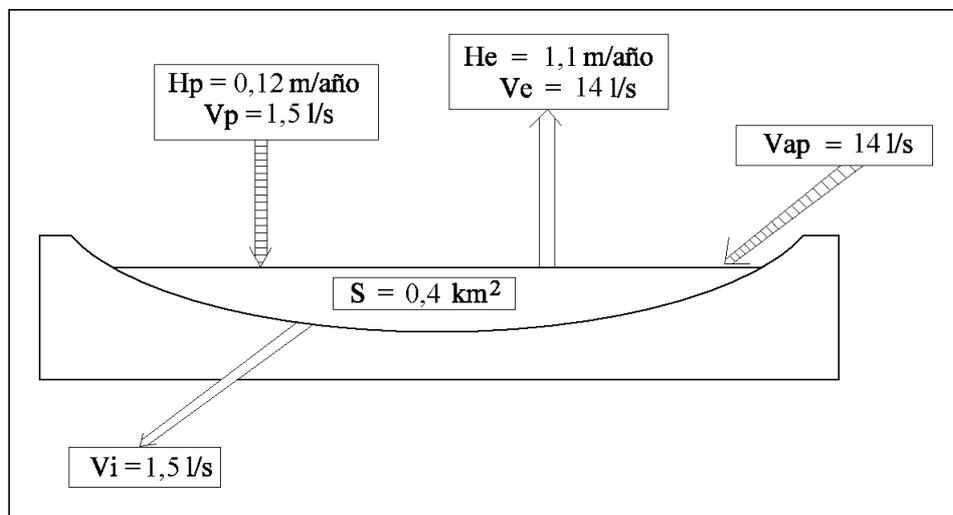
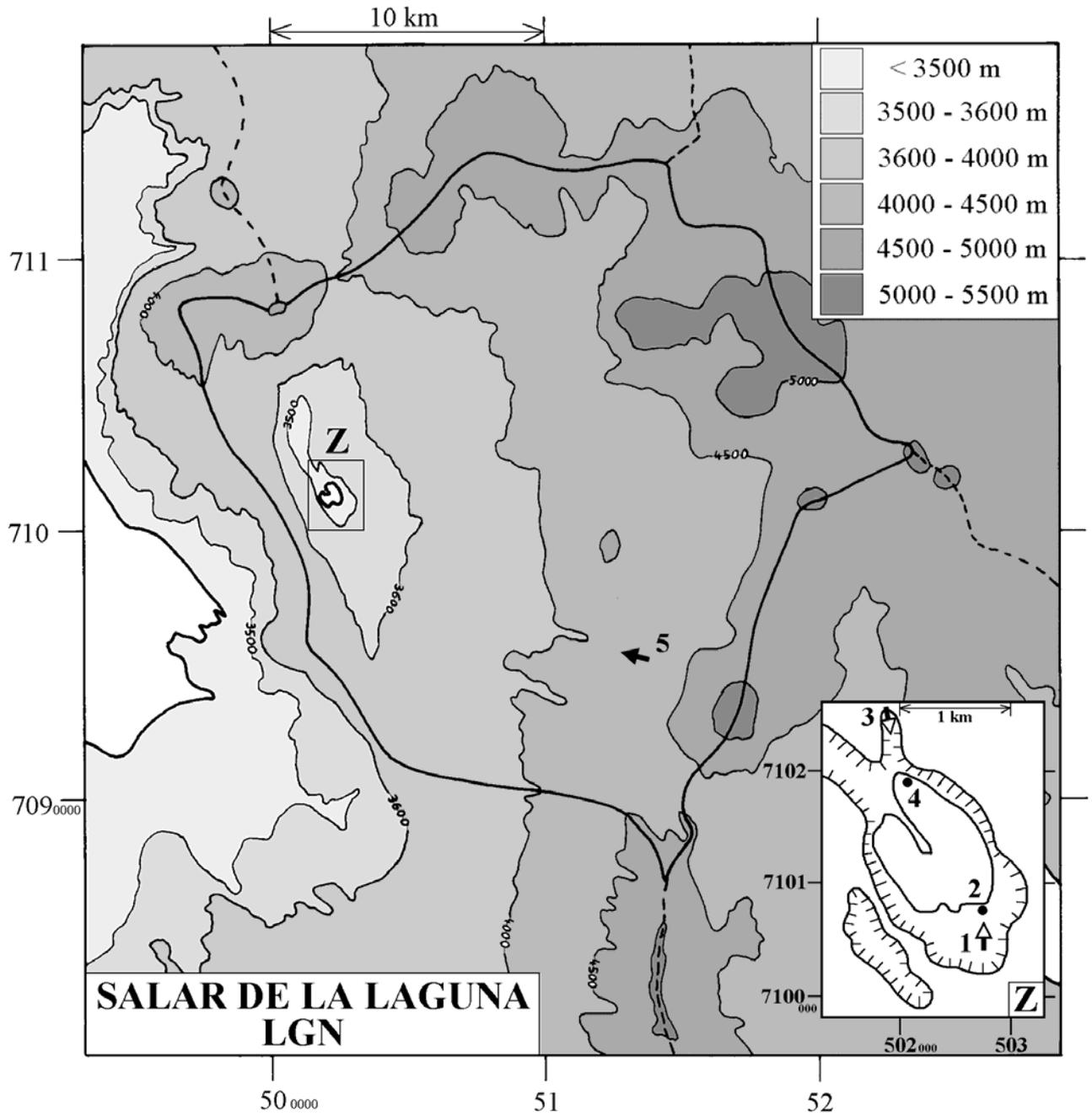


Fig.3 : Balance hídrico de la laguna del salar de la Laguna.

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.

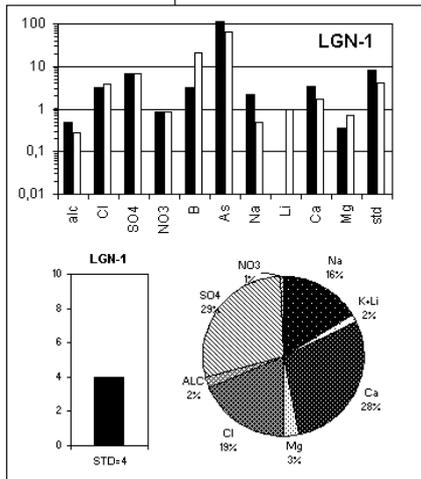
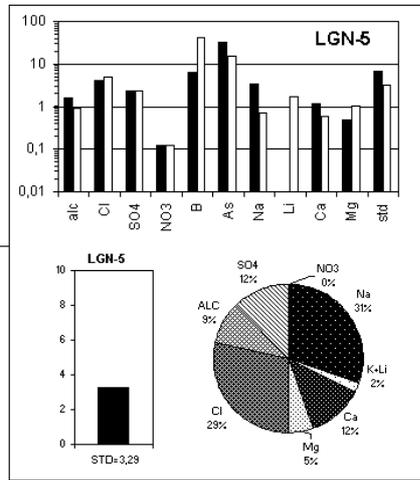
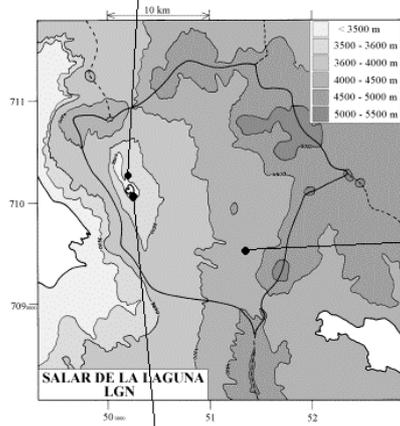
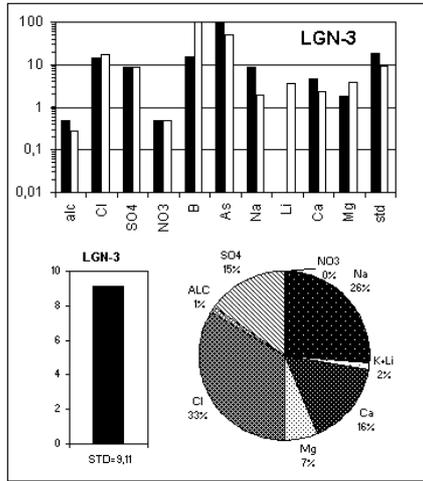
NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF.%	NUMERO	δ ¹⁸ O	δ ² H
LGN-1	3998	145	6,00	1,6	58,84	61,26	4,0	LGN-1	-4,71	-50
LGN-2	8126	124	9,36	0,70	127,8	128,9	0,8	LGN-2	na	na
LGN-3	9107	114	5,04	1,4	146,9	148,1	0,8	LGN-3	-2,25	-38
LGN-4	20430	152	12,4	0,92	329,7	331,1	0,4	LGN-4	na	na
LGN-5	3288	565	0,48	180	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 %

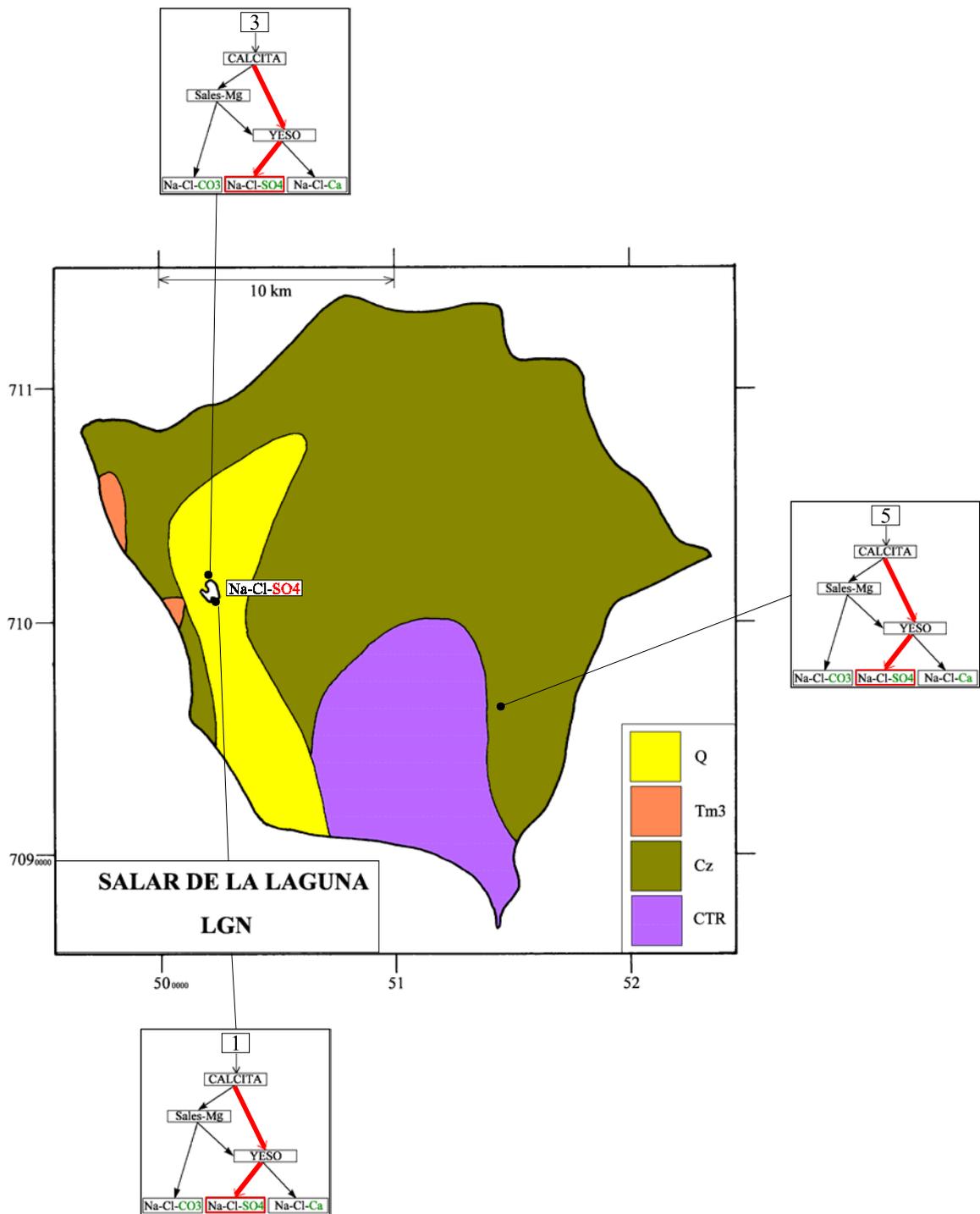
Análisis de oxígeno-18
y deuterio



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).

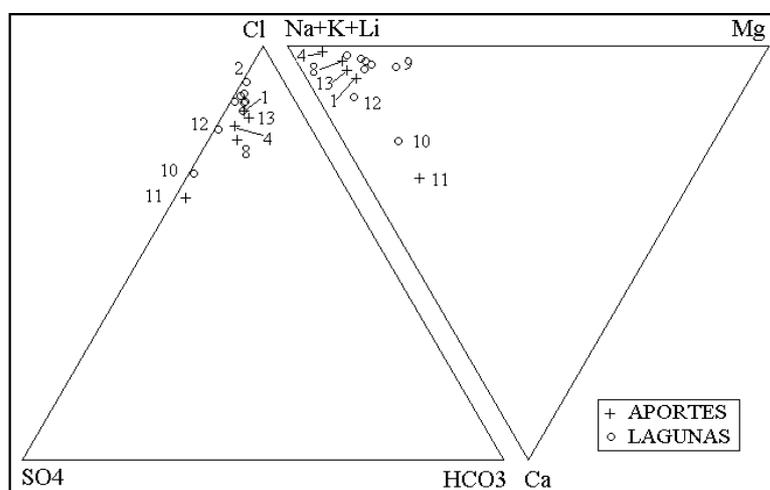


Fig.1: Composición de aguas y salmueras del salar de Piedra Parada.

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).

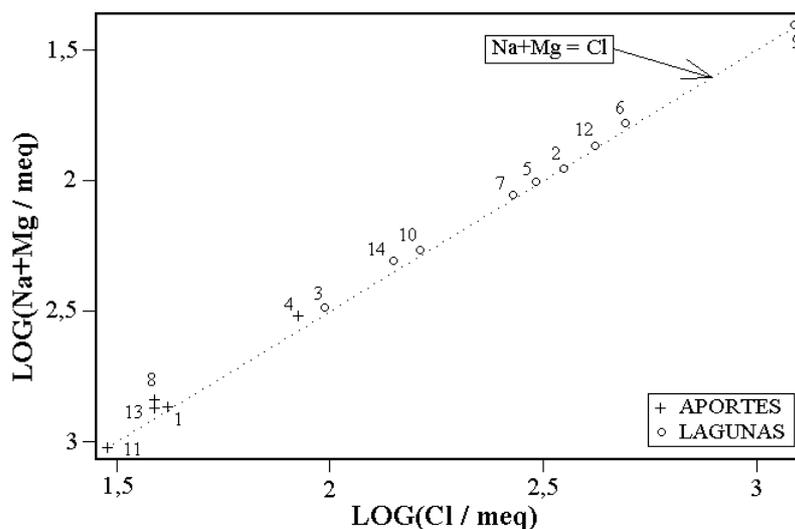


Fig.2 : Relación entre Na+Mg y Cl en aguas del salar de Piedra Parada

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

PIE-12.EQ	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
PIE-10.EQ	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
PIE-6.EQ	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
PIE-5.EQ	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
PIE-9.EQ	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.

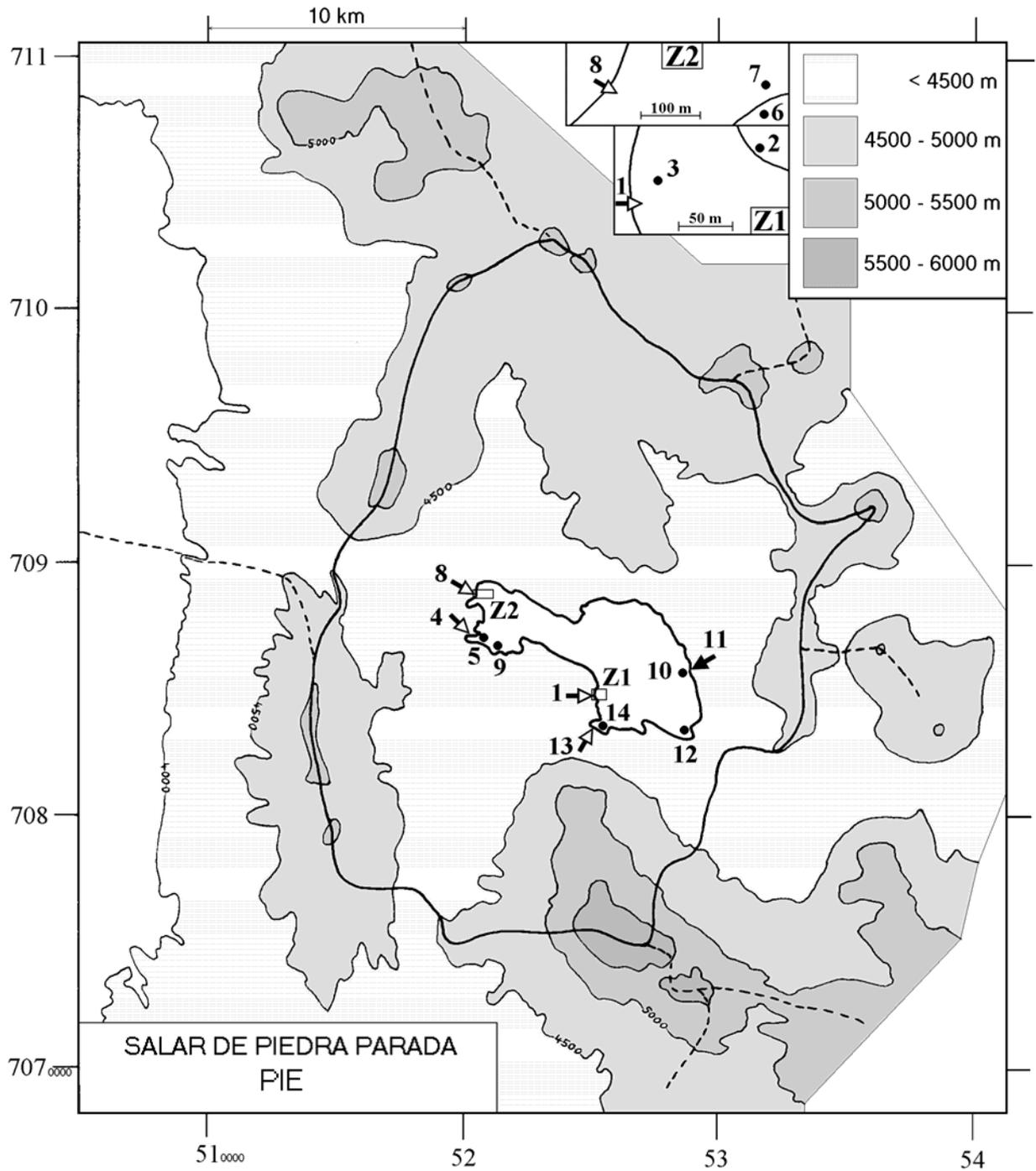
Las aguas de lagunas al este del salar (PIE-2, 14, 12, 10) provienen de la evaporación de aportes vecinos (PIE-1, 13, 11) con coeficientes de desviación mínimos. Al contrario, ninguna de las lagunas del oeste del salar (PIE-6, 5, 9) tiene relación con las vertientes que parecen alimentarlas (PIE-4 y 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.

