

**MODELO DE DISTRIBUCION Y ORIGEN DE ALGUNOS ELEMENTOS EN SALMUERAS DE DEPOSITOS SALINOS ANDINOS, NORTE DE CHILE**

**RESUMEN**

Se analiza el origen, composición química y génesis de las salmueras sódico-cloruradas contenidas en los depósitos pleistocénicos del Altiplano del Norte Grande de Chile. El valor relativamente alto de las razones Li/Na, B/Cl y K/Na en las aguas de vertiente, sugiere un origen principalmente volcánico. Sin embargo, el enriquecimiento en ellas de  $SO_4$  respecto a  $Cl^-$  y su clara relación de evaporación con aguas superficiales y salmueras residuales, indicaría una contaminación (dilución?) parcial con aguas meteoricas a través de un ciclo convectivo poco profundo. Durante el proceso de evaporación, que origina las salmueras residuales, se produce una concentración progresiva de  $Na^+$ ,  $Mg^{++}$ ,  $Li^+$ ,  $Cl^-$  y B. En el mismo proceso se pierde la totalidad de carbonato, un 95% de  $SiO_2$  y aproximadamente un 50% de K. Las salmueras residuales, de composición sódico-magnésicas cloruradas, representan una concentración de aproximadamente 100 veces la salinidad de las aguas meteoricas y 10 veces la de vertientes termales. La distribución aparentemente lognormal de los cationes en todas estas aguas, permite estimar tentativamente los valores de background y umbial para cada uno de ellas. Esta distribución se interpreta considerando un origen común y/o que los procesos que controlan su dispersión posterior son similares.

**INTRODUCCION**

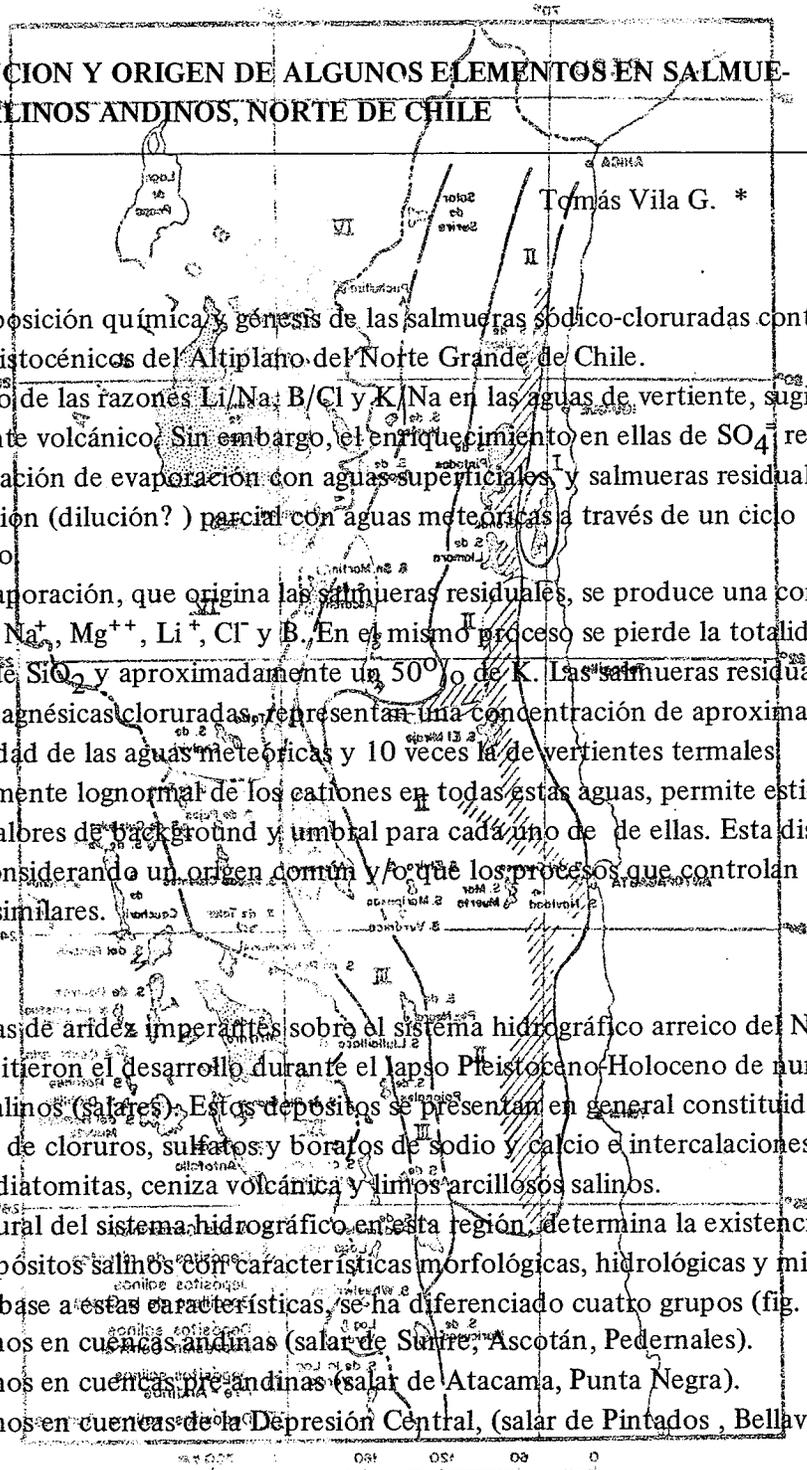
Las condiciones climáticas de aridez imperantes sobre el sistema hidrográfico arreico del Norte Grande de Chile, permitieron el desarrollo durante el lapso Pleistoceno-Holoceno de numerosos lagos y depósitos salinos (salares). Estos depósitos se presentan en general constituidos por una asociación salina de cloruros, sulfatos y boratos de sodio y calcio e intercalaciones relativamente potentes de diatomitas, ceniza volcánica y limos arcillosos salinos.

El control morfo-estructural del sistema hidrográfico en esta región, determina la existencia de diferentes tipos de depósitos salinos con características morfológicas, hidrológicas y mineralógicas específicas. En base a estas características, se ha diferenciado cuatro grupos (fig. 1):

- a. Depósitos salinos en cuencas andinas (salar de Surire, Ascotán, Pedernales).
- b. Depósitos salinos en cuencas pre-andinas (salar de Atacama, Punta Negra).
- c. Depósitos salinos en cuencas de la Depresión Central, (salar de Pintados, Bellavista, Lagunas).
- d. Depósitos salinos en cuencas de la Cordillera de la Costa (Salar Grande).

Los depósitos salinos en cuencas andinas, constituyen las principales reservas de borato en Chile. Sin embargo, con excepción de los salares de Surire y Ascotán, estos depósitos no

\* Instituto de Investigaciones Geológicas, Casilla 10465 . Santiago - CHILE





habían sido prospectados en forma sistemática. Por tal motivo y en base a las elevadas concentraciones en Li, K, Rb, Cs y otros metales alcalinos determinadas en las salmueras del salar de Atacama (Moraga, A., *et al.*, 1974), se efectuó una prospección preliminar de sales y salmueras en los salares andinos de la provincia de Antofagasta (Vila, T., 1974). Estudios posteriores en salares andinos de la provincia de Tarapacá (Salas, R., 1975; Henríquez, H. y Monti, S., 1976) permiten estudiar para el conjunto el mecanismo genético y la evolución composicional de sus salmueras, objeto del presente estudio.

### ANTECEDENTES GENERALES

Los aproximadamente 25 lagos y depósitos salinos andinos existentes en el área estudiada se distribuyen entre los 19°00' y 26°00' Lat. S. y los 67°00' y 69°00' Long. W., generalmente por sobre los 3.500 m s.n.m. En toda esta región coexisten, bajo condiciones climáticas similares, lagos salinos, lagos salinos con costras periféricas y salares propiamente tales (Tabla n° 1).