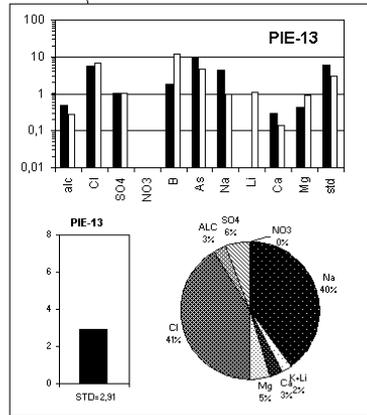
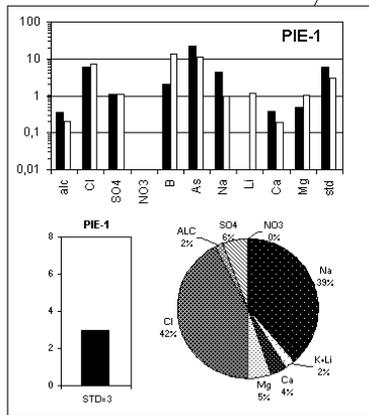
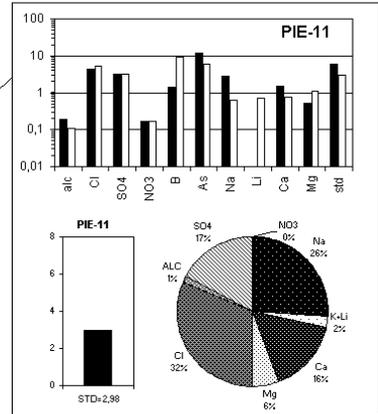
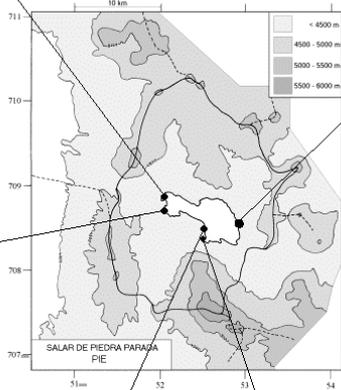
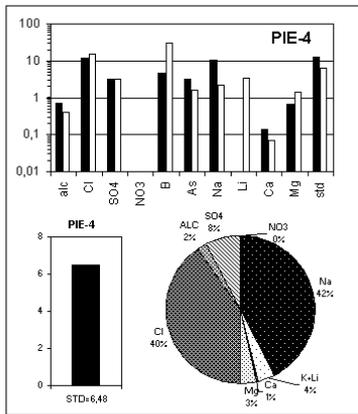
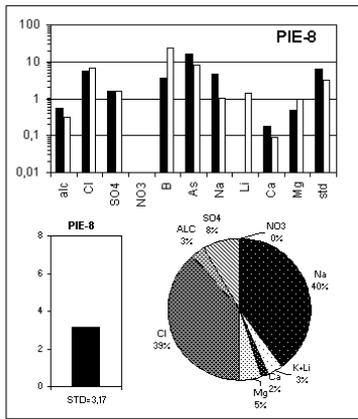
NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF.%	NUMERO	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
PIE-1	3000	121	0,48	5,3	49,46	49,40	0,1	PIE-1	-7,14	-67
PIE-2	22626	156	8,82	1,1	386,7	386,5	0,05	PIE-2	na	na
PIE-3	6793	143	13,4	0,35	114,8	112,9	1,7	PIE-3	na	na
PIE-4	6483	246	0,36	26	104,7	104,7	0,02	PIE-4	-6,10	-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

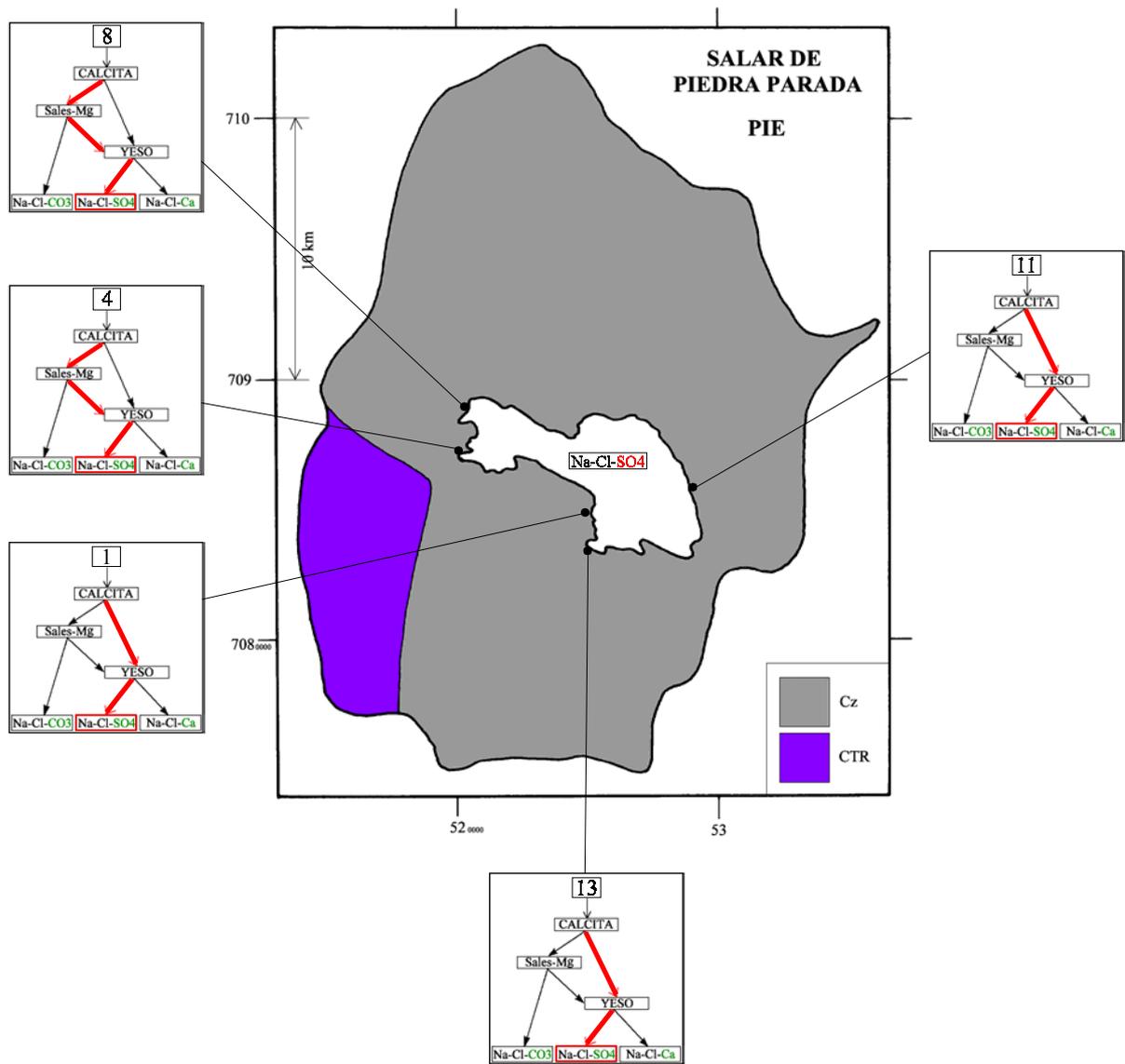


MAPA GEOLOGICO Y VIAS EVOLUTIVAS

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).

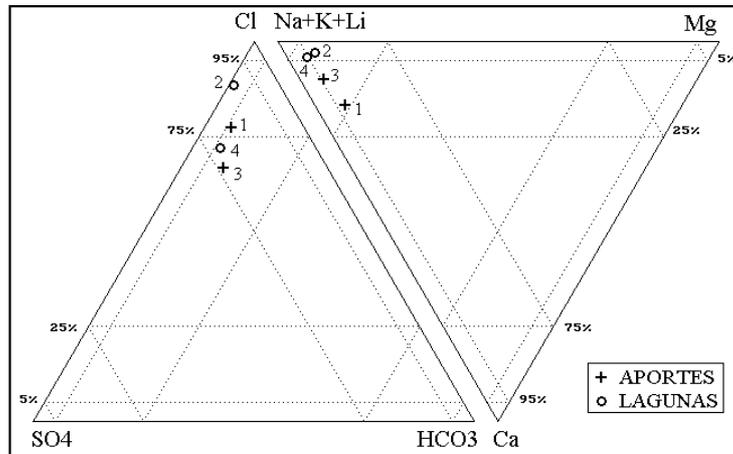


Fig.1: Composición de aguas y salmueras de las lagunas Bravas.

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)

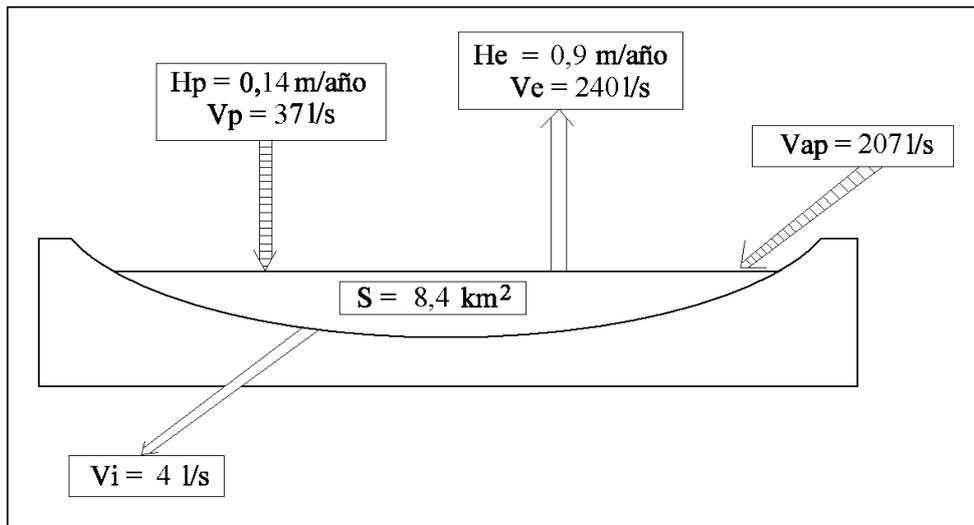


Fig.2 : Balance hídrico de la laguna Brava sur.

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:

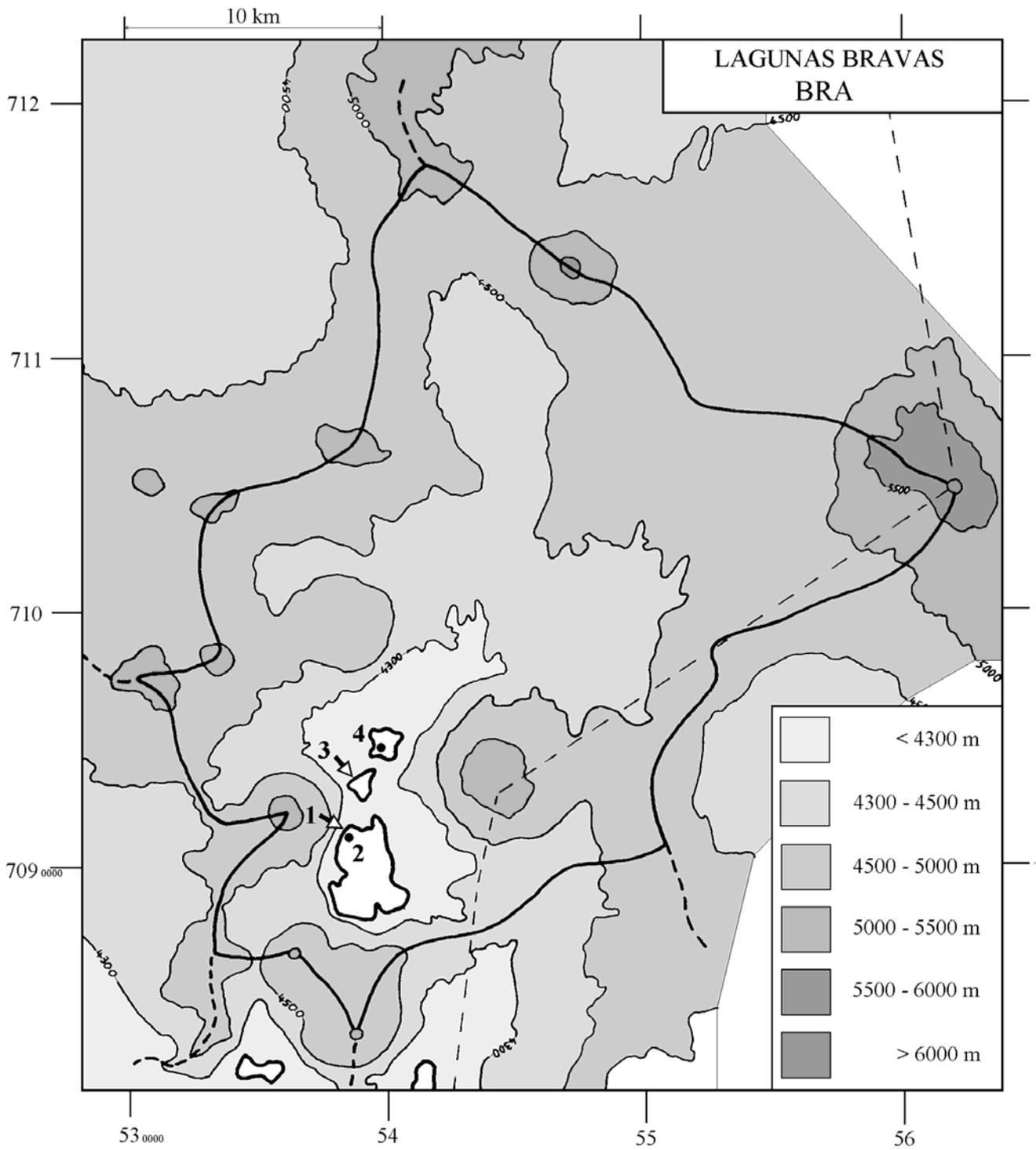
Volumen de aporte : $V_{ap} = S(H_e - H_p) = 770\,000 \text{ m}^3/\text{año} = 24 \text{ l/s}$

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		ALTURA	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE	METROS	
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

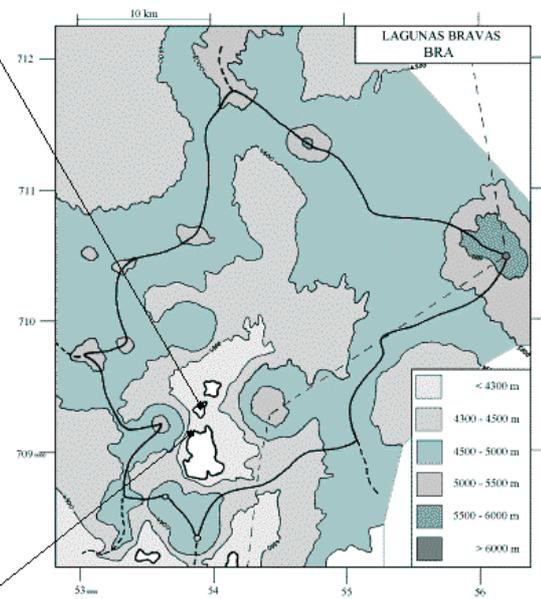
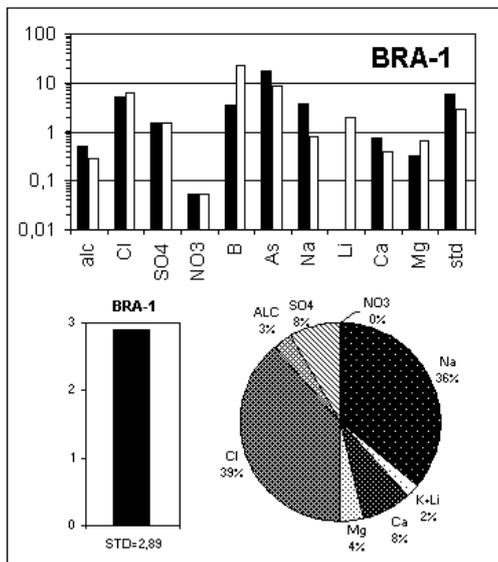
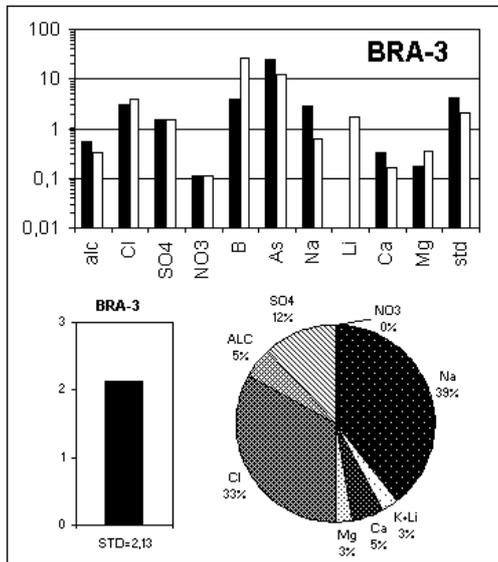
NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
BRA-1	2800	16,2	6,2	1,002	8,25	2,91	1270	1,24	0,0735	368	2,33	17,6	40,6	0,891	754	51,2	4,87	153	39,4
BRA-2	97000	11,9	4,9	1,085	8,25	23,8	64300	63,4	0,532	10200	12,5	549	37,2	24,5	39600	2300	231	1160	1740
BRA-3	1920	16,5	6,2	1,001	8,85	3,20	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 %

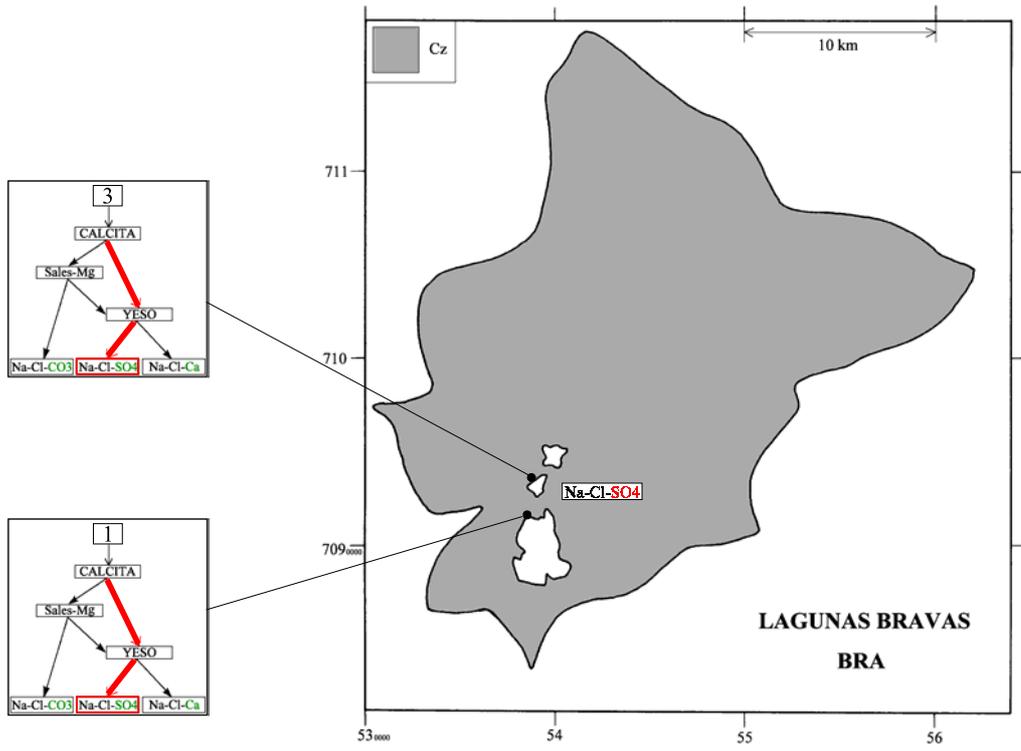
Análisis de oxígeno-18
 y deuterio



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.

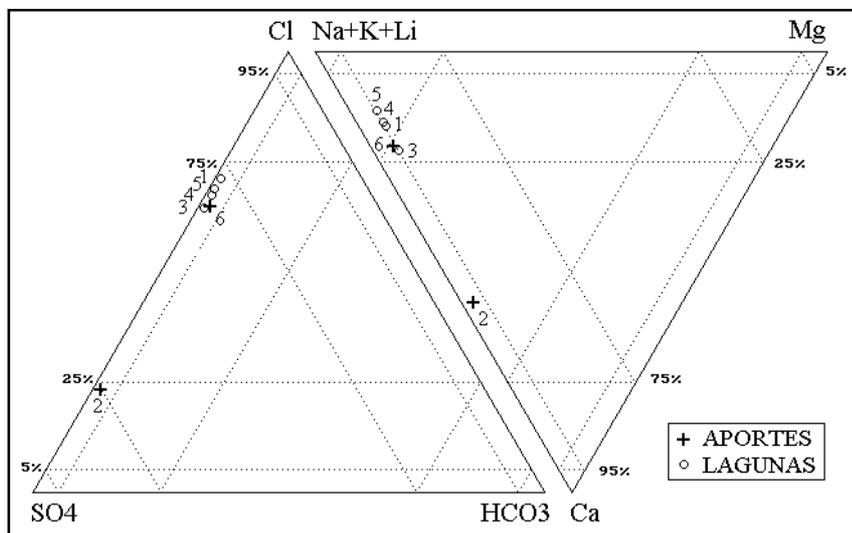


Fig.1: Composición de aguas y salmueras de las lagunas del Jilguero.

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

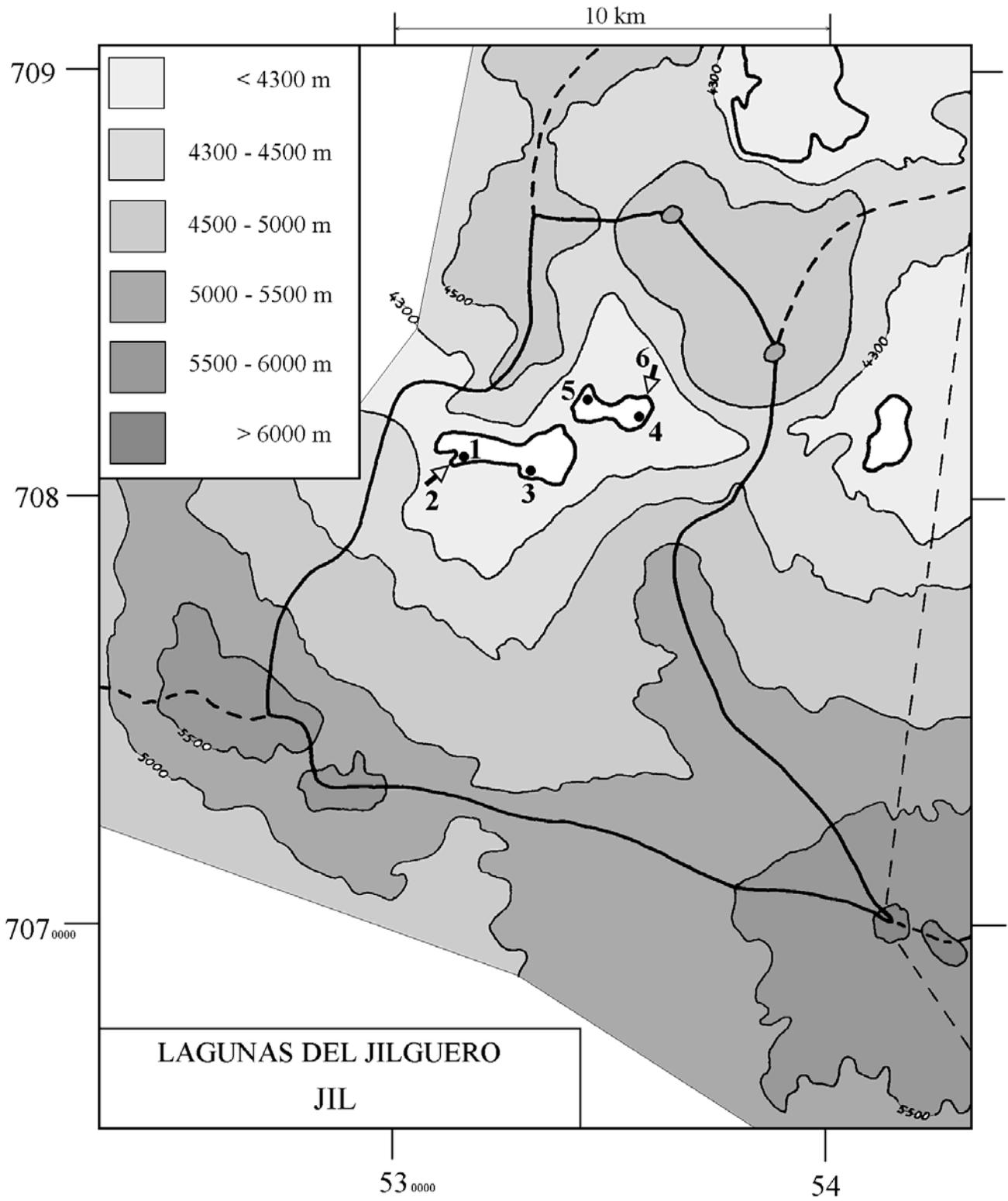
Volumen de aporte a la laguna este: $V_{ap} = S(H_e - H_p) = 430\ 000$ m³/año ~ 14 l/s

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.

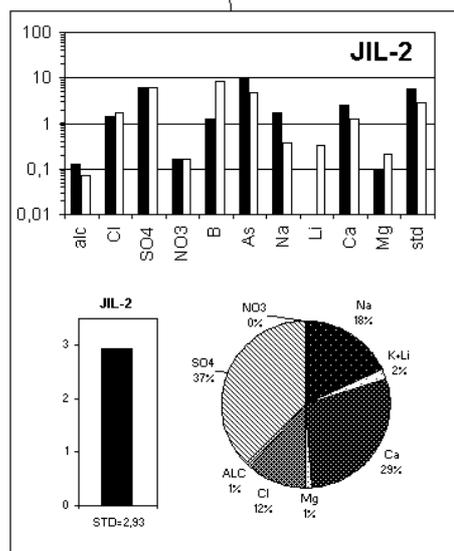
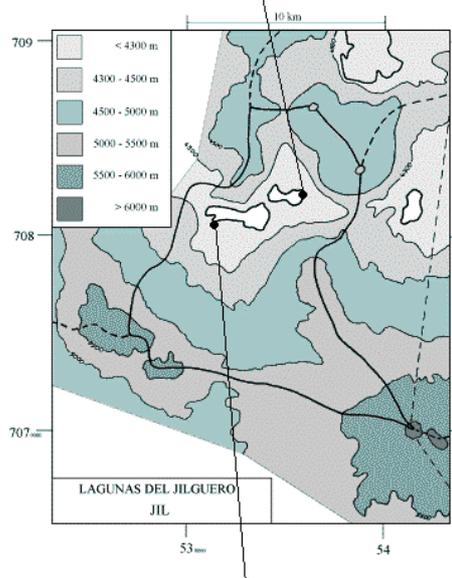
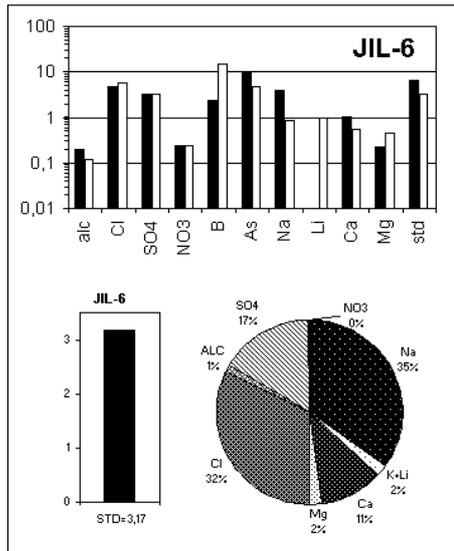
NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF.%	NUMERO	δ ¹⁸ O	δ ² H
JIL-1	15463	81,7	6,12	0,39	247,3	248,3	0,4	JIL-1	na	na
JIL-2	2925	34,2	1,56	0,25	42,66	43,16	1,2	JIL-2	-8,42	-73
JIL-3	11243	76,3	6,06	0,34	176,8	178,5	1,0	JIL-3	na	na
JIL-4	11488	85,4	5,76	0,42	183,7	182,5	0,7	JIL-4	na	na
JIL-5	19592	117	8,10	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 %

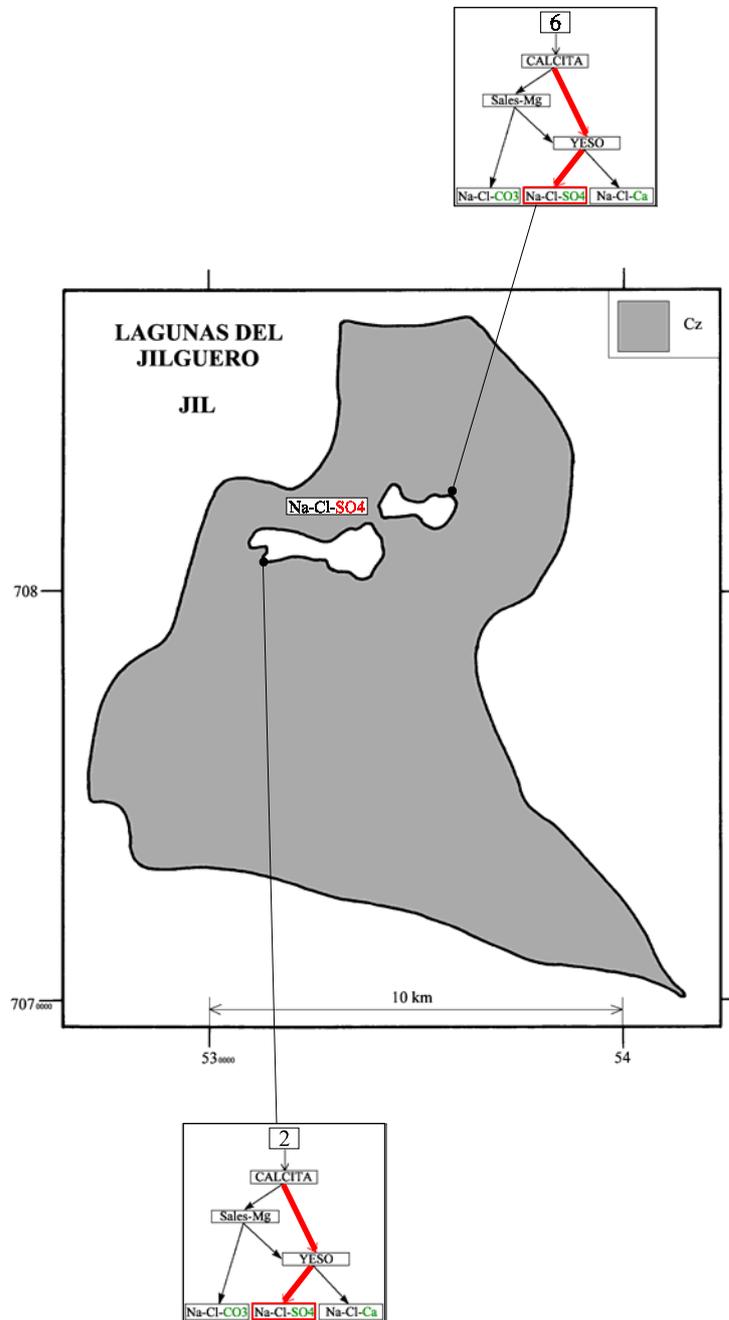
Análisis de oxígeno-18
y deuterio



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)	SO ₄ -Cl	SO ₄ (N)
LAGUNA : BAY-1	4785	Na-Ca	SO ₄ -Cl	SO ₄

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.

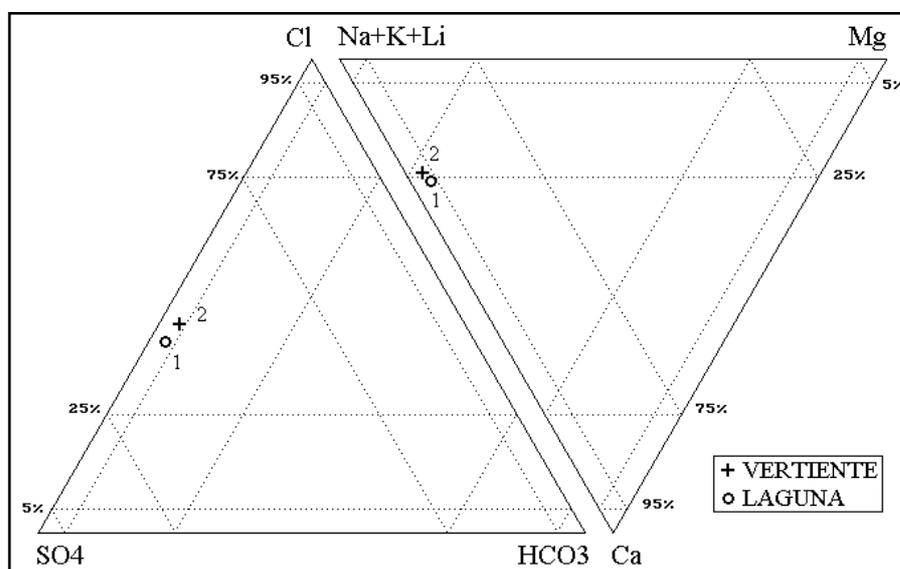


Fig.1 : Composición de aguas de la laguna del Bayo

Origen de los componentes disueltos

Se puede hacer dos observaciones:

- no existe ninguna relación equimolar entre los cuatro componentes mayores : Na, Ca, Cl y SO_4 (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 SO_4 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 :

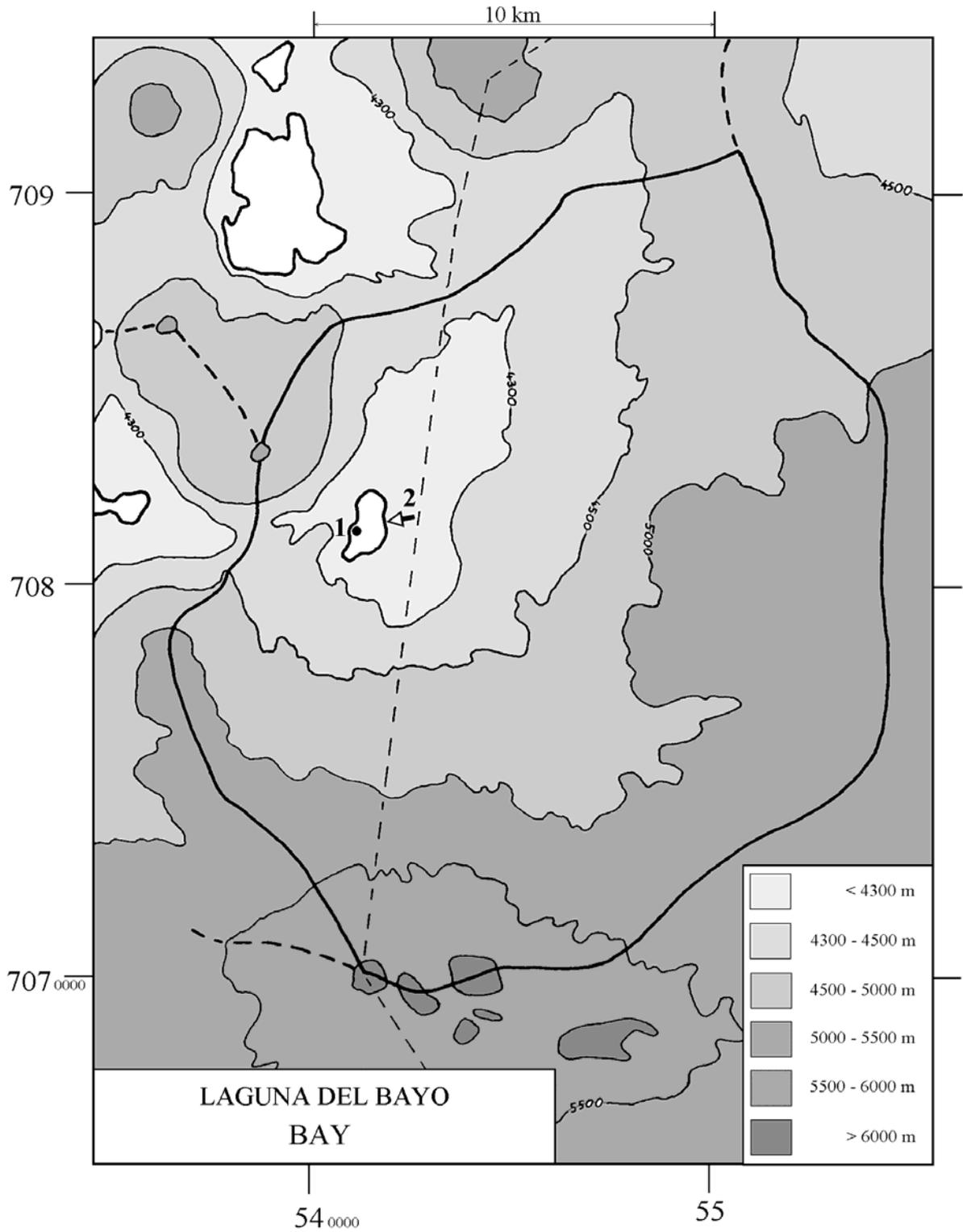
$$V_{ap} = S(H_e - H_p) = 1\,000\,000 \text{ m}^3/\text{año} = 33 \text{ l/s}$$