**TABLA 1** Ubicación, extensión y áreas de drenaje de los depósitos salinos andinos, Norte de Chile \*

Depósito salino	Ubicación (Long W - Lat S)	Cuenca de drenaje (I)	Area del depósito (II)	Extensión original (III)	Razón I / II	Razón III/II
Surire	69° 05' - 18° 50'	88	16	?	5.5	?
Huasco	68° 50' - 20° 20'	270	38	?	7.1	?
Coposa	68° 40' - 20° 40'	?	13	?	?	?
San Martín	68° 22' - 21° 25'	359	75	116	4.7	1.50
Ascotán	68° 17' - 21° 30'	1.090	173	177	6.3	1.01
Tara	68° 17' - 23° 05'	1.209	32.3	133	37.7	4.10
Aguas Calientes I	67° 25' - 23° 07'	177	11.2	24	15.8	2.10
Quisquiro	67° 17' - 23° 15'	449	63	114	7.1	1.80
Pujsa	67° 32' - 23° 13'	428	13	53	33.0	4.00
Aguas Calientes II	67° 34' - 23° 25'	560	95	95	15.5	1.00
Lago Lejía	67° 42' - 23° 30'	155	1.4	?	110.7	?
Lago Miscanti	67° 46' - 23° 44'	211	10.2	19	20.6	1.90
El Lago	67° 20' - 23° 53'	201	11.4	15.3	17.6	1.30
Lago Tuyacto	67° 35' - 23° 52'	297	4.0	12.0	74.2	3.0
Purisunchi	67° 43' - 24° 40'	265	36.0	68	7.3	1.8
Talar	67° 47' - 23° 58'	127	20.4	?	6.3	?
Pular	67° 57' - 24° 15'	481	22.	35.7	21.0	1.6
Azufretera	68° 31' - 25° 04'	160	5.6	?	28.5	?
Pajonales	68° 50' - 25° 10'	1.173	68	112.0	17.2	1.8
La Isla	68° 39' - 25° 45'	566	147.5	?	4.4	?
Las Parinas	68° 30' - 25° 50'	285	17	17	16.7	1.0
Aguilar	68° 45' - 25° 50'	415	53	80	7.9	1.7
Aguas Calientes III	68° 36' - 25° 00'	357	14.3	?	25.5	?
Grande	68° 42' - 25° 59'	481	22	22	21.0	1.0
Gorbea	68° 42' - 25° 25'	236	20.4	?	6.3	?

\* Modificada de Stoertz, G. y Ericksen, G., 1974.

Debido a que esta región habría formado parte del antepaís durante el desarrollo de la cuenca marina mesozoica andina (Frutos, J., 1972), el desarrollo de secuencias mesozoicas marinas es escaso, disponiéndose vulcanitas ácidas cenozoicas directamente sobre rocas sedimentario-marinas paleozoicas. Sobre el vulcanismo cenozoico, que constituye un extenso y potente plateau riolítico (2.000 m de espesor), se desarrollan lineamientos de centros volcánicos plio-pleistocénicos de composición andesítico - latíticos, orientados en sentido N-S y NW - SE. La actividad volcánica se manifiesta en la actualidad en forma de fumarolas, géisers y vertientes termales.

Los depósitos salinos en cuencas andinas se desarrollan como regla general directamente sobre rocas riolíticas, ocupando cuencas estructurales de pequeña magnitud originadas por fallas normales modernas, orientadas en sentido N - S. Este fallamiento estaría relacionado con la tectónica distensiva de las últimas etapas del solevantamiento andino (Frutos, J., 1972). En menor proporción, estos depósitos se emplazan en cuencas topográficas condicionadas por el relieve de conos volcánicos, manteniéndose las rocas riolíticas como roca basal. Rodeando el cuerpo salino se disponen extensos abanicos aluviales coalescentes.

En general, los depósitos salinos andinos aparecen como superficies lisas, horizontales, gris claras a oscuras, de consistencia variable según su contenido en agua. El desarrollo de lagunas periféricas en las proximidades de vertientes termales es común; las lagunas interiores son menos frecuentes. La profundidad de estos depósitos se desconoce; sin embargo considerando su extensión areal relativamente pequeña (Tabla n<sup>o</sup> 1) y la pendiente de los conos aluviales periféricos (3<sup>o</sup> - 5<sup>o</sup>), la profundidad máxima no debe superar los 100 m.

En el sistema hidrográfico eminentemente arreico de la región altiplánica, con excepción del río Zapaleri, cuyas aguas se pierden por dispersión en los conos aluviales del extremo NE del lago Tara, no existen otros cauces superficiales perennes de importancia y la totalidad de los depósitos salinos son alimentados en forma constante por vertientes termales ( 10<sup>o</sup> - 15<sup>o</sup> C). Por lo general estas vertientes se distribuyen en el contorno del cuerpo salino, y están controladas por sistemas de fracturas que afectan las rocas riolíticas basales y/o por planos de discontinuidad litológica entre éstas y las andesitas suprayacentes. A menudo las superficies de contacto entre dos coladas andesíticas muestran intercalaciones de niveles piroclásticos con alta permeabilidad.

Los aportes de agua que se pierden parcialmente por dispersión en las costras salinas superficiales, generan un nivel freático somero inestable, con recargas discontinuas según la época del año. Durante la estación lluviosa (Enero - marzo y junio - septiembre) aumenta la recarga por agua superficial que, infiltrándose en los conos aluviales periféricos eleva el nivel freático, produciendo la inundación parcial o total del depósito. La descarga de las aguas se efectúa principalmente por evaporación, aunque en algunos depósitos (principalmente lagos salinos sin desarrollo de costras) gran parte de ellas se pierde por fracturas de la roca basal. Este escape subterráneo impediría la concentración y consecuente depositación salina, lo cual explica la coexistencia, en similares condiciones climáticas y geológico - estructurales de lagos salinos y salares. Tanto la evaporación como el escape subterráneo de las aguas, origina una gradiente hidráulica que genera a su vez un continuo flujo de ellas hacia el centro del depósito. Este fenómeno produce una paulatina concentración en sólidos disueltos y da por resultado salmueras residuales con 20<sup>o</sup>/o de salinidad total.

Las características químicas de las aguas que confluyen a estos depósitos corresponden a aguas sódico - carbonatadas (afluentes superficiales diluidos) y aguas de vertientes sódico - cloruradas. Los valores de pH se mantienen neutros a débilmente alcalinos (Vila, T., 1975a).

## HIDROGEOQUIMICA

Durante la prospección de los depósitos salinos andinos, se realizó un muestreo preliminar

de sus salmueras, obteniéndose un total aproximado de 70 muestras, a razón de cinco por cada depósito. Las muestras fueron extraídas superficialmente (0.2 m) en la periferia de cada depósito; cuando las condiciones de tránsito lo permitieron se efectuaron perfiles de muestreo hacia el centro del depósito. En el estudio estadístico se incluyen además análisis de muestras tomadas en los salares de Coposa (Henríquez, H., y Monti, S., 1976) y Surire, R., 1975) (Tablas 2 y 3)

En base a la homogeneidad del marco geológico en el cual se generan estos depósitos, la interpretación hidrogeoquímica se realizó considerando a la totalidad de las muestras como una sola población. Esta hipótesis de trabajo se confirma en los diagramas de correlación y distribución.

#### **Procesos de Concentración Salina**

La historia composicional de las aguas que confluyen a cuencas cerradas puede ser separada en dos fases: una primera fase en la que aguas diluidas adquieren elementos en solución mediante reacciones con suelos y/o la roca basal, y una segunda fase en la que estas aguas se enriquecen en sólidos disueltos y originan una eventual precipitación de minerales salinos de alta solubilidad.

En el caso de los depósitos salinos en cuencas andinas, la primera fase está evidentemente relacionada con vertientes termales en gran parte de origen volcánico. Buenos ejemplos son los salares de Surire, Ascotán y Aguas Calientes II.

Con el objeto de conocer cuales son los procesos que controlan el enriquecimiento iónico y las variaciones composicionales de estas aguas durante su evolución a salmueras residuales, se ha tomado como base la correlación entre  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$ , considerando que ambos iones son indicadores constantes en procesos de concentración por evaporación (Eugster, H., 1970). Debido a que las concentraciones de estos iones varían en una razón de aproximadamente 1:1.000, los diagramas de correlación se presentan en gráficos log-log. En ellos, los procesos específicos de concentración por evaporación quedan representados por una línea de pendiente  $45^\circ$ . Cualquier modificación a ella, representa la coexistencia de otro proceso que ocasiona el enriquecimiento o pérdida relativa de un ion.