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

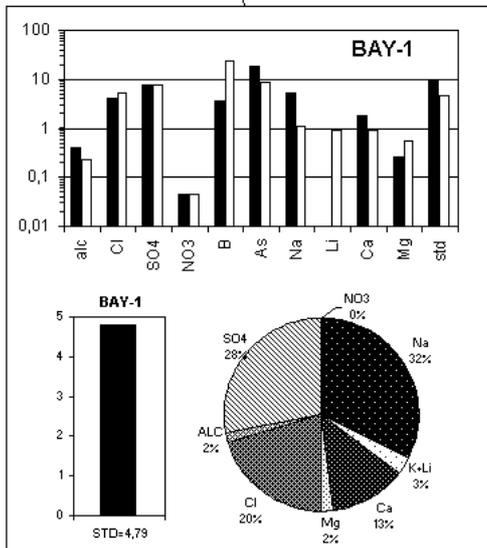
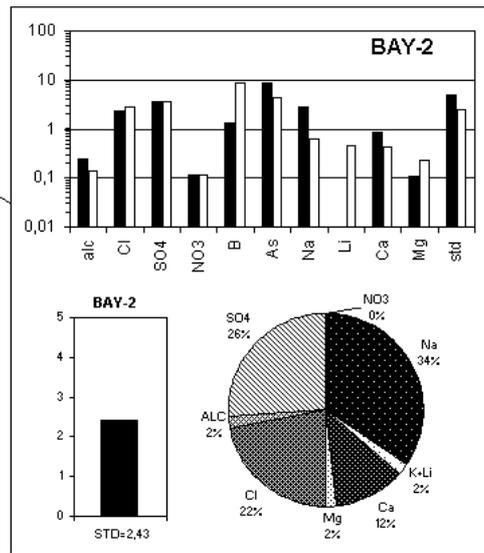
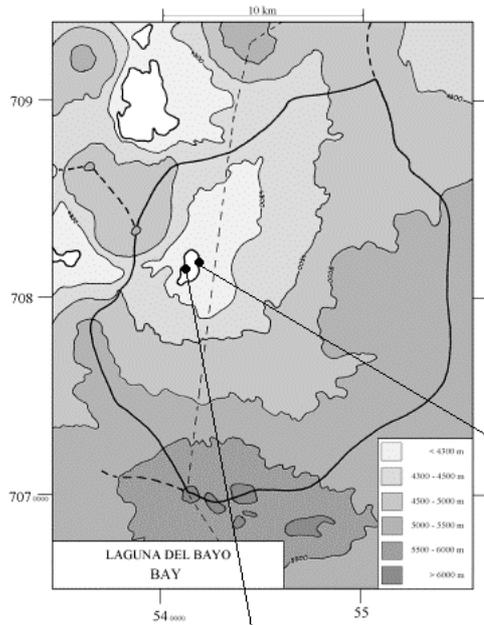
NUMERO	CEL	T	O2	DS	PH	ALC	CL	Br	I	SO4	NO3	B	SI	AS	NA	K	LI	CA	MG
BAY-1	6160	13	6,5	1,004	8,55	2,27	1030	1,81	0,092	1960	2,01	18,4	45,6	0,899	1040	149	2,24	365	33,0
BAY-2	2100	17,5	6,1	1,002	8,63	1,42	564	0,567	0,055	912	5,20	6,50	50,4	0,432	566	48,5	1,13	173	13,6

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 %

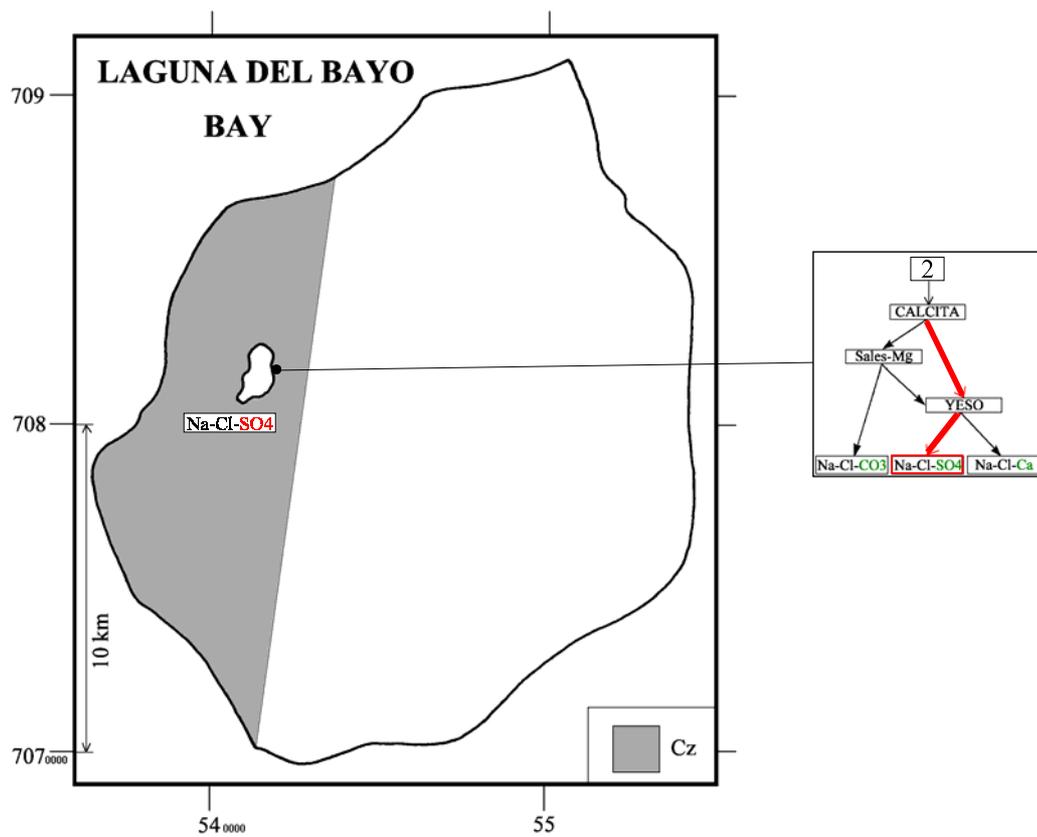
Análisis de oxígeno-18
 y deuterio



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 fluuyente 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.

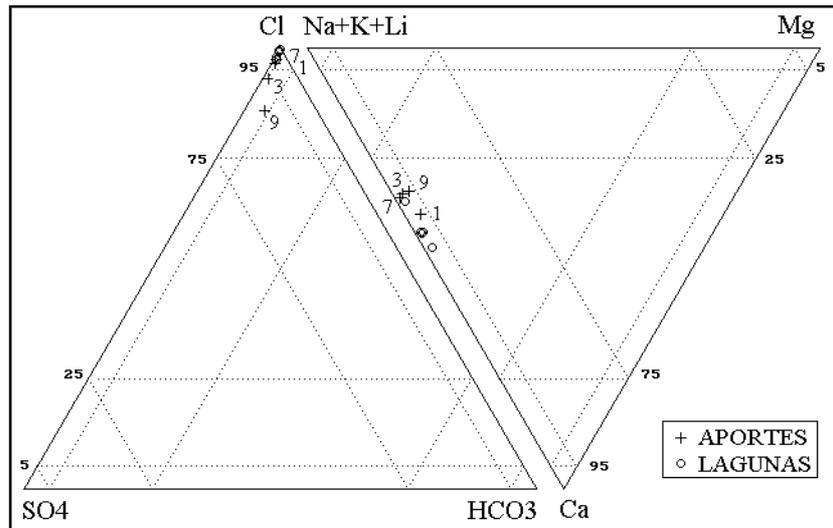


Fig.1: Composición de aguas y salmueras del salar de Wheelwright

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.

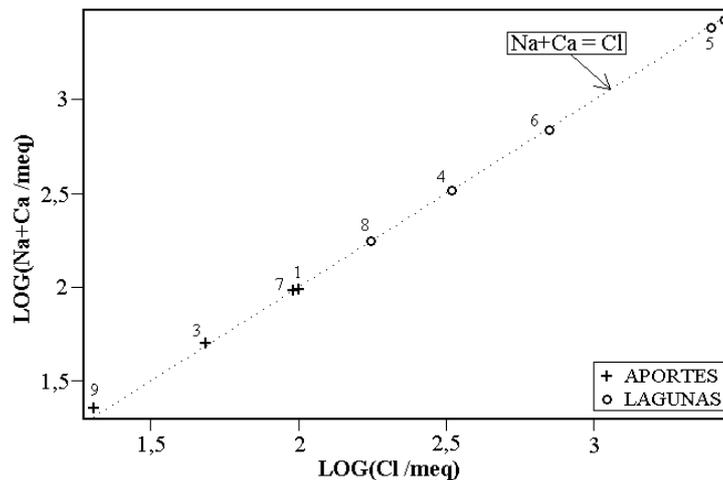


Fig.2 : Relación entre Na+Ca y Cl en aguas del salar de Wheelwright

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

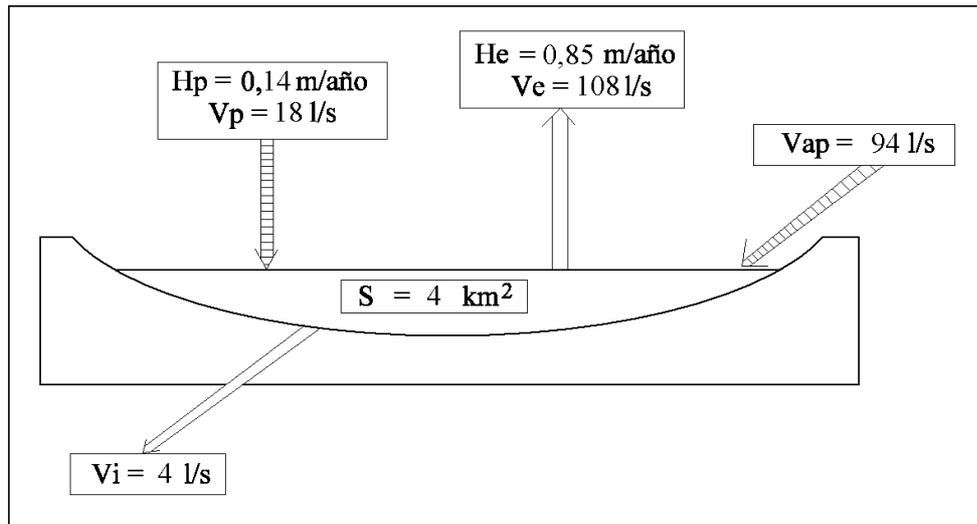
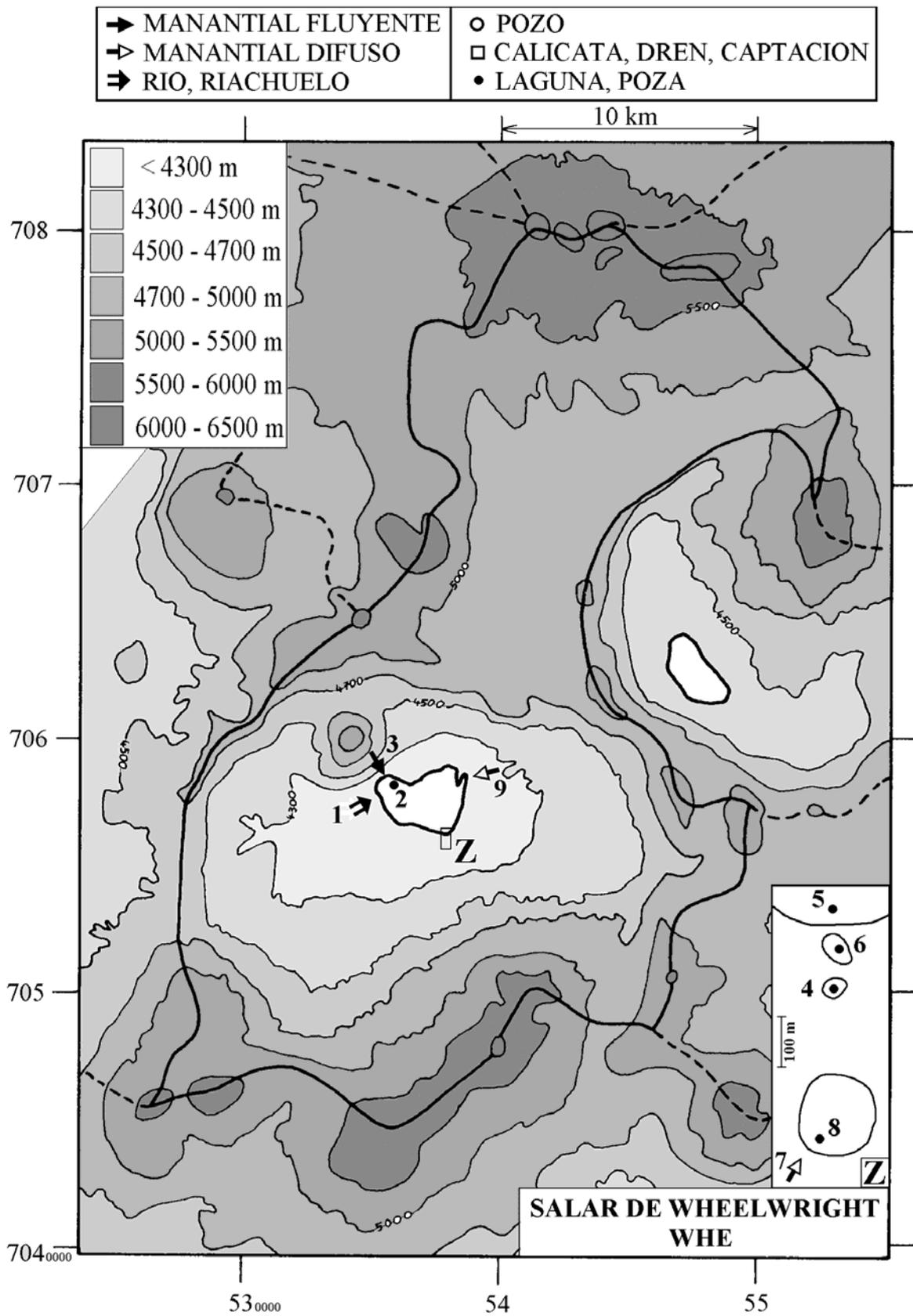


Fig.3 : Balance hídrico del sistema lagunar del salar de Wheelwright.

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

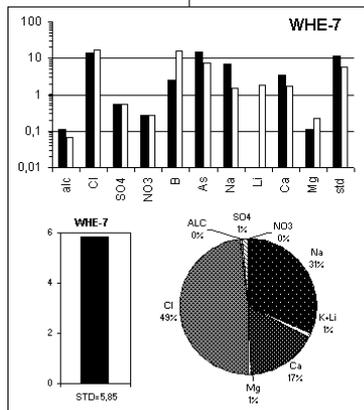
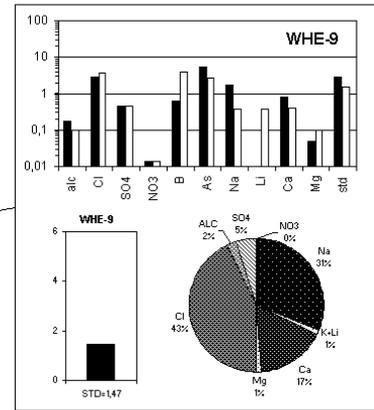
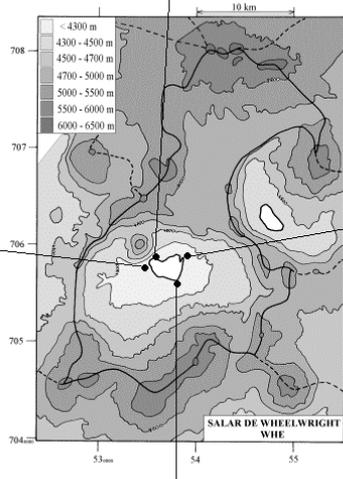
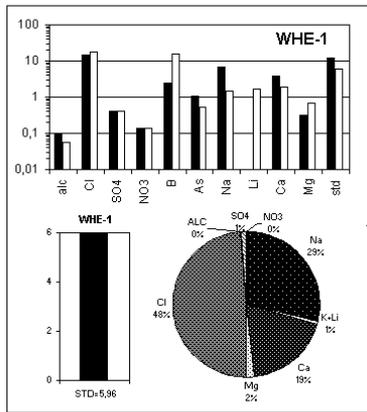
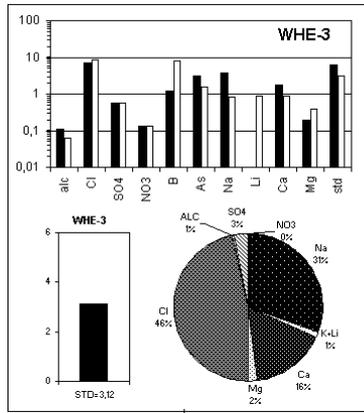
T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l.

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.

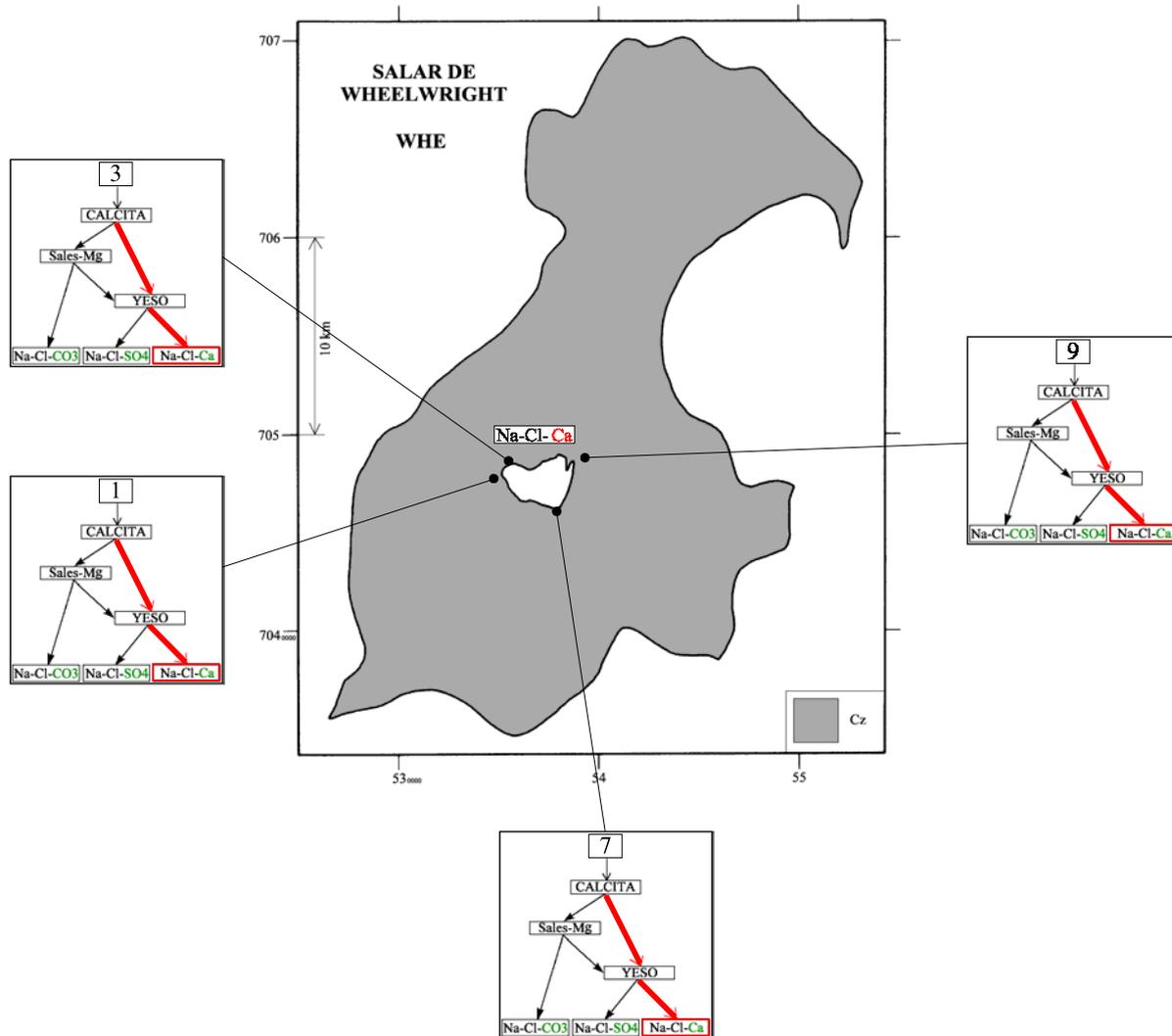
S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l); DIF.% = diferencia en %



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.

APORTES	SALINIDAD mg/l	TIPO QUÍMICO		VIA EVOLUTIVA
		Cationes	Aniones	
ESC-3	2323	Na-Mg-(Ca)	/ Cl-SO ₄ -(HCO ₃)	SO ₄ (N)
ESC-4	3165	Na-(Mg)-(Ca)	/ Cl-SO ₄	SO ₄ (N)
LAGUNAS				
ESC-1	3956	Na-(Mg)-(Ca)	/ Cl-SO ₄	SO ₄
ESC-6	6521	Na-Mg-(Ca)	/ Cl-SO ₄	SO ₄
ESC-2	18406	Na-Mg-(Ca)	/ Cl-SO ₄	SO ₄
ESC-5	32321	Na-(Mg)-(Ca)	/ Cl-SO ₄	SO ₄

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.

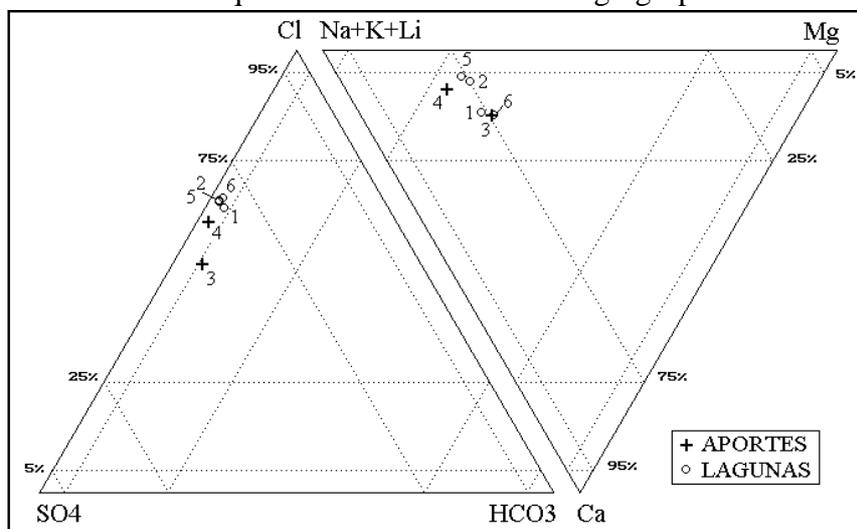


Fig.1: Composición de aguas y salmueras de la laguna Escondida

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.

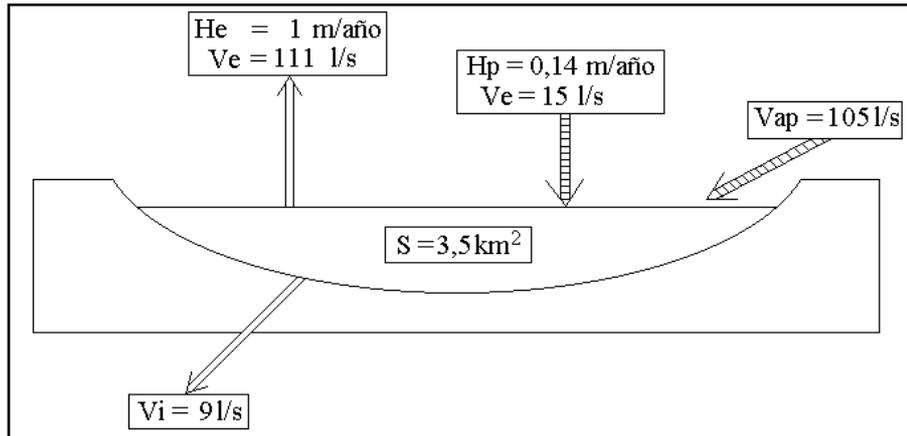
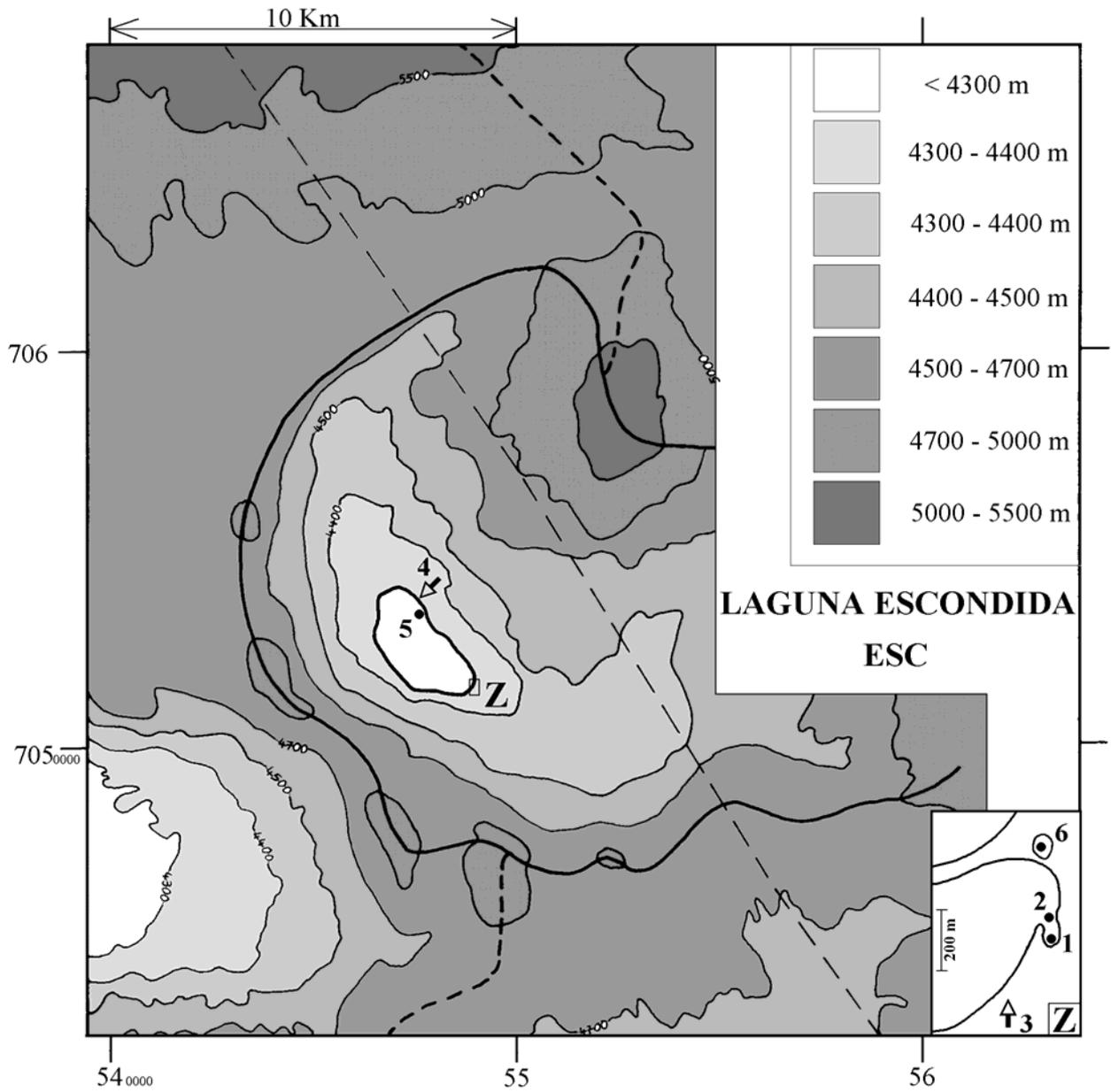


Fig.2 : Balance hídrico de la laguna Escondida.

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**

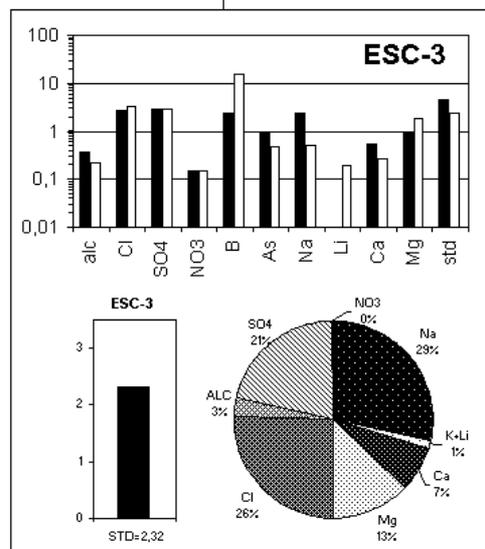
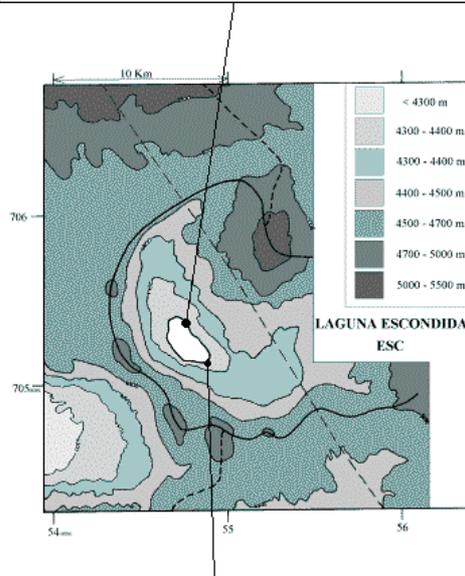
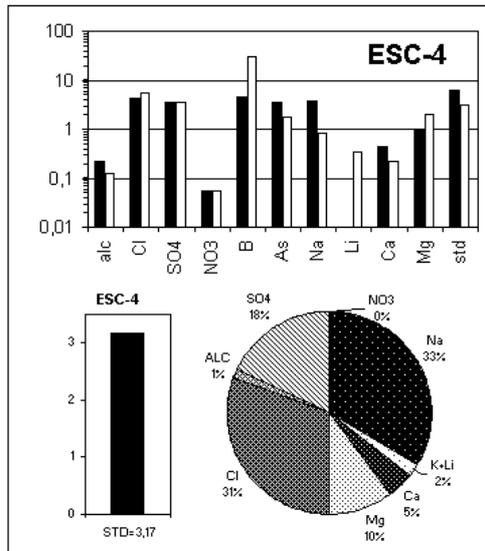
NUMERO	FECHA	HORA	COORDENADAS UTM		ALTURA METROS	TIPO DE MUESTRA
			ESTE	NORTE		
ESC-1	10/12/96	12 ^H 25	548874	7051701	4353	Poza de preconcentración
ESC-2	10/12/96	12 ^H 35	548874	7051726	4353	Laguna pequeña
ESC-3	10/12/96	12 ^H 45	548721	7051491	4354	Manantial difuso
ESC-4	10/12/96	13 ^H 50	547558	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			

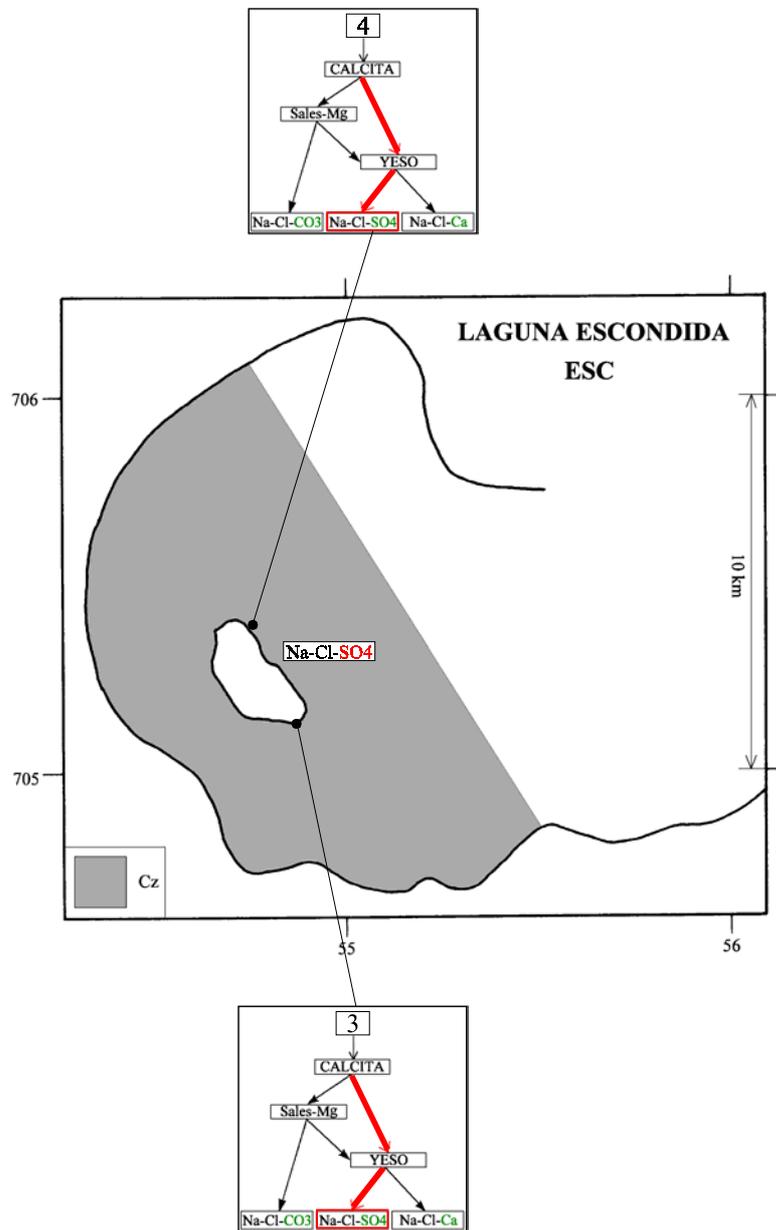
Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.
S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l); DIF.% = diferencia en %



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.

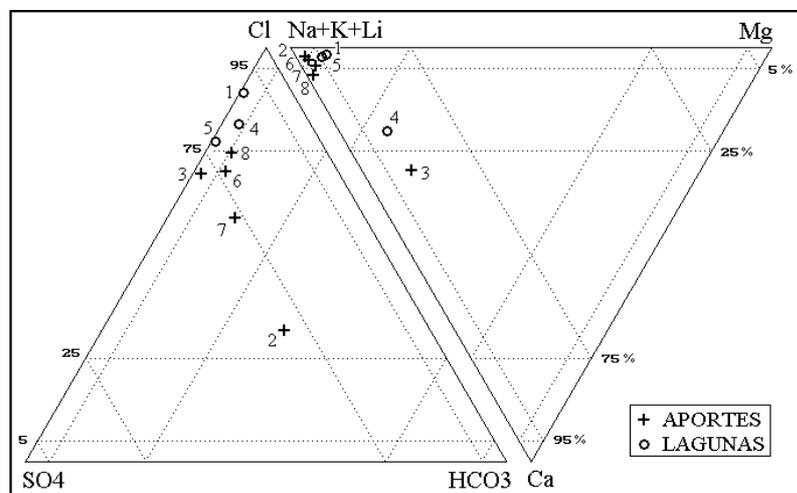


Fig.1: Composición de aguas y salmueras de Laguna Verde.

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.

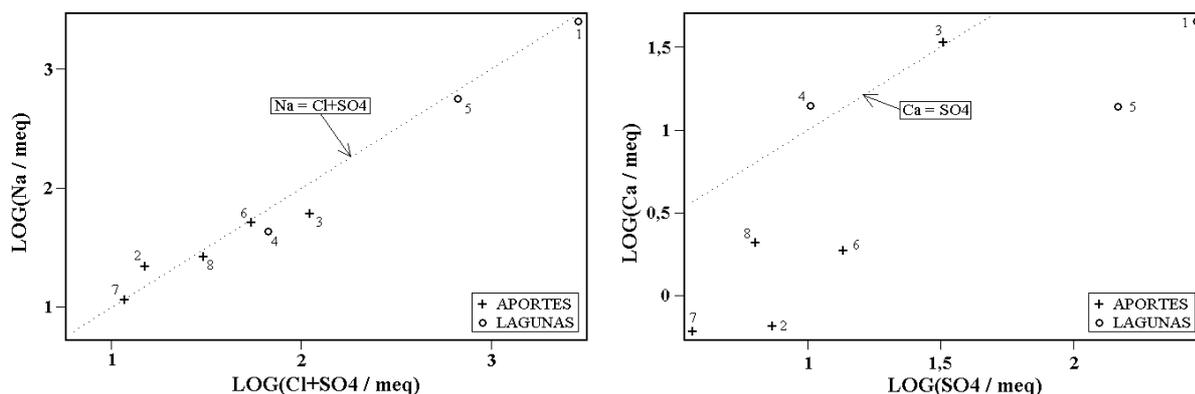


Fig.2 : Relaciones Na versus Cl+SO₄ y Ca versus SO₄ en aguas de Laguna Verde.

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 Na = Cl+SO₄. La suma en mg/l de los tres componentes Na+Cl+SO₄ 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 Na = Cl+SO₄+HCO₃ 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.