**Relación Na/Cl.** La figura 2 representa la correlación entre  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$  en aguas superficiales, vertientes termales y salmueras residuales. Con excepción de las salmueras más concentradas, en las cuales hay un enriquecimiento preferencial de  $\text{Cl}^-$ , se observa una notable constancia de la razón Na/Cl en todo el rango de concentraciones. Esta situación sugiere que las aguas superficiales diluidas, tras una concentración de 10 veces pueden dar origen a las aguas de vertientes termales, por lo menos en relación a  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$ . No obstante que las aguas de vertientes difieren bastante en su salinidad (sobre un rango de 5), las desviaciones de la razón Na/Cl son mínimas. Aparentemente, no existe una relación entre su salinidad y temperatura. La única forma efectiva de concentración iónica en las vertientes termales a partir de aguas superficiales es por evaporación, la que probablemente se produce durante su infiltración y escurrimiento subterráneo.

Las salmueras representadas (fig. 2) incluyen análisis de aguas de lagunas periféricas, de lagunas interiores y de salmueras intersticiales en limos salinos. Está claro que los tres tipos de salmueras se originan a partir de una concentración por evaporación de las aguas de vertien-

T A B L A 2. ANALISIS REPRESENTATIVOS DE AGUAS SUPERFICIALES Y VERTIENTES TERMALES  
EN DEPOSITOS SALINOS ANDINOS (mg/lit)

Salar	Li	Na	K	Ca	Mg	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Cl	NO <sub>3</sub>	B	SiO <sub>2</sub>	salinidad	pH
Aguas Superficiales													
Michincha*	o	23	8.2	41	9.6	65	102	29	4.7	1.0	35	286	6.8
	0	9	4.8	18	6	26	54	12	4.0	0.9	26	148	6.2
	0	6	2.4	14	5.8	41	28	7.4	2.8	0.6	28	121	6.5
Coposa *	0	58	5.2	62	15	0	315	11	3.6	0.9	87	558	3.98
	0	56	11	139	15	176	292	62	6.2	3.2	45	717	7.1
Río Zapaleri **	0.4	46	79	23	2.5	73	58	40	-	1.2	58	272	8.1
Pujsa**	1.4	104	27	70	31	343	25	188	-	11	88	715	8.2
	1.9	287	34	33	36	246	346	242	-	15	85	1.204	8.3
Vertientes Termales													
Michincha *	-	38	10	56	21	96	191	27	5.9	0.7	88	510	7.0
Coposa *	0.3	109	11	86	42	194	237	178	3.2	1.7	76	881	6.5
	0.5	134	10	187	104	298	668	178	2.6	2.8	73	1.580	7.1
	-	55	7.8	78	24	142	257	41	-	1.4	-	606	7.1
Surire***	-	83	11	54	23	61	231	105	0.5	0.9	68	596	7.2
	-	1.210	200	135	28	150	534	1.905	7.4	47	129	4.278	7.8
	-	229	41	14	1.7	139	114	264	0	10	47	790	7.9
Aguas Calientes II**	3.8	1.180	239	923	121	124	1.908	2.794	-	15	101	7.400	7.4
Purisunchi **	0.71	555	60	173	72	119	453	1.032	-	5.3	89	2.500	7.8
Tuyacto **	0.65	430	38	79	31	184	286	614	-	2.6	-	1.600	7.9
Aguas Calientes III **													
	6.3	2.370	215	758	705	103	2.944	5.036	-	63	63	12.263	7.9
	1.7	368	39	103	44	93	324	629	-	11	95	1.600	7.3
Ascotán **	4.1	550	50	150	42	113	181	1.100	-	8.5	74	2.300	6.8
Huasco **	-	72	6.6	44	8.3	207	83	37	1.1	1.3	46	401	6.8
	-	69	13	95	7.0	43	339	29	3.7	1.7	68	647	6.3
Tatio NW □	22	4.425	757	239	8.9	24	41	8.050	-	189	317	14.155	7.5
Tatio SE □	-	3.358	237	356	5.2	44	56	5.756	5.8	-	116	9.922	7.3
Puchuldiza □	12	1.700	160	20	0.2	184	128	2.700	5.0	2.7	138	4.967	7.9

\* Henríquez, H, y Monti, S. 1976

\*\* Vila, T., 1974

\*\*\* Salas, R., 1975

□ Análisis Archivo I.I.G.

- Indica no analizado

Análisis realizados en el Laboratorio Químico del I.I.G., Santiago

T A B L A 3. ANALISIS REPRESENTATIVOS DE SALMUERAS EN DEPOSITOS SALINOS ANDINOS (mg/lit)

Salar	Li	Na	K	Ca	Mg	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Cl	NO <sub>3</sub>	B	SiO <sub>2</sub>	salinidad	pH
Surire *	420	60.300	10.040	760	3.020	0	11.590	105.040	150	1.080	40	193.110	7.2
	540	73.200	13.200	890	3.830	0	11.430	131.380	80	1.150	30	236.290	7.0
	200	27.600	4.710	1.200	1.410	0	10.020	46.070	70	1.160	50	92.960	7.6
	30	840	140	5.300	1.060	40	3.620	8.300	4	400	60	19.970	7.8
Coposa **	17	6.300	575	755	1.675	167	7.830	10.713	10	61	33	29.457	8.4
	18	5.850	460	715	2.350	56	10.617	9.759	6.1	6.876		31.400	8.4
	7.5	2.520	240	450	700	186	3.555	4.569	6.7	27	46	12.580	8.1
Ascotán***	8.5	1.650	150	440	138	135	674	3.300	-	36	76	6.800	8.1
	75	20.370	2.483	605	3.452	0	15.240	32.960	-	291	81	79.500	7.7
	82	13.870	1.670	1.195	827	0	4.693	24.000	-	595	58	49.200	7.7
San Martín ***	38	13.100	800	3.679	590	103	1.238	28.380	-	131	62	50.300	7.4
Ollagüe ***	480	110.000	16.300	715	3.197	0	8.821	189.660	-	549	127	340.000	7.0
Tara ***	538	131.100	3.560	623	1.193	0	8.013	208.070	-	414	63	368.300	7.7
Aguas Calientes I ***	15	1.930	92	250	160	453	399	3.462	-	40	79	6.600	8.0
	152	25.460	1.183	2.538	1.361	0	3.154	46.690	-	474	103	81.400	7.7
Pujsa ***	137	28.500	1.295	375	653	0	28.110	27.660	-	675	67	89.300	8.6
Aguas Calientes II ***	4	1.180	239	923	121	124	1.908	2.794	-	15	101	7.400	7.4
	20	12.530	1.000	913	1.178	299	4.834	21.750	-	73	84	42.500	7.1
Purisunchi***	6.2	5.120	671	895	504	495	1.750	9.910	-	24	26	19.100	7.2
Aguas Calientes III ***	76	27.670	2.070	875	1.308	0	16.460	37.590	-	889	107	87.500	7.9
Pajonales***	120	21.230	1.143	3.440	1.420	361	2.938	41.545	-	294	85	72.300	7.5
Aguas Amargas	14	4.130	208	2.925	274	117	1.045	11.600	-	54	93	21.400	7.2