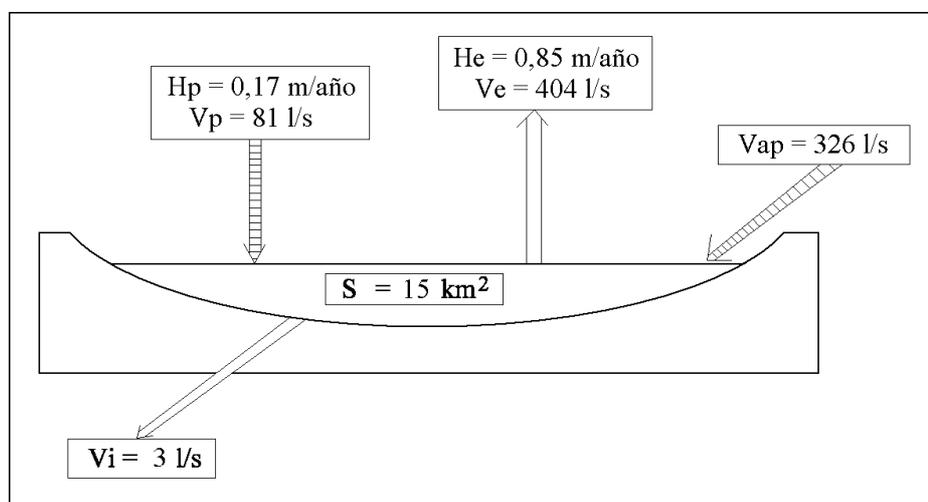
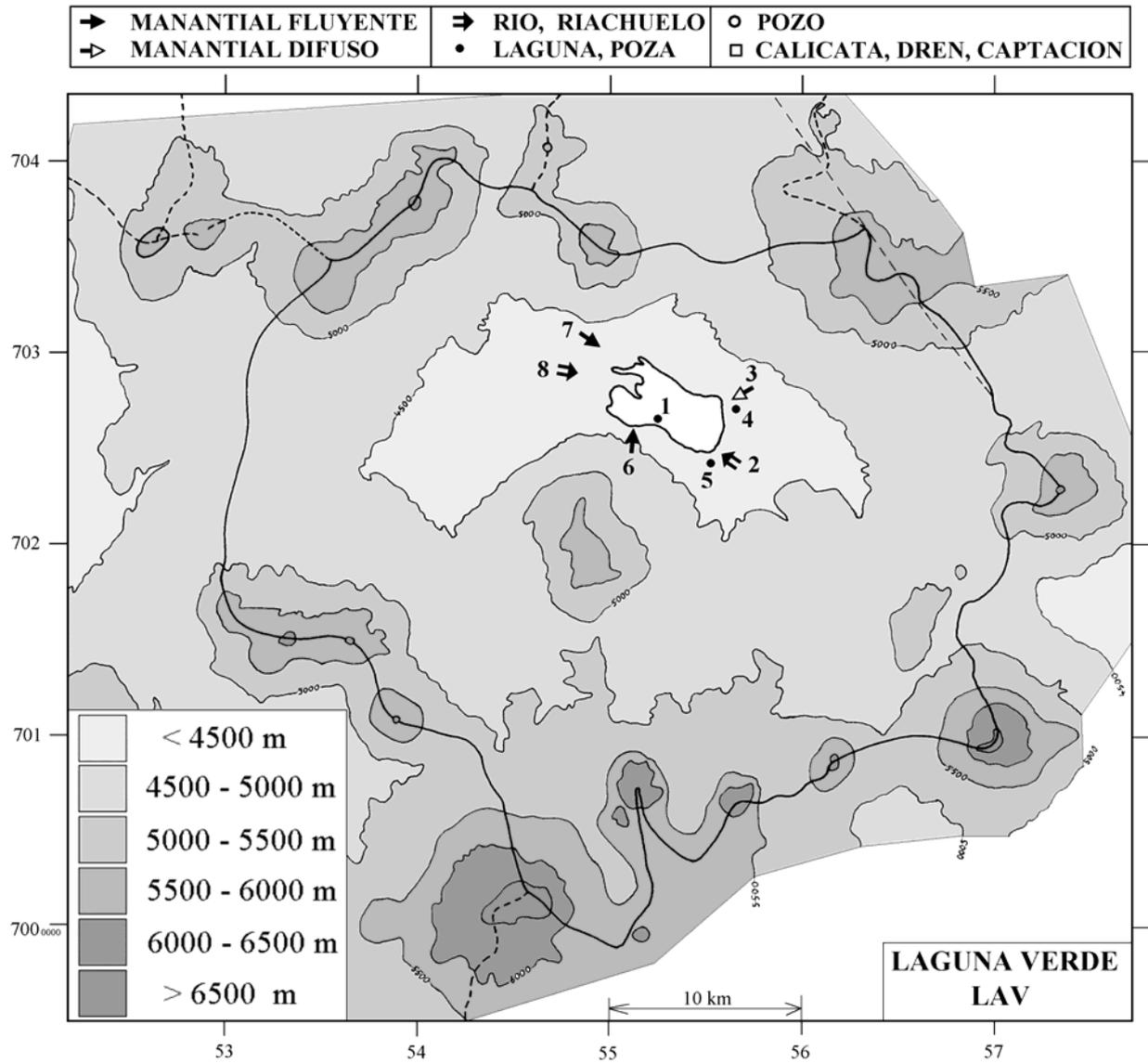


Fig.3 : Balance hídrico de Laguna Verde.

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

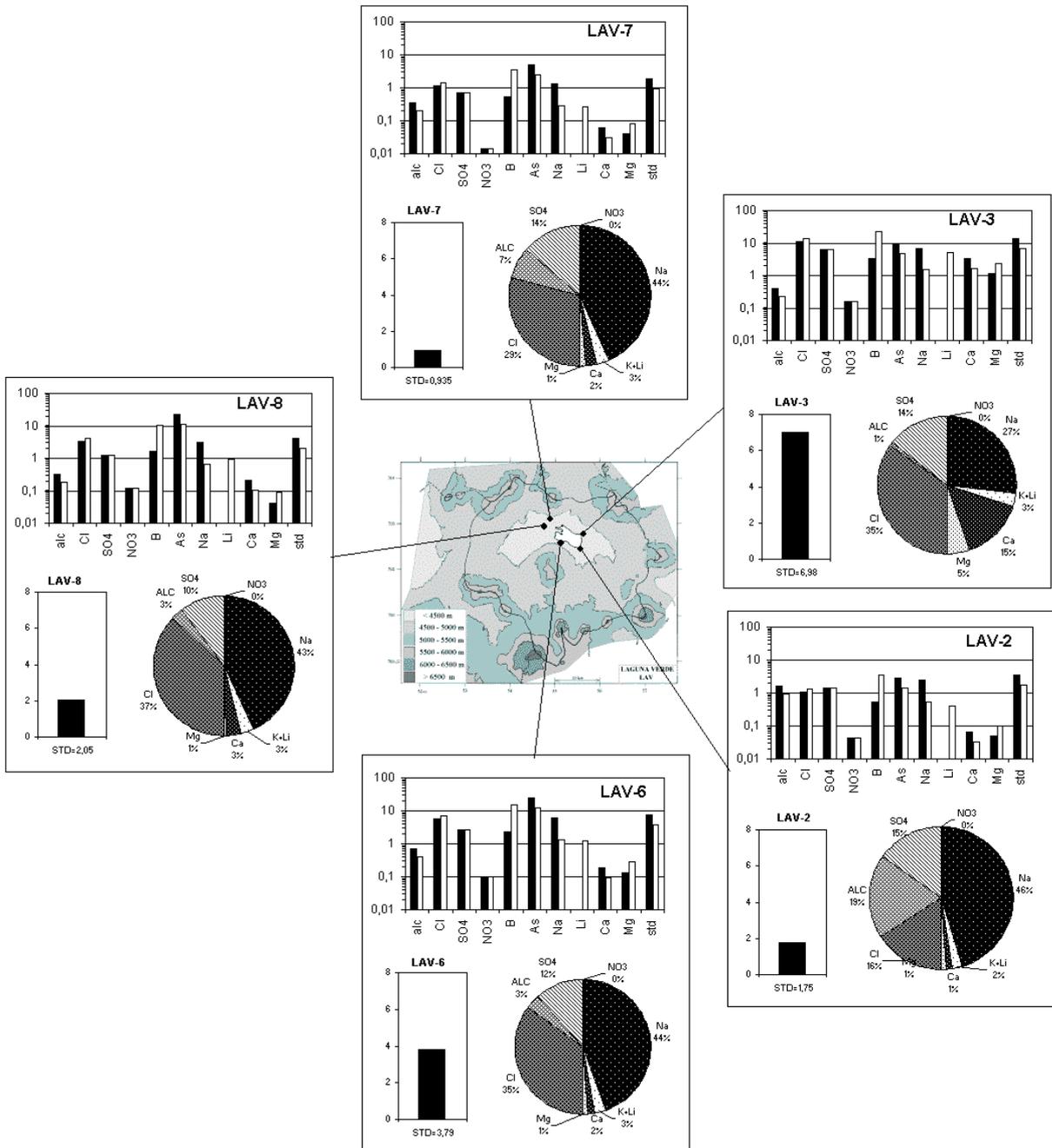
T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l.

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.

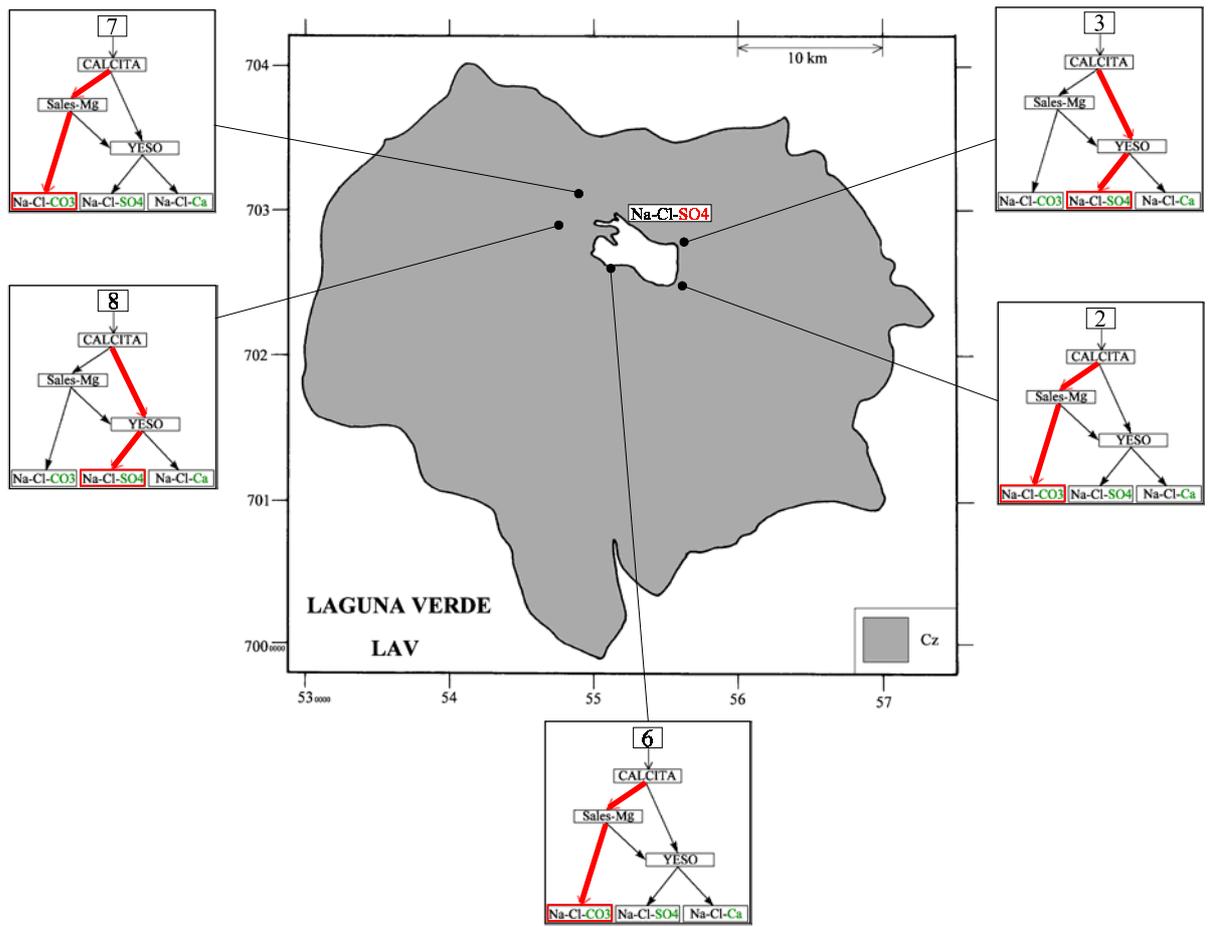
S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l); DIF.% = diferencia en %



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.

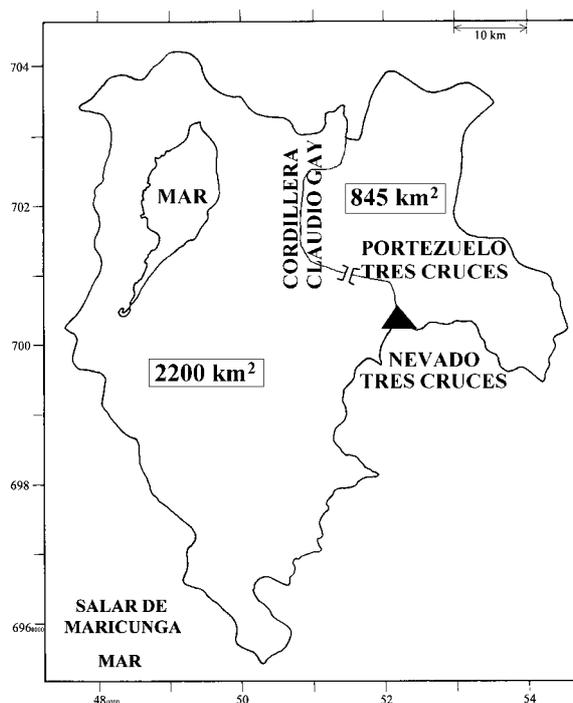


Fig.1 : Salar de Maricunga con la sub-cuenca oriental

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 ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$) con pequeñas lagunas generalmente adyacentes a la orilla. Contiene un yacimiento de borato (ulexita : $\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$). 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.

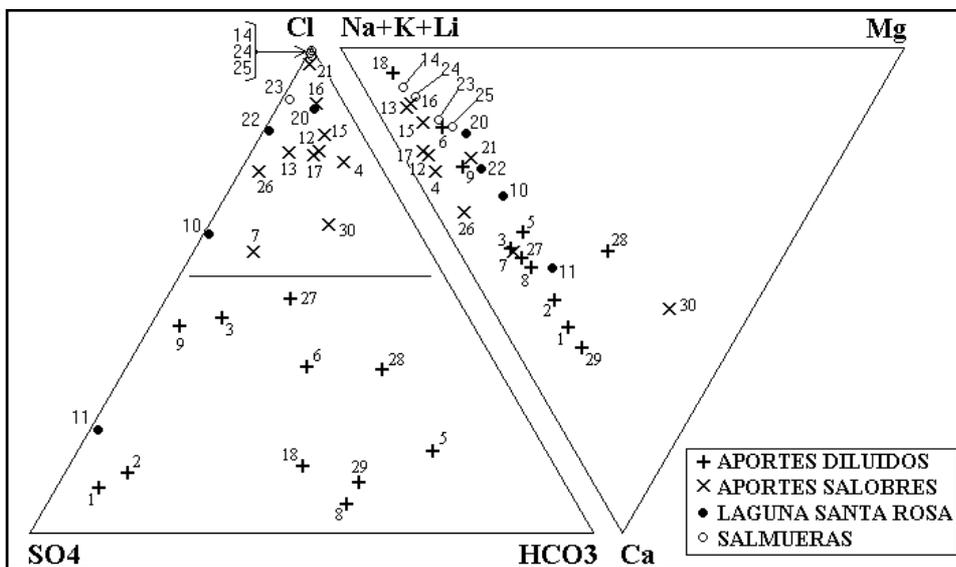


Fig.2 : Composición de las aguas de aporte al salar de Maricunga.

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.

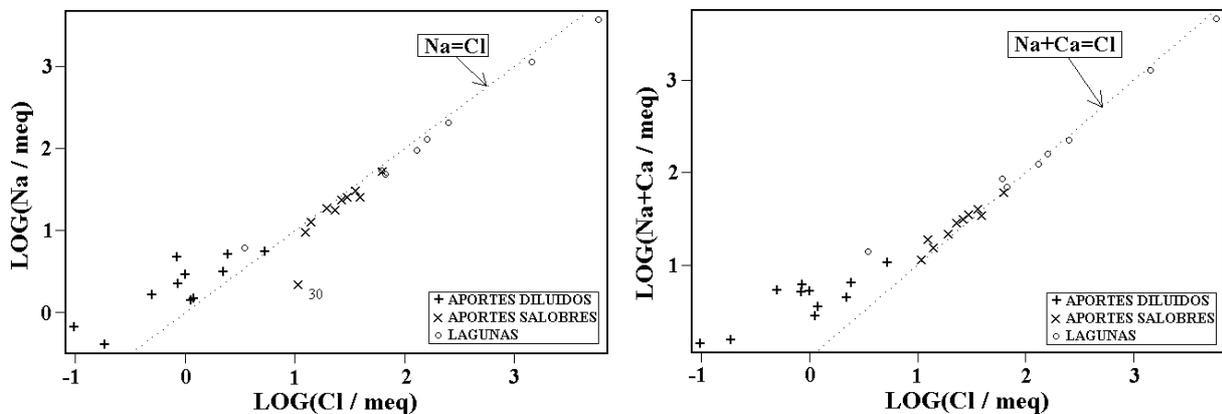


Fig.3 : Relaciones Na versus Cl y Na+Ca versus Cl en las aguas de Maricunga

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 : $V_{ap} = S(H_e - H_p) = 5\ 150\ 000\ m^3/año = 163\ l/s$

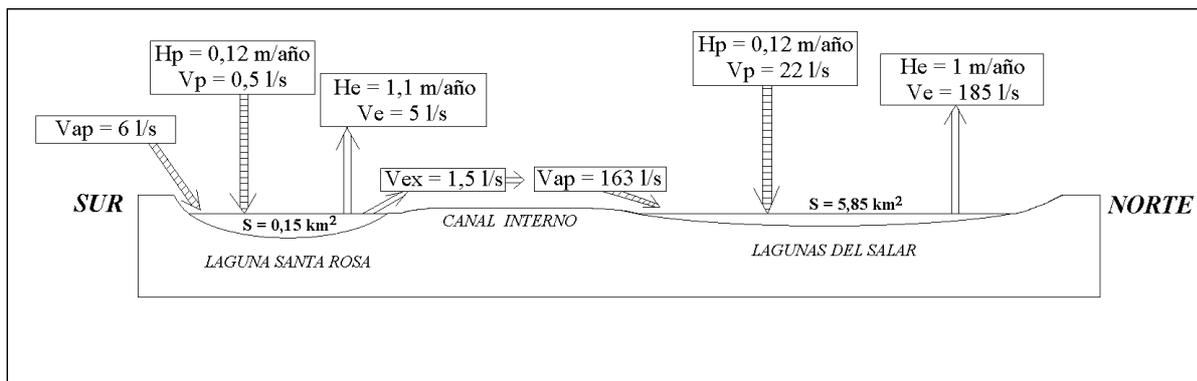


Fig.4 : Balance hídrico de las lagunas del salar de Maricunga

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.

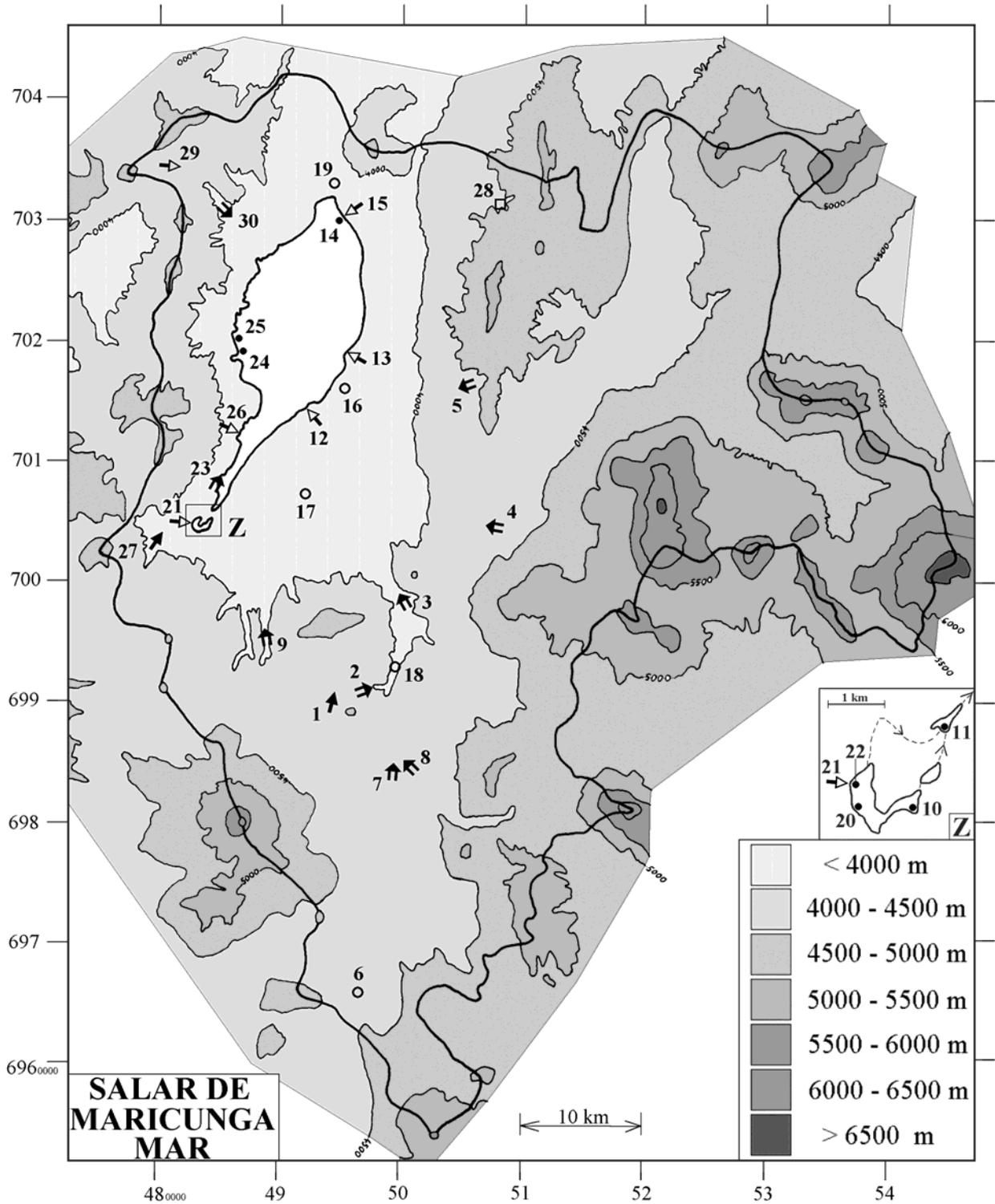
Salmueras del extremo norte del salar parecen provenir de aguas del sur del salar, lo que sugiere un movimiento general de las soluciones hacia el norte, posiblemente debido a un leve basculamiento de la cuenca de sur a norte.