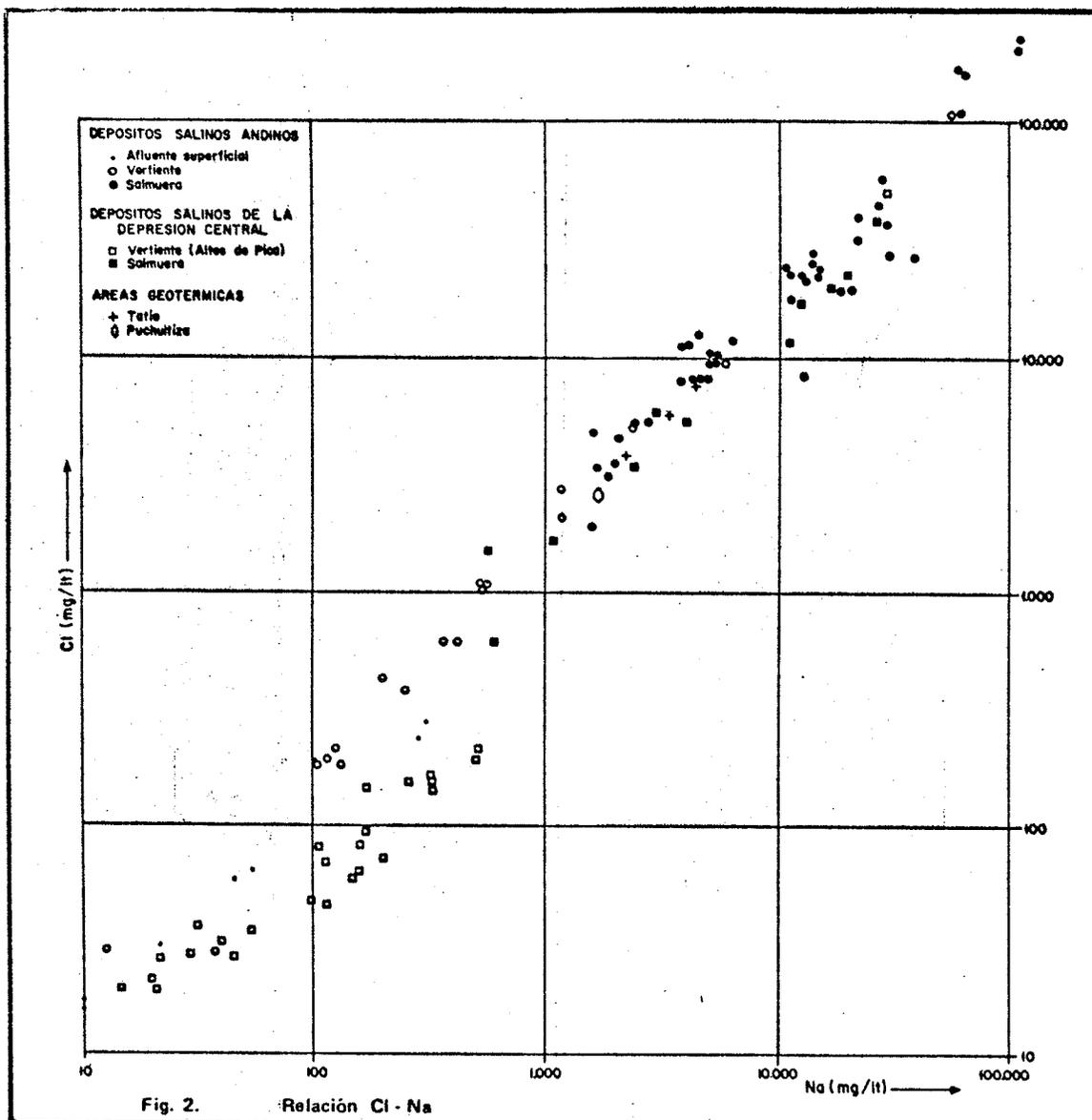
\* Salas, R., 1975

\*\* Henriquez, H. y Monti, S., 1976

\*\*\* Vila, T., 1974

- Indica no analizado.

Análisis realizados en el Laboratorio Químico del I.I.G., Santiago.



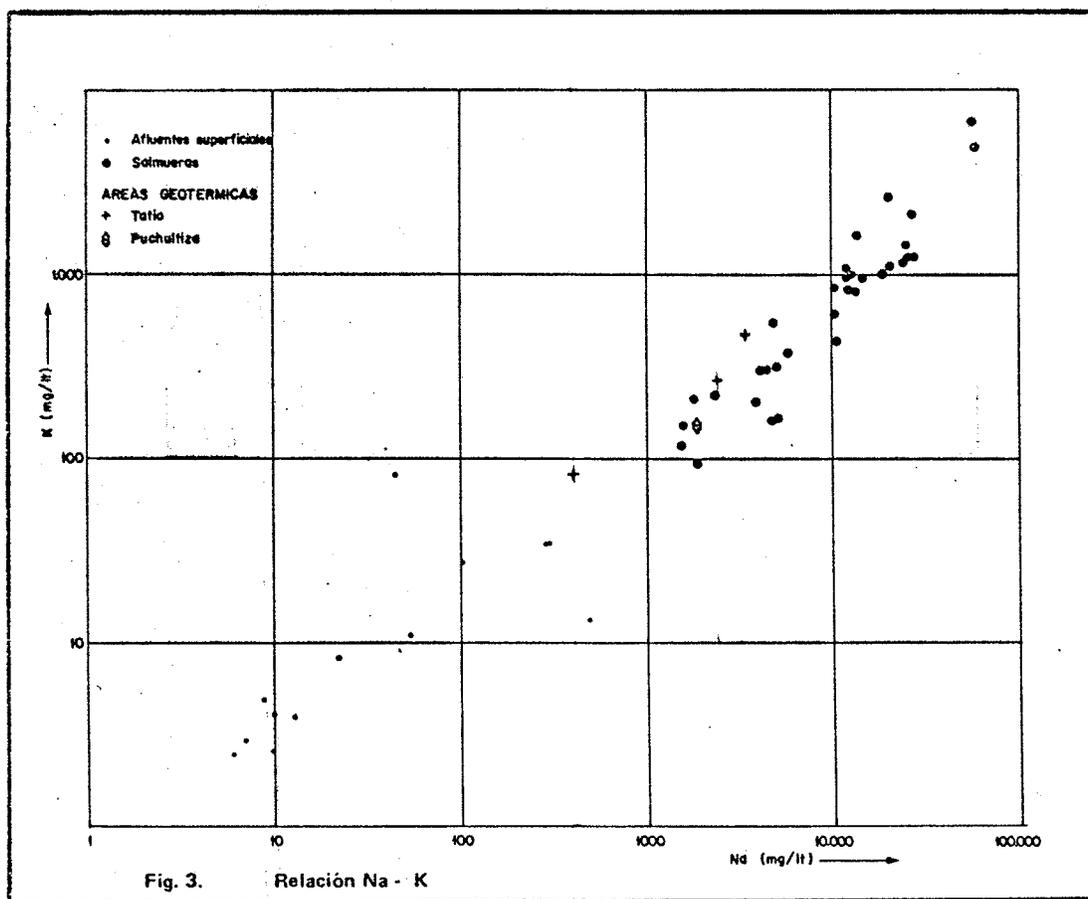
tes termales. El enriquecimiento relativo de  $\text{Cl}^-$  en las salmueras más concentradas corresponde probablemente a procesos que ocurren en la superficie del depósito, tales como cristalización fraccionada (precipitación de yeso y halita) y/o dilución de salmueras residuales.

En la misma figura se representan muestras de vertientes termales precordilleranas cuyas aguas dan origen a depósitos salinos de la Depresión Central, observándose que no existe entre ellos una relación evaporítica específica. Esta situación es ocasionada probablemente por una mezcla de distintos tipos de agua o a una redisolución de sales (Vila, T., 1976). Las muestras de áreas geotérmicas (Tatio, Puchuliza) mantienen valores de la razón  $\text{Na}/\text{Cl}$  similares a los obtenidos en vertientes termales.

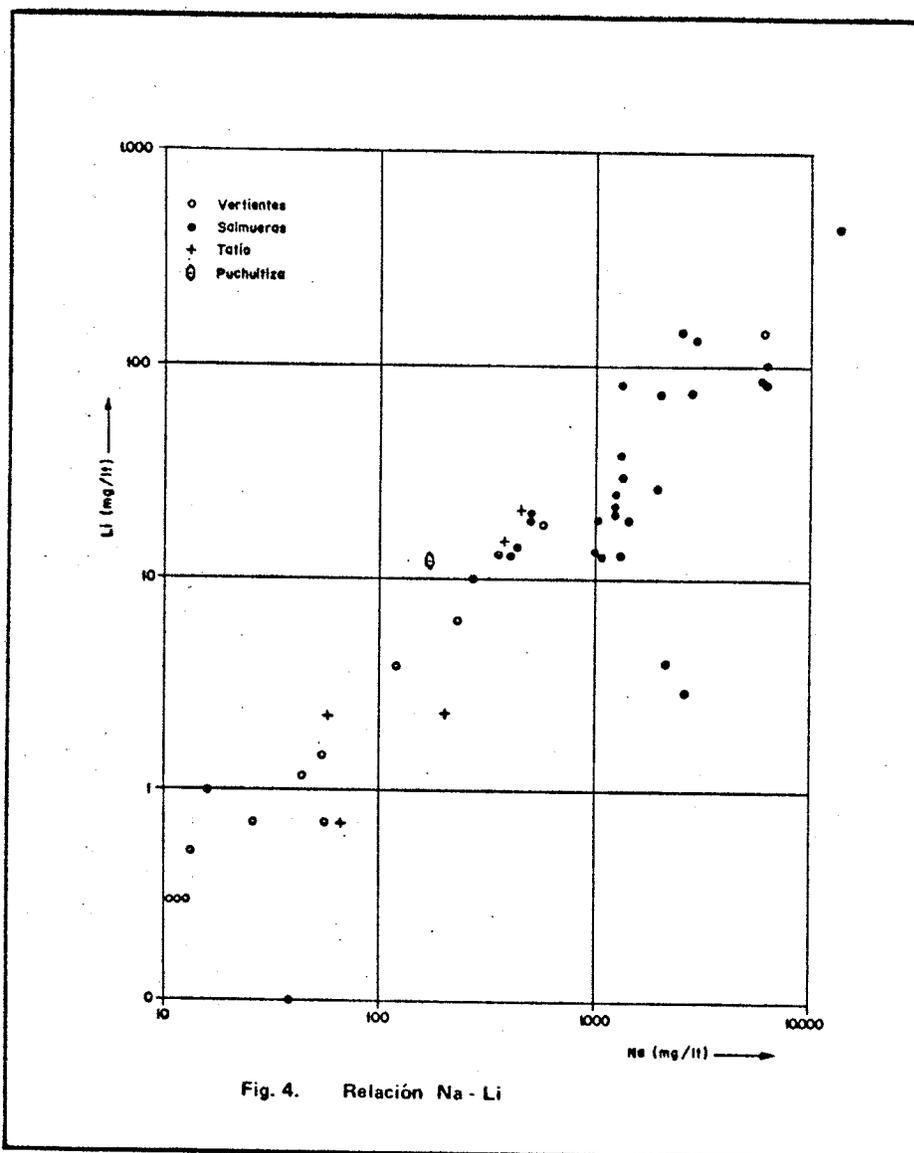
Aceptando que la concentración de  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$  en salmueras residuales corresponde a procesos

de evaporación a partir de aguas superficiales y de vertientes diluidas, el modelo se analiza para otros elementos presentes en las salmueras: si éstos son también concentrados por evaporación, debería existir para cada uno de ellos una relación de este tipo con Na y/o Cl, iones predominantes en estas salmueras.

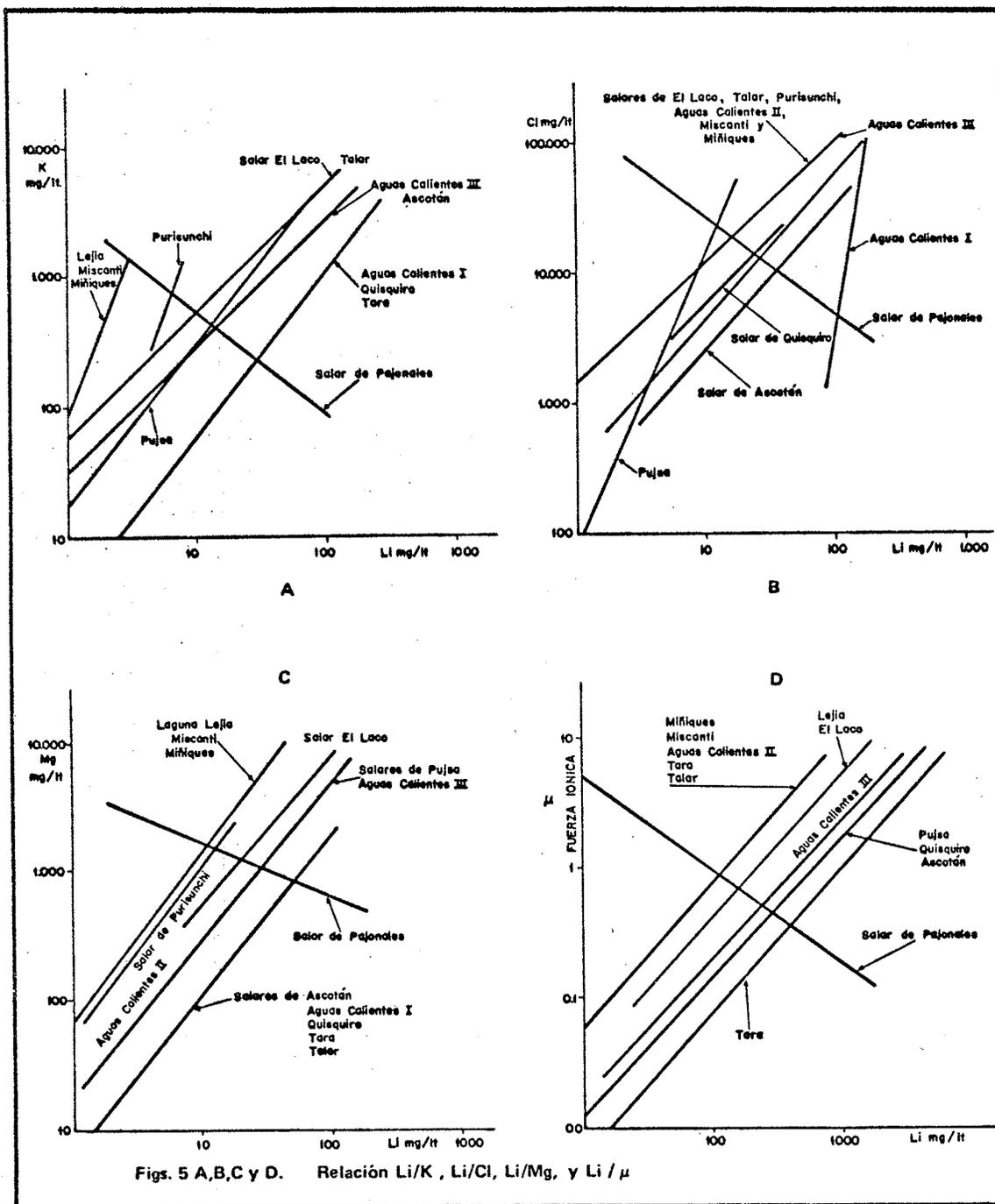
**Relación Na/K.** De la relación Na/K (fig. 3), se desprende una concentración en  $K^+$  por evaporación entre los aportes diluidos superficiales y las aguas de vertientes. Sin embargo, al continuar el enriquecimiento iónico en las salmueras, se produce una fuerte pérdida en este elemento (aproximadamente 50%) debido probablemente al intercambio iónico con minerales de arcillas. La remoción de  $K^+$  por precipitación de feldespato potásico u otro silicato rico en K es poco probable, considerando el bajo contenido en  $SiO_2$  de las salmueras.



**Relación Na/Li.** En general la concentración de  $Li^+$  en las salmueras es bajo (razón salinidad/Li:  $10^3$ : 0.74 promedio) y representa una concentración de aproximadamente 100 veces el contenido en aguas de vertientes termales. De acuerdo a la figura 4, el  $Li^+$  muestra una concentración por evaporación hasta las mayores concentraciones. Esta situación es posible debido a que la concentración inicial en carbonatos es pequeña (la solubilidad del  $LiCO_3$  es de 0.13 gr/lit en agua destilada a  $18^{\circ}C$ ) y a que es completamente extraído de las salmueras en los primeros pasos del proceso de evaporación (precipitación de calcita).