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 Públicas 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

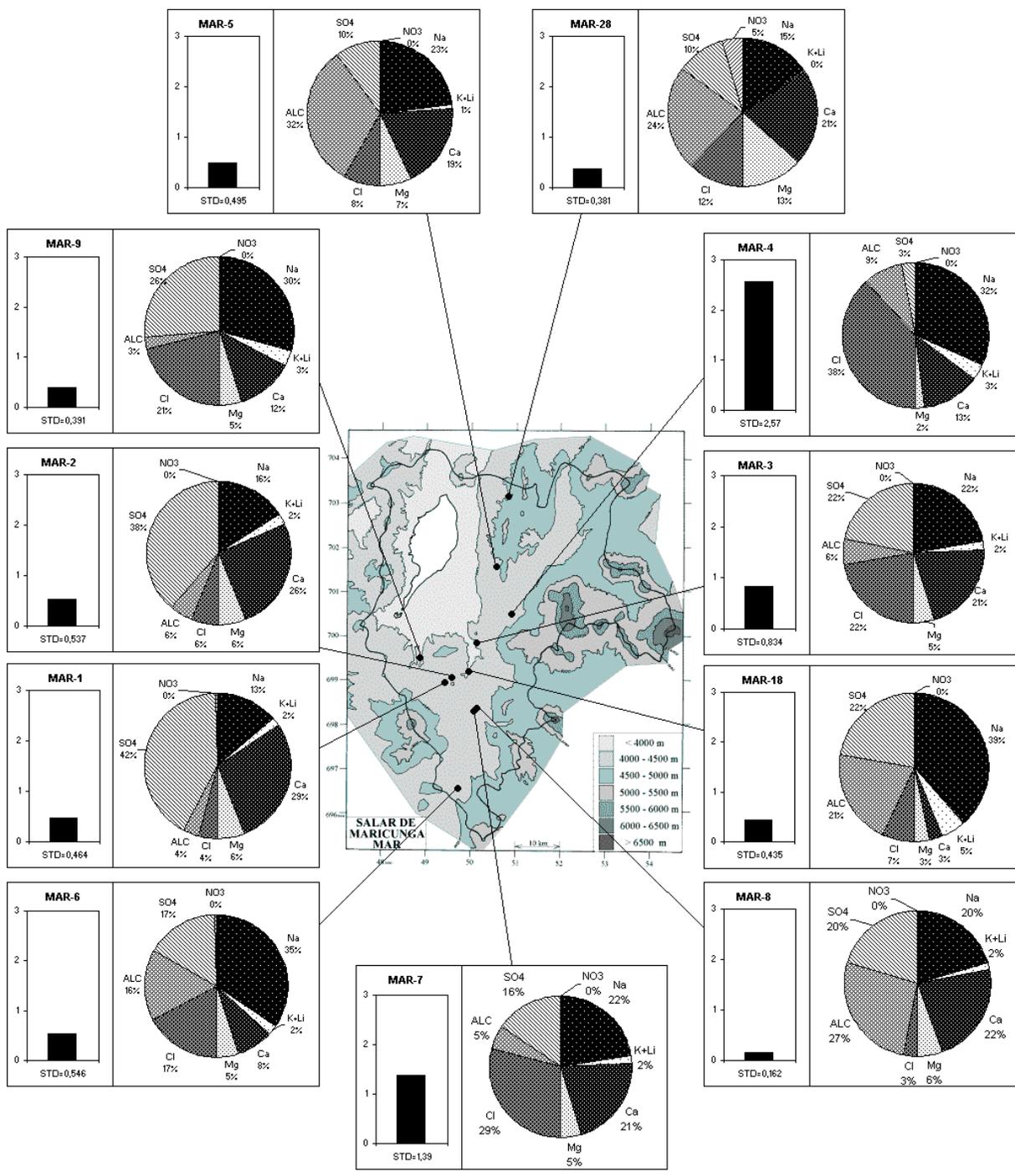
MAR

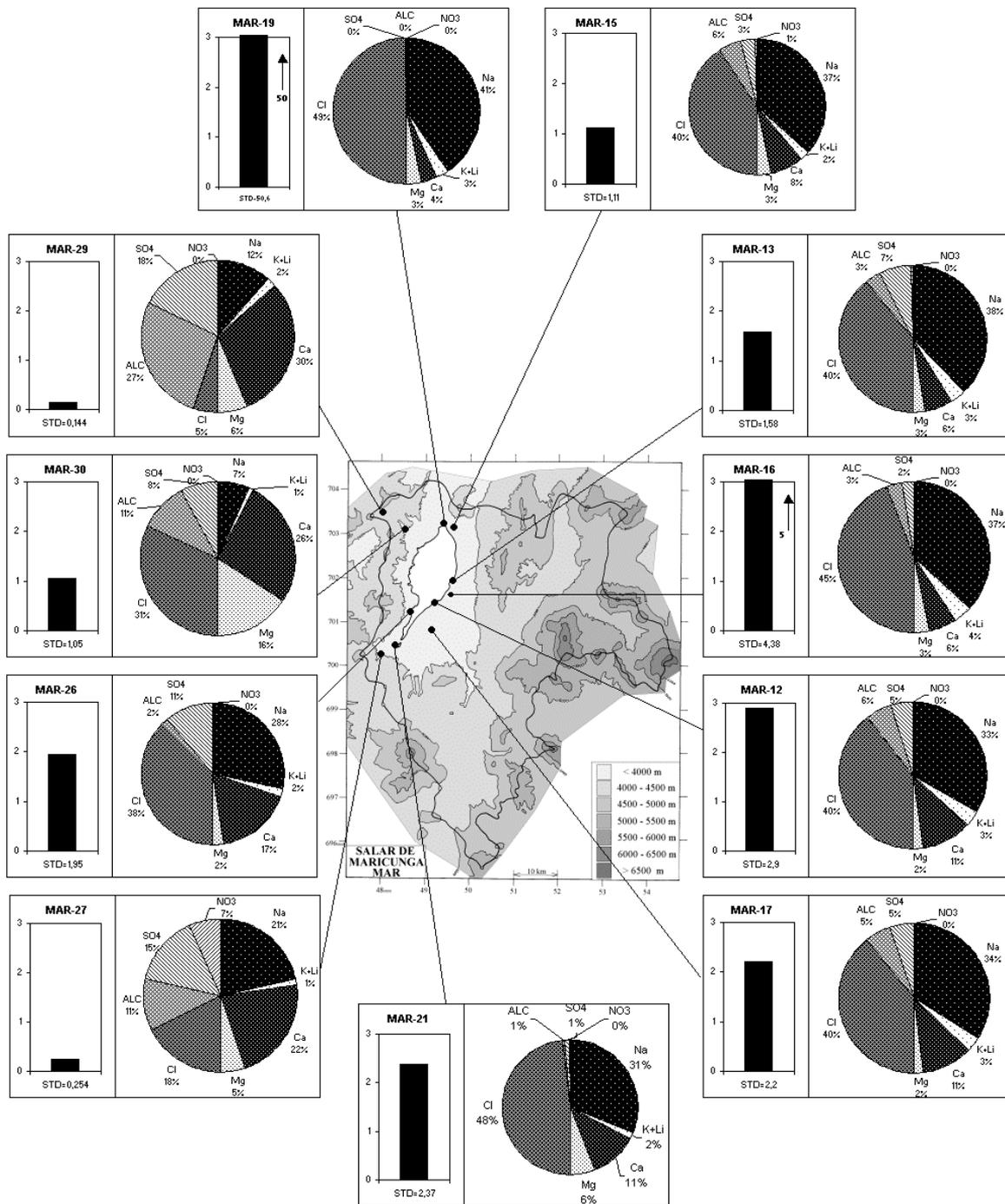
NUMERO	STD	HCO3	CO3	CO2	S(+)	S(-)	DIF.%
MAR-1	463,9	26,8	0,30	0,33	6,264	6,039	3,7
MAR-2	537,3	47,6	0,06	6,6	7,272	6,980	4,1
MAR-3	834,2	84,2	1,68	0,70	12,27	12,00	2,2
MAR-4	2573	404	0,96	44	39,35	38,55	2,1
MAR-5	494,9	225	3,06	2,2	6,206	6,047	2,6
MAR-6	545,7	137	1,50	1,4	7,387	7,216	2,3
MAR-7	1385	127	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

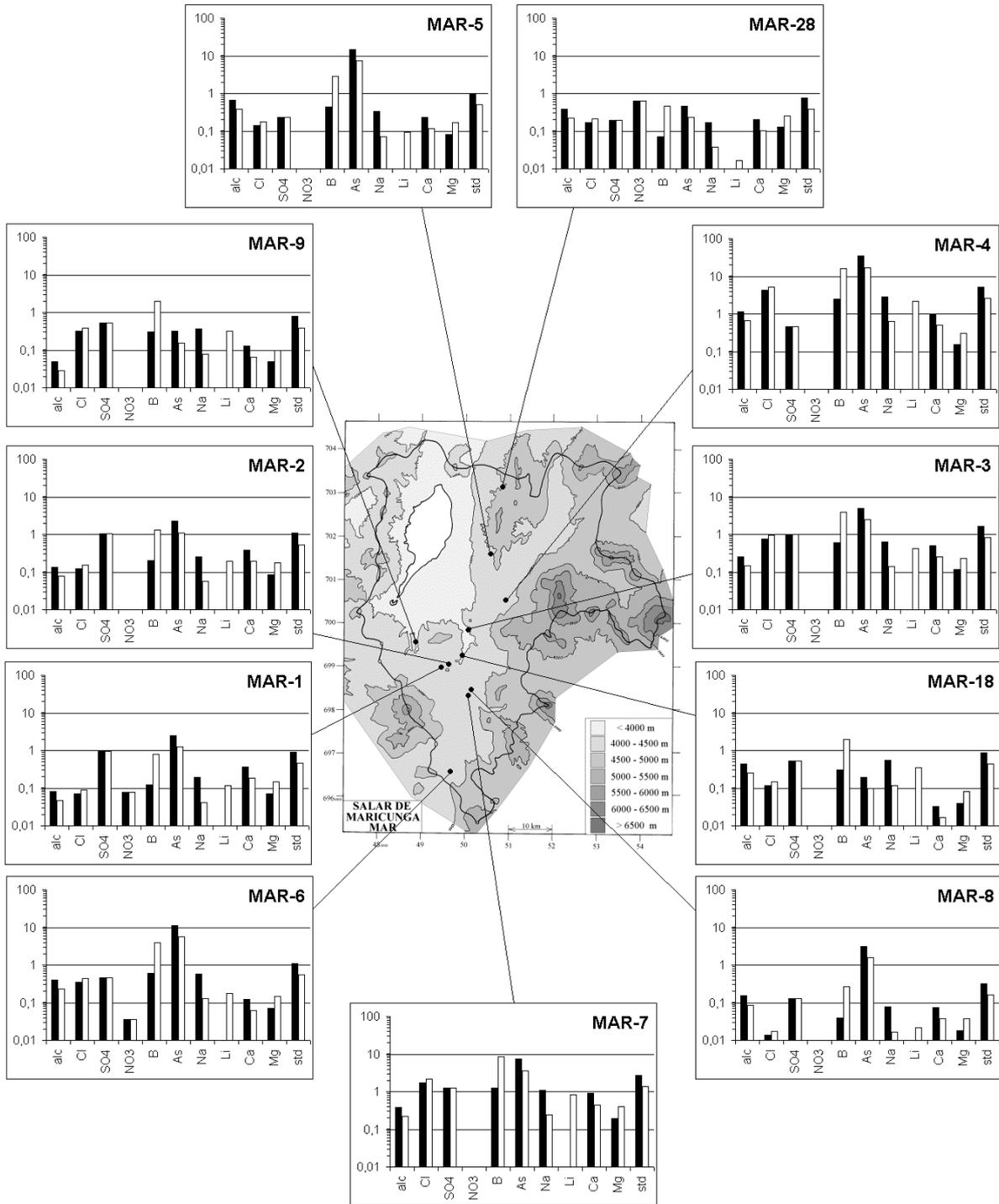
NUMERO	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
MAR-28	-7,84	-62
MAR-29	-8,60	-74
MAR-30	-6,73	-65

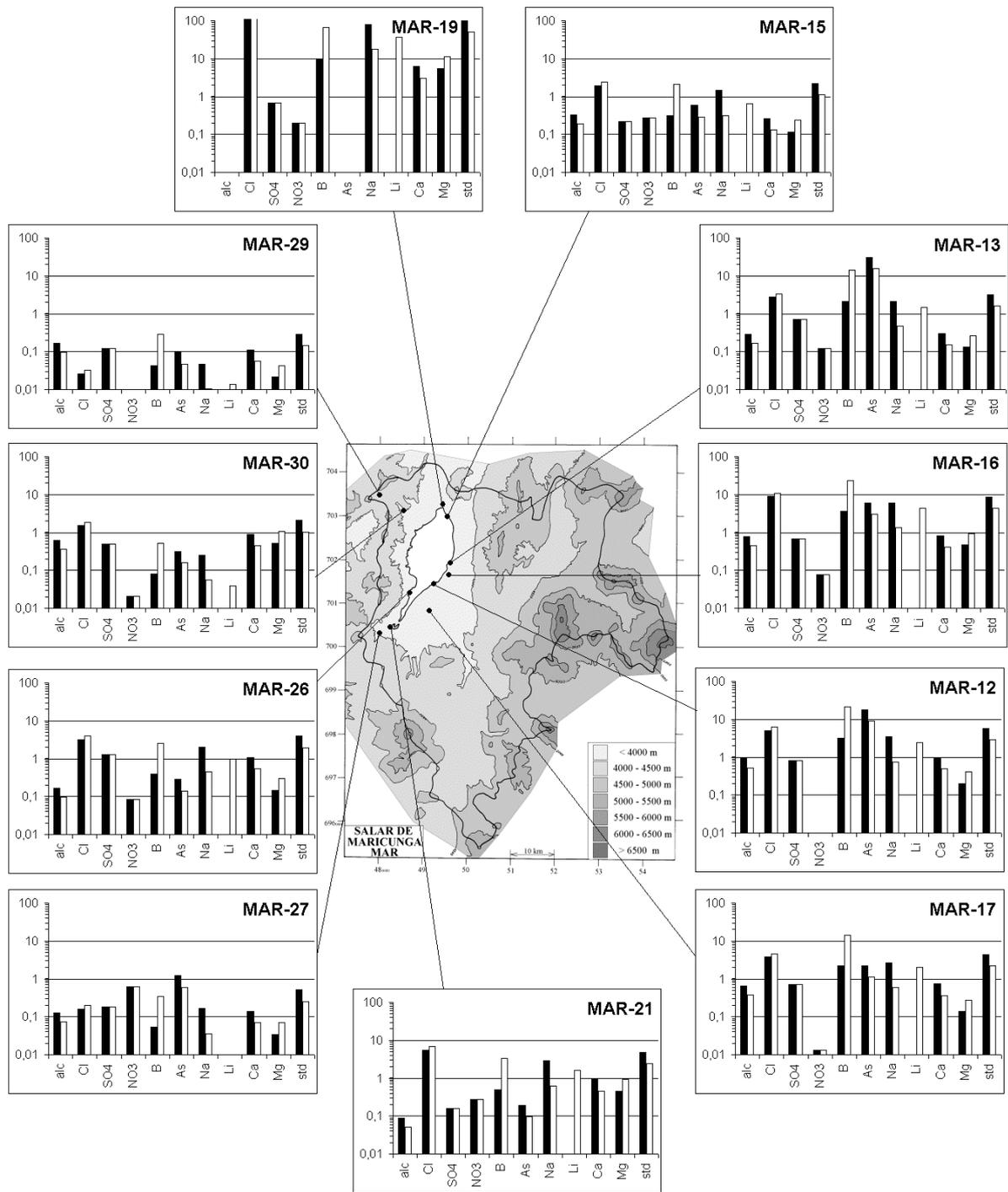
Valores calculados (en mg/l). STD = sales totales disueltas.
 S(+) = suma de los cationes; S(-) = suma de los aniones (meq/l)
 DIF.% = diferencia en %