Examinando la relación Li/K; Li/Mg y Li/Cl (figs. 5a, b, c) se observa que éstas varían notablemente de acuerdo al depósito salino. La relación Li/K y Li/Cl es bastante errática, debido probablemente a la pérdida relativa de  $K^+$  por intercambio iónico con minerales de arcilla y a la precipitación de halita. Por el contrario, la relación Li/Mg se mantiene relativamente homogénea variando sólo en un factor constante, debido a la conducta semejante de ambos iones en soluciones salinas y a los productos de solubilidad similares para sus respectivas sales. Desde este punto de vista se pueden separar grupos de depósitos salinos, próximos geográficamente entre sí, entre los que destacan los salares de Aguas Calientes I, Tara y Quisquiro, los lagos Lejía, Miñiques y Miscanti y algunos depósitos individuales como el Salar de Pajonales, en donde estas relaciones son inversas. Las causas de esta inversión requerirán estu-



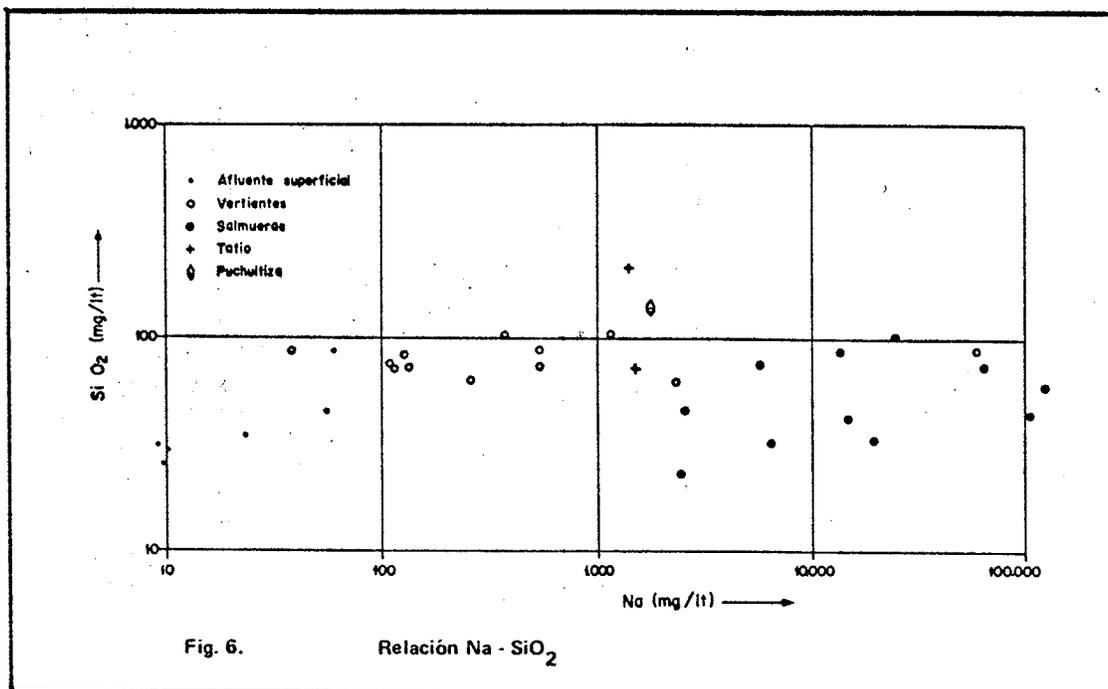
Figs. 5 A,B,C y D. Relación Li/K , Li/Cl, Li/Mg, y Li /  $\mu$

dio detallados para una explicación satisfactoria. Situación similar se aprecia en la fig. 5 d, en donde la relación Li/fuerza iónica de la solución(\*) queda representada por curvas de igual pendiente. El paralelismo entre las correlaciones para diferentes depósitos salinos sugiere la posibilidad de estimar valores máximos y mínimos de  $\text{Li}^+$  para salmueras de fuerza iónica conocida.

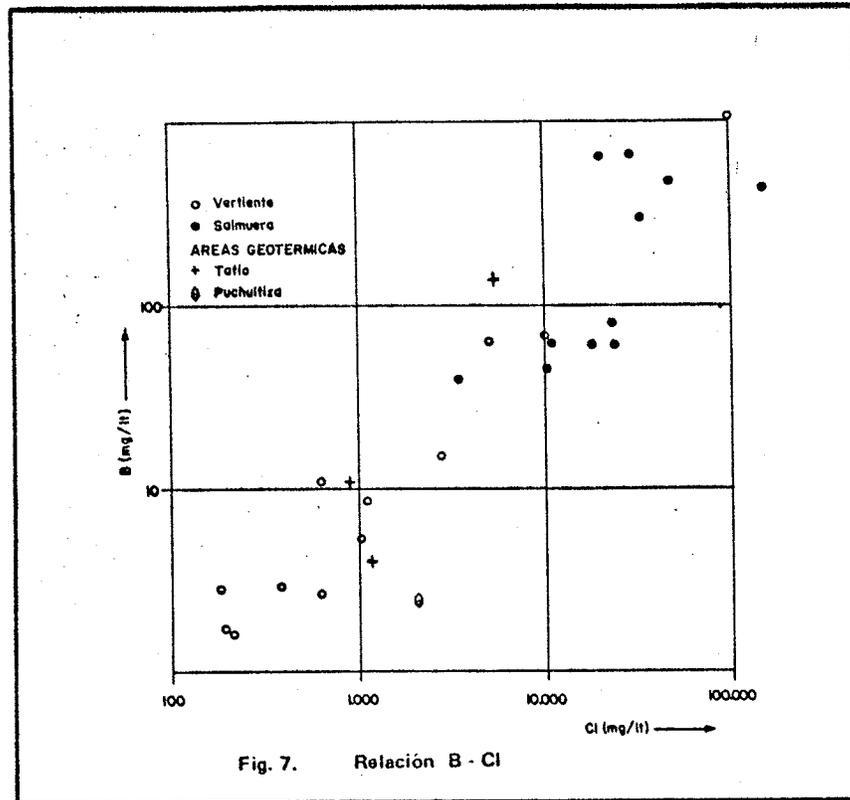
(\*) La concentración efectiva o actividad de un ion en una solución que contiene otros iones presentes es menor que su concentración real. La medida de este efecto, que tiene por resultado un incremento en la capacidad disolvente de la solución, está dada por la fuerza iónica de ésta.

Relación Na/SiO<sub>2</sub>. El contenido en SiO<sub>2</sub> de las salmueras (100 p.p.m. en promedio) es similar al de aguas de vertientes y ligeramente superior al de los aportes superficiales. Esta concentración corresponde aproximadamente a salmueras saturadas en SiO<sub>2</sub> (OH)<sub>2</sub> (Jones, B. F., *et al.*, 1967).

Si la sílice es concentrada por evaporación, debería existir una relación de este tipo entre el SiO<sub>2</sub> y Na<sup>+</sup>, catión predominante en estas salmueras. La figura 6 demuestra que esta relación no existe, e incluso sugiere una relación de concentración inversa. Considerando que la solubilidad del SiO<sub>2</sub> en salmueras alcalinas es controlada por la solubilidad de la sílice amorfa, y que ésta disminuye rápidamente para valores de pH bajo 9 (Jones, B.F., *et al.*, 1967), es probable que el SiO<sub>2</sub> precipite en forma de SiO<sub>2</sub> (OH)<sub>2</sub>. Otro mecanismo probable es la remoción parcial de SiO<sub>2</sub> por la fauna diatomácea presente en las salmueras.



Cloro vs. Boro. La correlación Cl - B (fig. 7) sugiere nuevamente una concentración de ambos elementos por evaporación, sin pérdida relativa de algunos de ellos por otro proceso. En resumen, se puede establecer que, a partir de aguas superficiales diluidas, la concentración salina en las vertientes termales (10 veces) y en las salmueras residuales (1.000 veces) se origina por un proceso de evaporación, en parte subterráneo (aguas superficiales a vertientes) y en parte subsuperficial (vertientes a salmueras residuales). Durante este proceso se mantiene la concentración relativa de Na<sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup>, Mg<sup>+</sup> y B, perdiéndose un 50% en K, un 95% en SiO<sub>2</sub> y prácticamente la totalidad del carbonato.



#### Evolución de las Salmueras en Relación a la Salinidad

La diferente conducta que siguen los iones principales durante el proceso de evaporación (enriquecimiento o pérdida relativa), determina una evolución composicional de las salmueras a medida que aumenta la concentración salina. Esta situación es la que controla en último término la mineralogía de las costras salinas.

La figura 8 representa la evolución composicional de las salmueras a medida que aumenta la salinidad total. En la confección de este gráfico se han tomado valores de concentración promedio de la totalidad de las muestras analizadas, recalculándose las concentraciones en tanto por ciento en peso. La evolución se indica a partir de aguas superficiales y de vertientes para finalizar en un punto de evaporación que produce una fuerza iónica de aproximadamente 5. Mientras precipitan carbonatos (principalmente calcita), la evolución es directa y se aleja de los vértices Ca y  $\text{HCO}_3 + \text{CO}_3$ . Las aguas no se saturan en relación al yeso mientras no estén libres de  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{CO}_3^{2-}$ , momento en el cual la evolución bruscamente se aleja del vértice  $\text{SO}_4^{2-}$  hacia el Cl. Antes de alcanzar el vértice de Cl, se deposita prácticamente todo el  $\text{Ca}^{++}$  y gran parte del  $\text{Mg}^{++}$ , generando salmueras cloruradas sódico-magnésicas. Las salmueras representadas por el punto 5 corresponden a cuencas que tienen un aporte local excesivo de  $\text{SO}_4^{2-}$ , demostrado por los valores de pH (4.6 a 6.0) en esas muestras.

El análisis de ambos mecanismos demuestra que al aumentar la concentración de las aguas diluidas, éstas alcanzan rápidamente la saturación respecto a calcita. En este punto, se produce un enriquecimiento relativo en  $\text{Ca}^{++}$  y una pérdida casi total de carbonatos, lo cual conduce

a la precipitación de yeso y a la génesis de salmueras residuales del tipo Na-Mg; Cl - SO<sub>4</sub> (Tabla N° 4)

T A B L A 4. CONCENTRACION RELATIVA DE SALES DISUELTAS EN SALMUERAS RESIDUALES • (°/o en peso)

Salar	Concentración (gr/lit)	NaCl	Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	CaCO <sub>3</sub>	CaSO <sub>4</sub>	CaCl <sub>2</sub>	MgSO <sub>4</sub>	MgCl <sub>2</sub>	KCl	LiCl
Ascotán	94	69.79	-	1.94	-	-	10.69	6.33	6.15	1.31
Azufrera	384	34.99	-	0.05	-	-	28.72	26.88	7.44	0.13
Agua Calientes III	200	75.45	-	0.25	1.10	-	13.05	2.60	6.20	0.55
Quisquiró	81	78.50	-	0.37	6.30	3.83	-	5.54	2.72	1.11
Tara	354	92.70	0.93	0.14	0.45	-	1.66	-	1.92	0.93
Laguna Lejía	64	20.01	35.06	0.62	2.31	-	37.43	-	2.93	0.27
El Laco	200	79.00	-	0.25	1.20	-	8.65	5.40	4.60	0.30
Pajonales	98	67.04	-	0.15	0.80	17.76	-	11.43	2.75	0.02
Pujasa	89	46.97	41.24	0.28	1.24	-	3.71	-	4.16	0.96

• Cusicanqui, H., y Espejo, C., 1972.

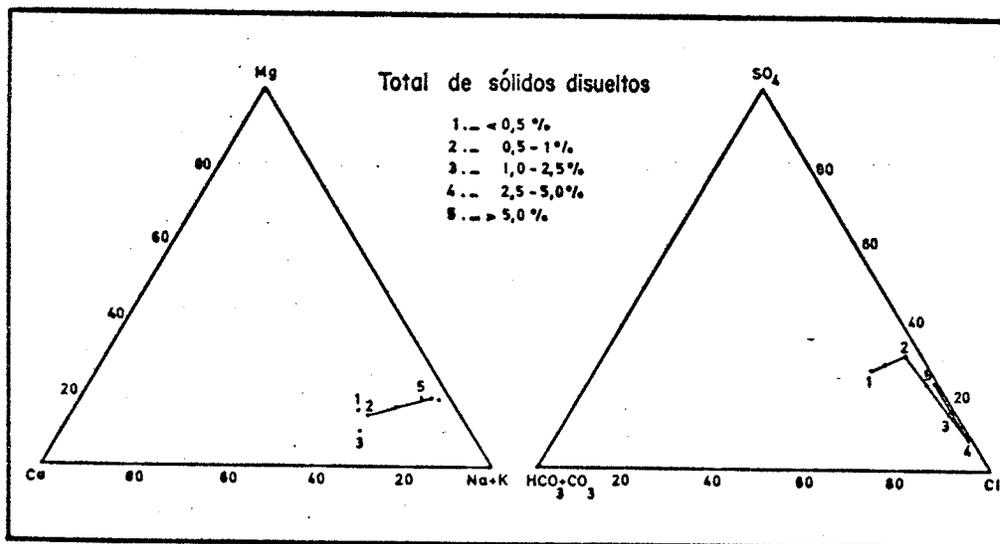
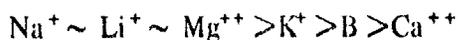


Fig. 8. Evolución composicional de las salmueras en relación a su salinidad.

### Modelos de Distribución de Cationes en Salmueras

La frecuencia acumulativa de los cationes principales en aguas superficiales, vertientes y salmueras residuales, sugiere una distribución de tipo lognormal, es decir los logaritmos de las concentraciones estarían distribuidos según la Ley Normal de Distribución. Si estos valores se ubican en un gráfico log-probabilidad, la distribución lognormal se manifiesta como una línea recta, la cual puede tener uno o más quiebres representando en esta forma poblaciones que se apartan de la distribución principal (figs. 9a, 9b y 10). En ellas se aprecia que, con excepción del Ca<sup>++</sup>, la dispersión de las concentraciones es similar (pendiente positiva de aproximada 50°). La pequeña variación de la pendiente entre las diferentes distribuciones sugiere el siguiente orden de dispersión, controlado aparentemente por la solubilidad de las diferentes sales:



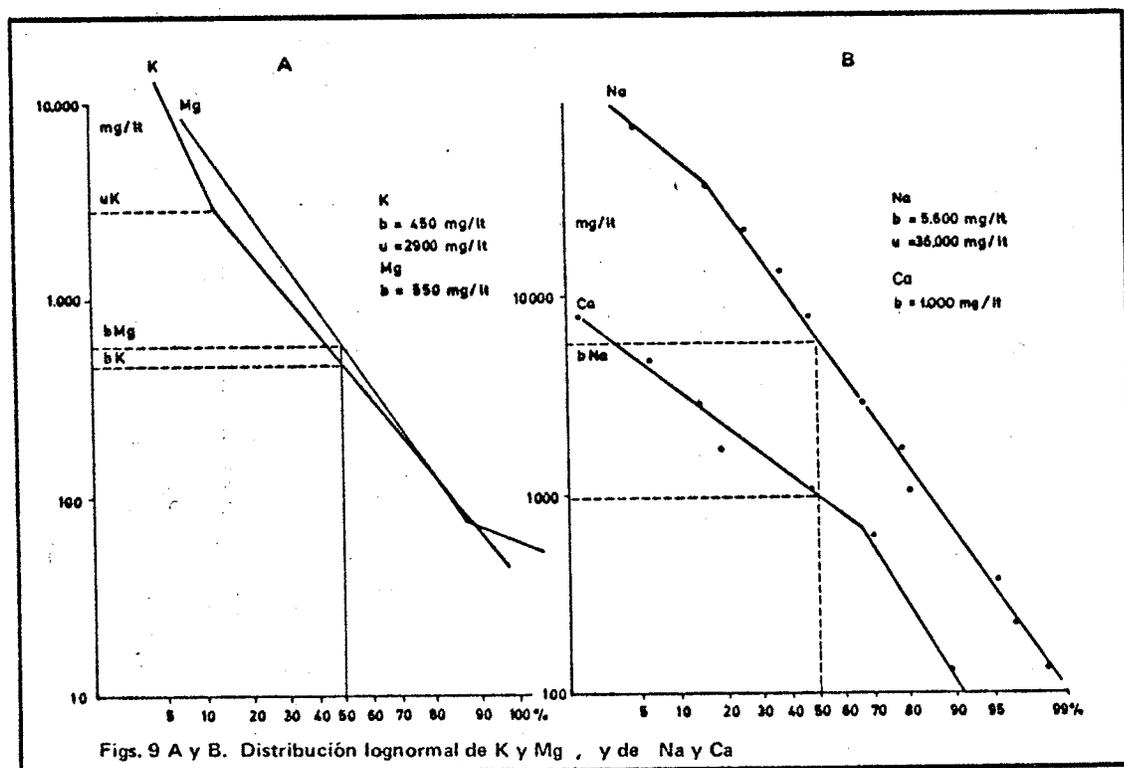
La distribución lognormal de estos iones sugiere un origen común para todos ellos y/o que los procesos que juegan en su dispersión posterior son similares.

La determinación gráfica de la distribución lognormal permite estimar los valores de background (equivalente en mg/lit del 50<sup>o</sup> percentil) y de umbral (equivalente en mg/lit al percentil 2.5) para cada elemento (Tabla 5) (Lepeltier, C., 1969).

Tabla 5. Valores de Background y Umbral de algunos elementos en salmuera (mg/lit).