Análisis de oxígeno-18
 y deuterio





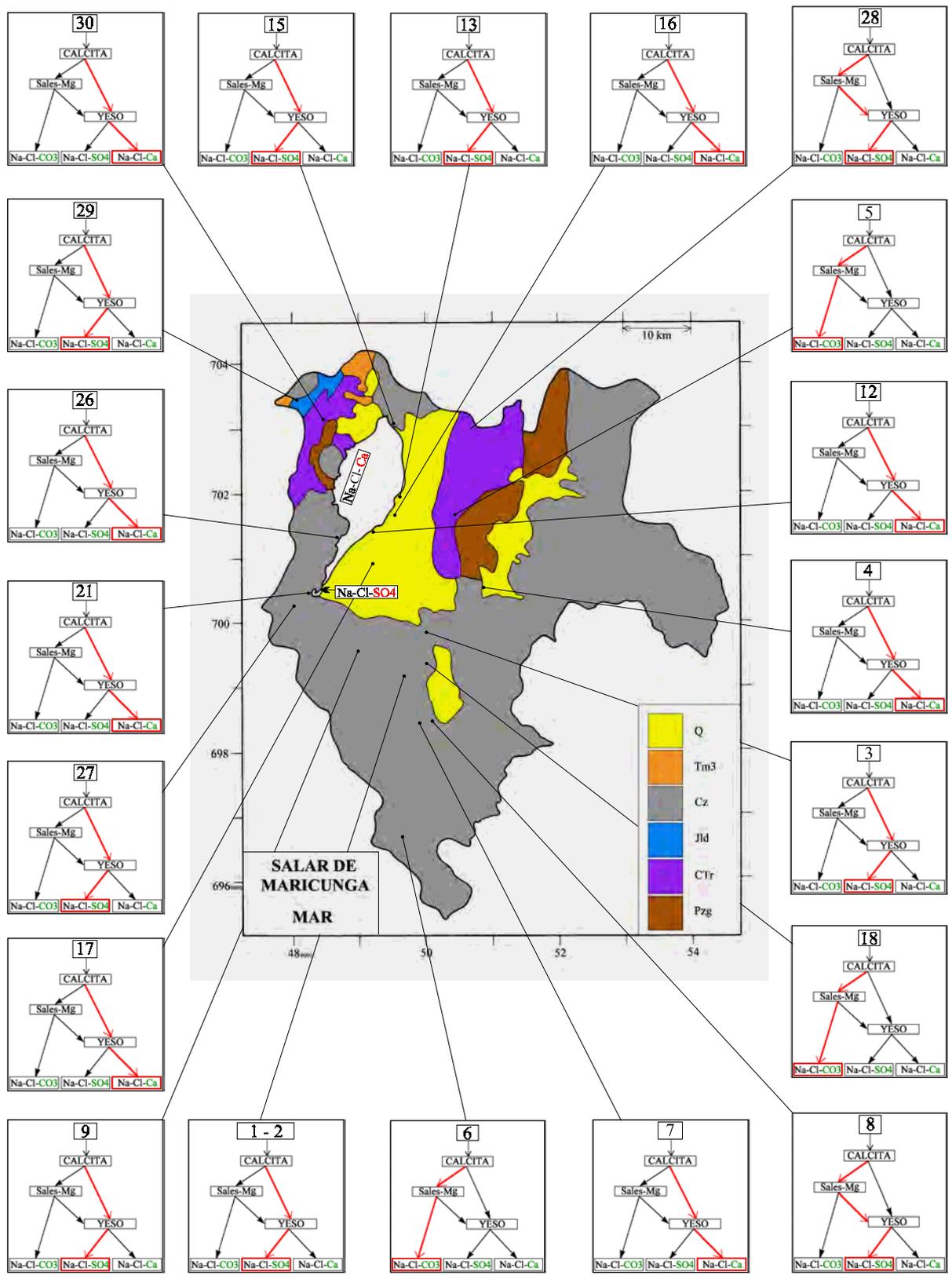




MAPA GEOLOGICO Y VIAS EVOLUTIVAS

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

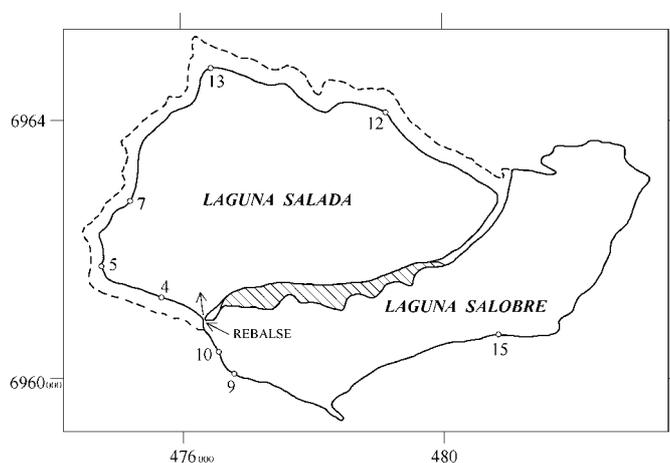


Fig.1 : Extensión de las lagunas del Negro Francisco en mayo de 1995.

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.

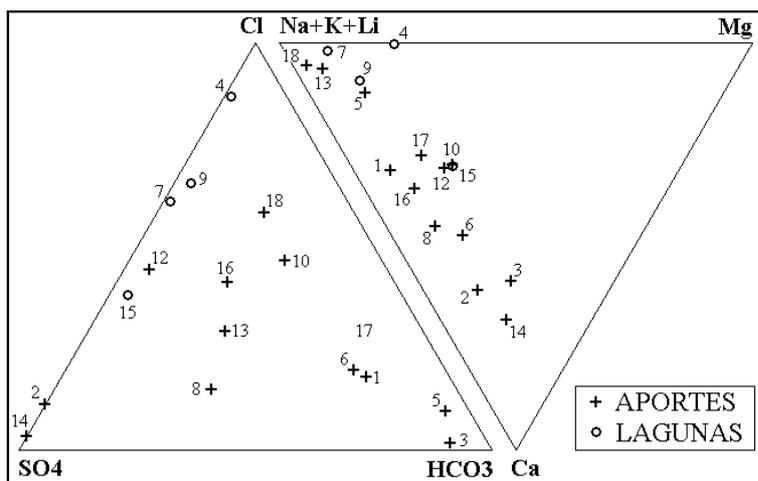


Fig.2: Composición de las aguas y salmueras de la laguna del Negro Francisco

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.

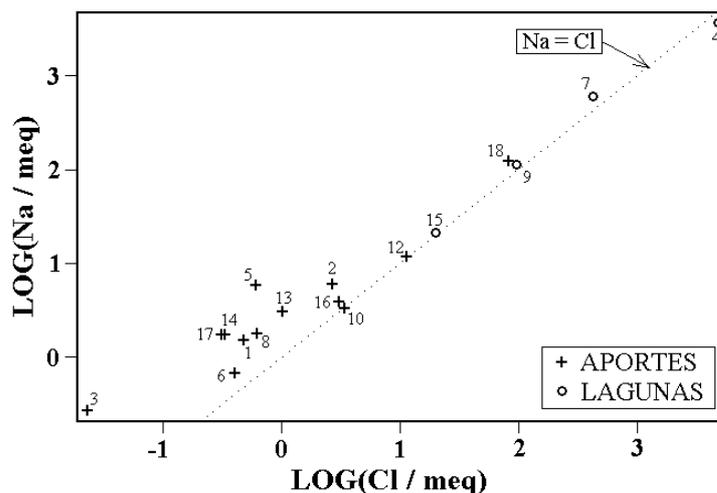


Fig.3 : Relaciones Na versus Cl y en aguas de la Laguna del Negro Francisco.

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	DESIV.
FRA-15	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
FRA-9	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
FRA-7	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
FRA-4	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 :

$$V_{dil} = V_{ap(Lag. salada)} - V_{ex} = 187 - 221 \text{ l/s}$$

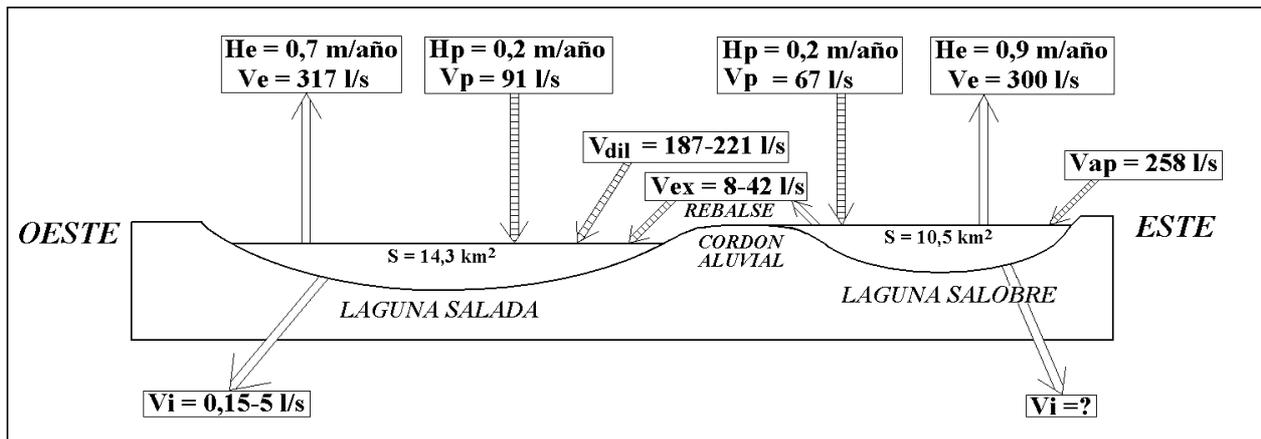


Fig.4 : Balance hídrico de las lagunas del Negro Francisco en mayo de 1995 y asumiendo el equilibrio dinámico.

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 perdidas 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

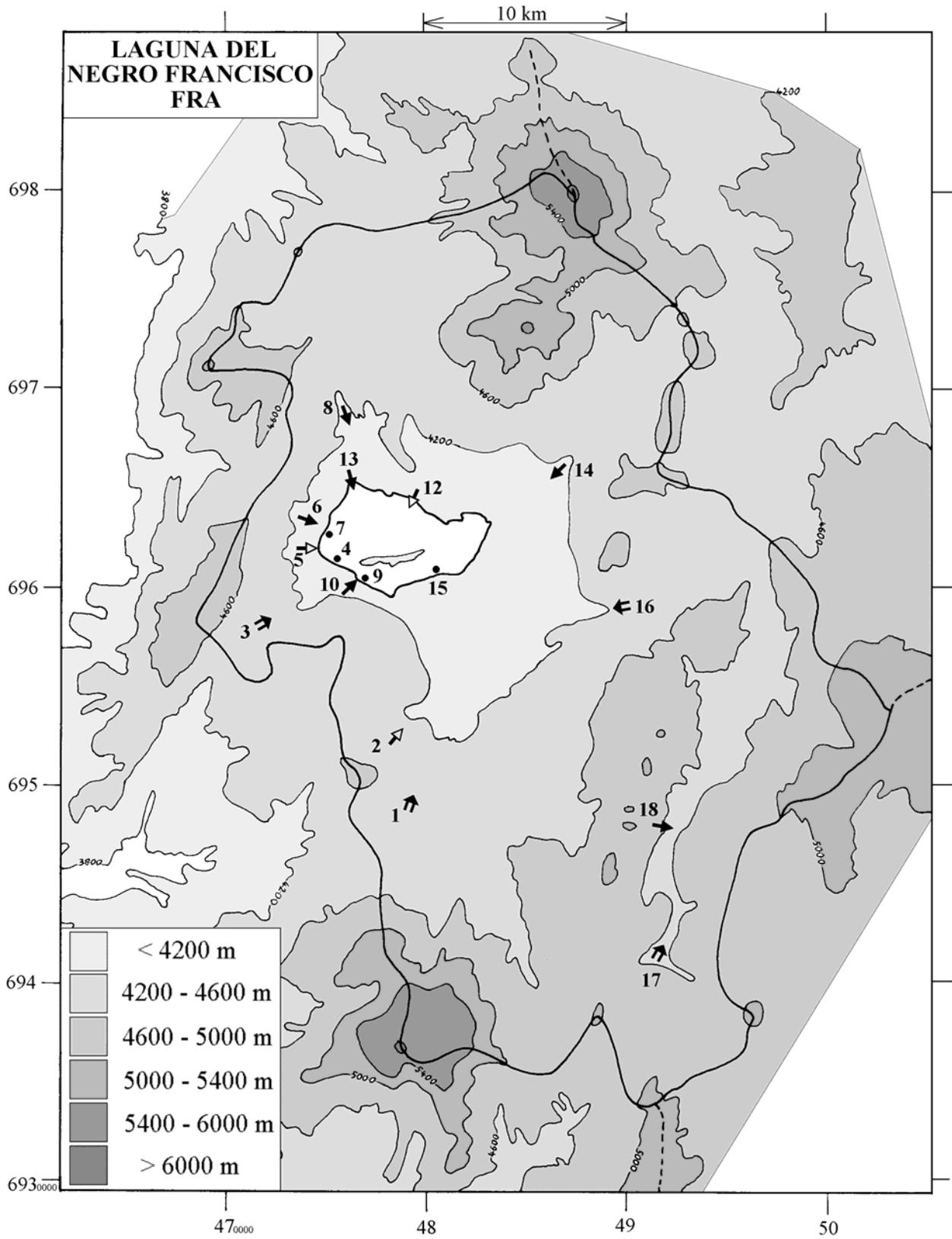
En 1995, la laguna del Negro Francisco estaba constituida por dos lagunas distintas separadas por un cordón de material aluvial y conectadas por un estrecho canal. Las lagunas reciben aguas diluidas de varias composiciones y vías evolutivas. Aunque predominan las aguas de vía evolutiva carbonatada, en 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 infiltra 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

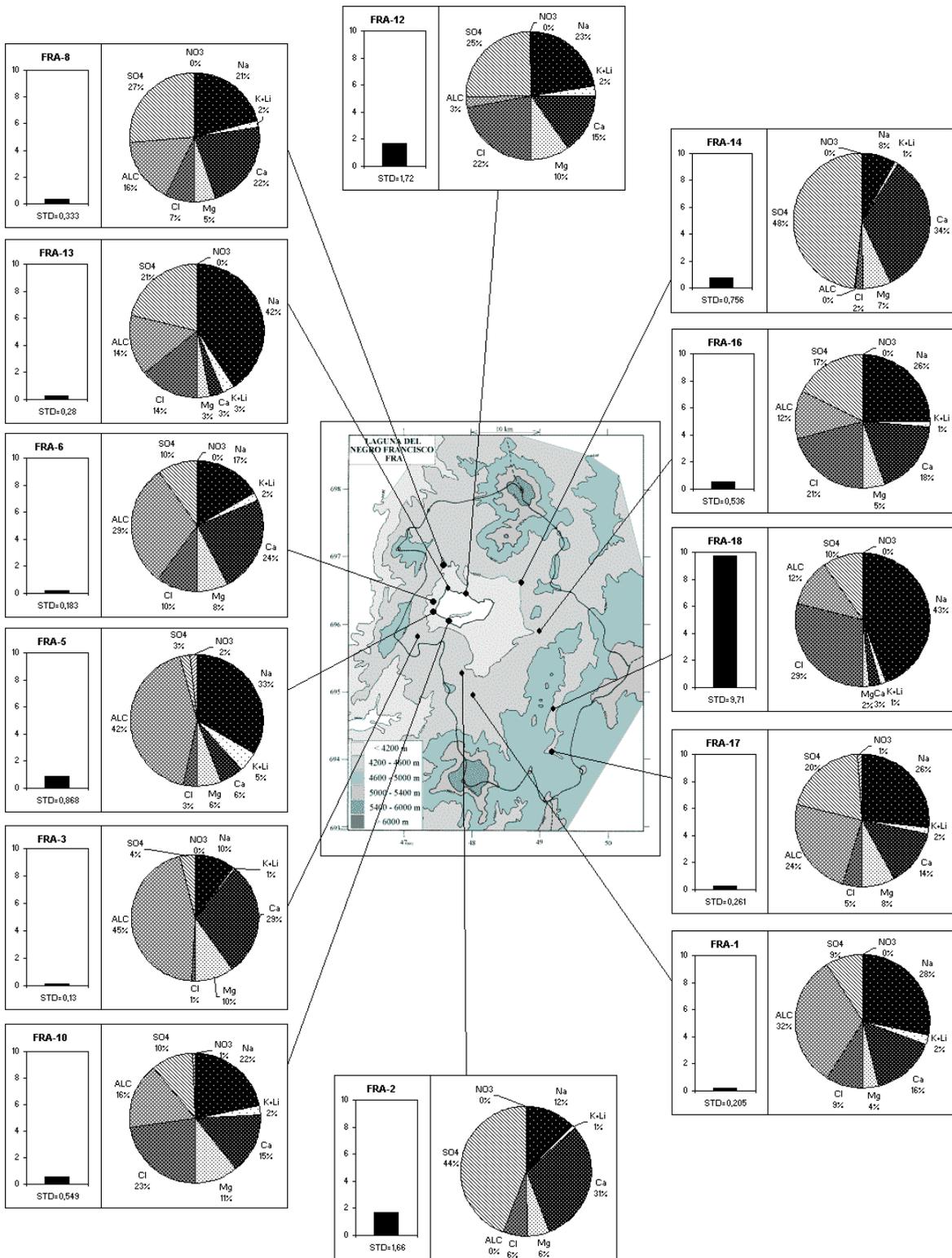
T = temperatura en C. DS = densidad en g/ml. ALC = alcalinidad en meq/l.
CEL = conductividad en micromhos/cm. Otros componentes en mg/l. nd = no detectado. na = no analizado.

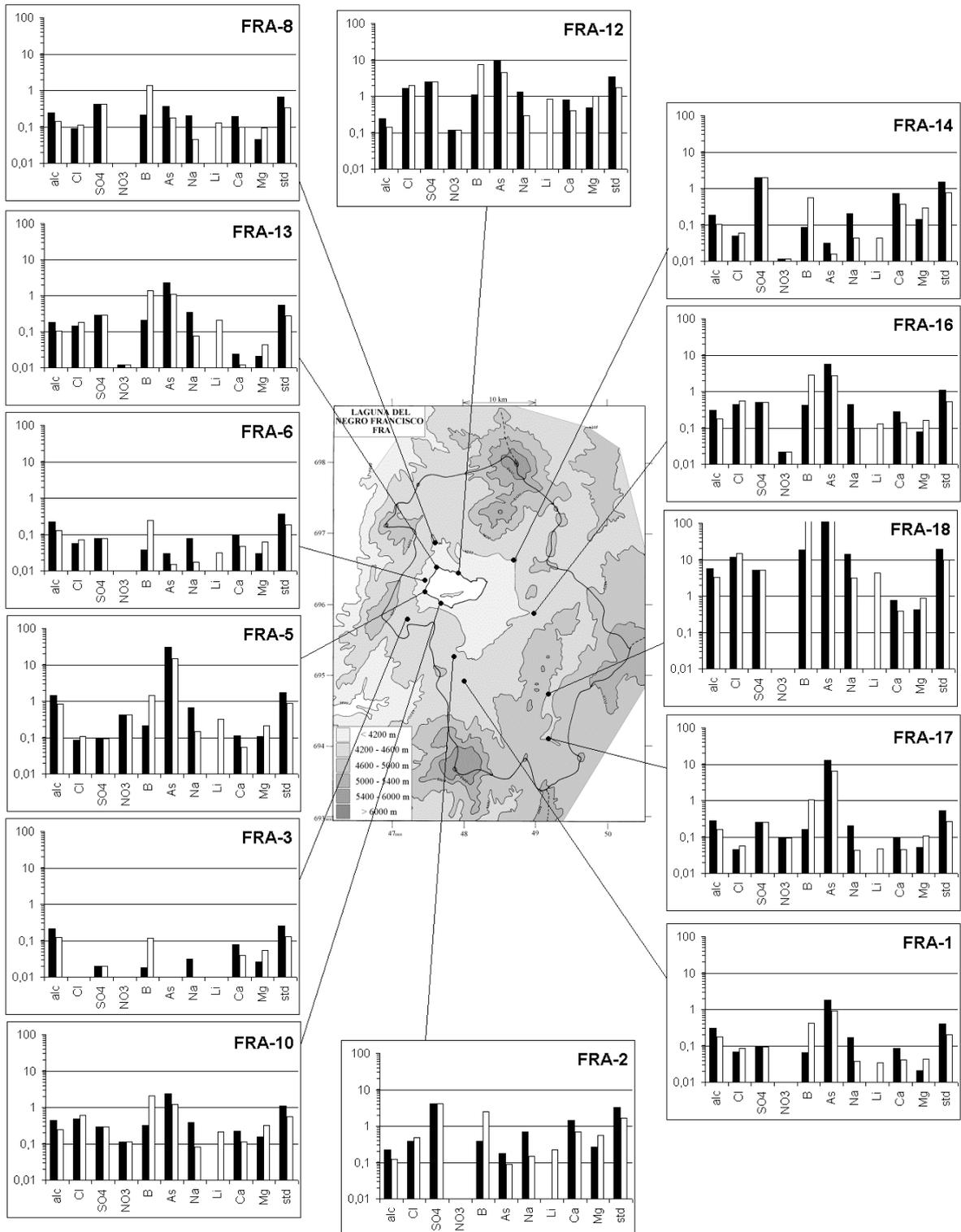
**LAGUNA DEL NEGRO FRANCISCO
FRA**

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.