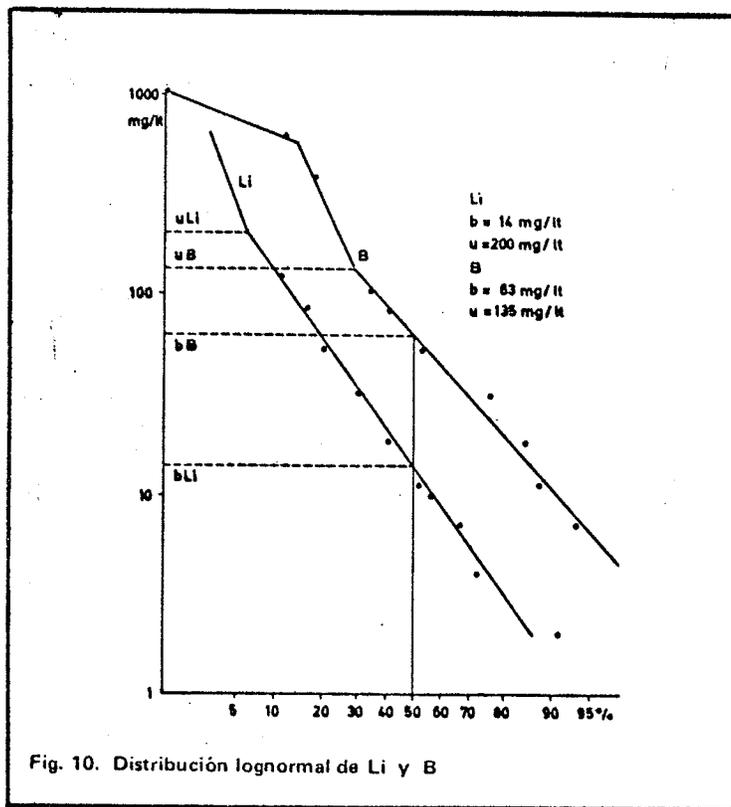
	Na	K	Mg	Ca	Li	B
Background	5600	460	550	1000	14	63
Umbral	36000	2900	?	?	200	135

La distribución lognormal del Na<sup>+</sup> muestra una clara discontinuidad en el 16<sup>o</sup> percentil, indicando que, además de la distribución principal, existe una segunda distribución menor para concentraciones mayores de 36.000 mg/lit. Esta última podría corresponder también a una distribución lognormal. Situación similar se aprecia en la distribución de los iones Li<sup>+</sup> y K<sup>+</sup>. La primera muestra una discontinuidad en el 6<sup>o</sup> percentil (200 mg/lit); en la segunda la discontinuidad se produce en el 13 percentil (2900 mg/lit). En ambos casos el orden de dispersión aumenta para concentraciones elevadas (sobre el valor del umbral).



La distribución del  $Mg^{++}$  muestra el caso inverso, disminuyendo la dispersión para concentraciones bajas.

La distribución del  $Ca^{++}$  y del B muestran respectivamente una y dos distribuciones menores, reflejando la baja solubilidad de sus sales precipitadas en las costras salinas.



## CONCLUSIONES

El análisis de los diagramas de correlación y distribución permite establecer algunas pautas generales en cuanto a la génesis y evolución de las salmueras que dan origen a los depósitos salinos andinos:

1. Prácticamente la totalidad de las sales en solución de las salmueras residuales (y sus equivalentes precipitados en costras salinas) son transportados por aguas de vertientes termales sódico - cloruradas. Considerando el alto valor promedio de las razones  $Li/Na$  (0.003),  $B/Cl$  (0.016) y  $K/Na$  (0.12) estas aguas serían de origen eminentemente volcánico (White, D., 1957); sin embargo, el exceso en algunas de ellas de  $SO_4^{=}$  en relación a  $Cl^{-}$  (probablemente por oxidación de  $H_2S$ ) y su clara relación de concentración con aguas de origen superficial, sugiere un mecanismo convectivo no muy profundo de las aguas meteóricas, originando una mezcla de ambas.

Durante este ciclo subterráneo, las aguas superficiales se enriquecen en relación a las aguas de vertientes, en aproximadamente 10 veces, con excepción del  $SiO_2$ , cuya concentración mayor está controlada por los valores neutros a ligeramente alcalinos de pH. En este sentido, la distribución lognormal de los principales cationes en las salmueras

- debe ser interpretado fundamentalmente como un origen común para todos ellos. La concentración de las salmueras residuales (aproximadamente 1.000 veces la salinidad de las aguas superficiales), es ocasionada por procesos de evaporación, principalmente en la superficie del depósito salino. A través de este proceso se pierde gran parte del  $K^+$  (50<sup>o</sup>/o) por intercambio iónico con minerales de arcilla, prácticamente la totalidad del  $SiO_2$  por precipitación como sílice amorfa y la totalidad del carbonato (calcita). El sodio, cloro, sulfato, magnesio y el boro mantienen su proporción respecto a Na y/o Cl durante todo el proceso evaporítico.
2. Con el aumento en la salinidad, las aguas superficiales se saturan rápidamente en calcita, originándose la precipitación de carbonatos (principalmente durante el ciclo subterráneo) y un enriquecimiento relativo en  $Ca^{++}$ . Esta situación conduce a la precipitación de yeso y a la génesis de salmueras residuales de carácter cloro-sódicas, enriquecidas en Mg.
  3. La presencia de gruesos espesores de borato (2 - 40 m) y niveles importantes de ceniza volcánica, diatomitas y limos arcillosos salinos en la gran mayoría de los depósitos salinos andinos, demuestra que las condiciones en que éstos se forman, han variado notablemente a través de su historia. Por tal motivo, las conclusiones obtenidas en el presente trabajo deben ser consideradas para el momento actual y no interpoladas a toda la historia geológica de estos depósitos.

#### AGRADECIMIENTOS

El autor agradece al Sr. Jorge Skarmeta M. sus valiosas críticas y sugerencias y a la Srta Carmen Pineda por la dedicación en la escritura del texto definitivo.

#### REFERENCIAS

- Cusicanqui, H. y Espejo, C., 1972, Antecedentes químicos sobre salmueras existentes en el laboratorio químico del Instituto de Investigaciones Geológicas. Santiago. Inst. Invest. Geol., Inf. inédito, 5 p.
- Eugster, H., P., 1970, Chemistry and origin of the brines of lake Magadi, Kenya. Mineral Soc. Amer. Spec. Pap. 3, p. 213 - 235.
- Frutos, J., 1972, Ciclos tectónicos sucesivos y direcciones estructurales superimpuestas en los Andes del Norte Grande de Chile. Symp. Invest. Manto Sup., v. 2, p. 473 - 483, Buenos Aires, Argentina.
- Henríquez, H. y Monti, S., 1976, Hidrogeología de los salares de Coposa y Michincha. Santiago, Inst. Invest. Geol., Inf. inédito. 44 p.
- Jones, B.F., Rettig, S.L., Eugster, H.P., 1967, Silica in alkaline brines. Science N<sup>o</sup> 158, p. 1310 - 1314.
- Lepeltier, C., 1969, A simplified statistical treatment of geochemical data by graphical representation. Econ. Geol., v. 64, pp. 538 - 550.
- Moraga, A., Chong, G., Fortt, M.A. y Henríquez, H., 1974, Geología del Salar de Atacama. Santiago, Inst. Invest. Geol., Bol. 29.

- Salas, R., 1975, Geología del Salar de Surire. Santiago, Inst. Invest. Geol., Inf. inédito, 95 p.
- Stoertz, G., y Ericksen, G., 1974, Geology of salars in Northern Chile. U.S. Geol. Surv. Prof. Pap. 811, 65 p.
- Vila, T., 1974, Geología y geoquímica de los depósitos salinos andinos, provincia de Antofagasta. Tesis de Grado, Depto. Geología Univ. Chile.
- , 1975a, Geología de los depósitos salinos andinos, provincia de Antofagasta. Santiago, Rev. Geol. Chile, n. 2, p. 41 - 55, 12 figs.
- , 1975b, Tectogénesis y distribución de minerales no-metálicos en Chile. Buenos Aires, II Congreso Ibero-Americano de Geología Económica, 10 p.
- , 1976, Hidrogeología y zonación salina en el Salar de Bellavista-Pintados, provincia de Tarapacá, Norte de Chile. Santiago, I Congreso Chileno de Geología, 20 p.
- White, E.D., 1957, Magmatic, connate and metamorphic waters. Geol. Soc. Am. Bull., vol. 63, p. 1659 - 1682.