

- **Huaycho** : sus aguas tienen una salinidad de 4,7 a 6,2 mM/l con contenidos en cloruros y sulfatos importantes.

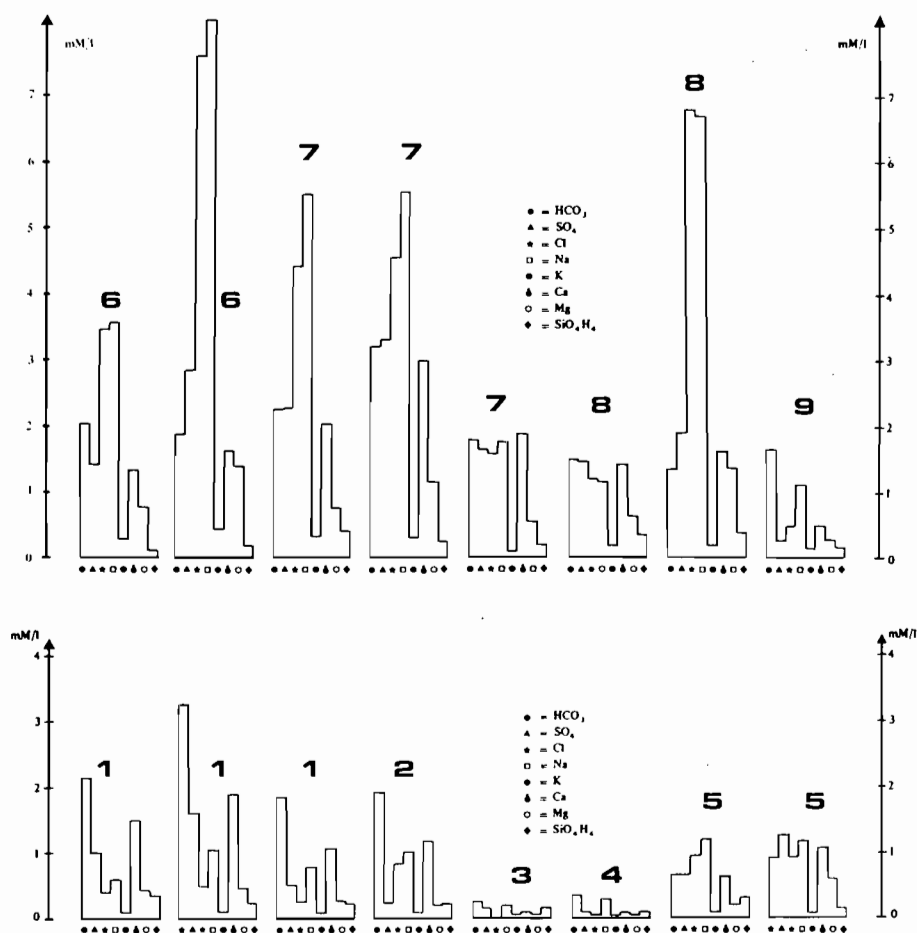


Fig. 3. - Composición química de las aguas de diferentes ríos secundarios vertidas directamente al lago (según CARMOUZE *et al.*, 1981)

1- Río Tiwanaku ; 2- Río Chilla ; 3- Río Batallas Chica ; 4- Río Keka ; 5- Río Huaycho ; 6- Río Pallina ; 7- Río Catari ; 8- Río Zapatilla ; 9- Río Challa Jahuirá.

Consideraciones generales sobre el aporte en elementos disueltos de las aguas de los ríos.

El problema del origen de los elementos disueltos en las aguas de la cuenca del lago Titicaca es relativamente complejo, ya que la geología del medio comprende un número grande de formaciones a las que están asociados también varios medios petrográficos distintos. Este problema ha sido abordado de una manera sucinta, haciendo muestreos de agua al pie de las principales formaciones (siluro devoniano, carbonífero inferior, cretáceo inferior medio y superior, terciario inferior y medio, pleistoceno). Las dos últimas formaciones son de naturaleza volcánica, mientras que las otras son de naturaleza sedimentaria. La interpretación es delicada porque no se dispone, para un río, de una formación dada, ni de un número de muestras de agua mayor a una o dos. Por esta razón, podemos hacer únicamente consideraciones generales.

- considerando un gran período de tiempo, el estado hidroquímico del lago oscila alrededor de un estado medio, ya que los "ingresos" y "egresos" de sales disueltas se equilibran aproximadamente.

Se ha considerado el período más largo posible, en función de los datos disponibles (1964-1978), para establecer el balance medio anual de cada uno de los elementos disueltos.

Los términos del balance anual son los siguientes :

- para el L : $(i)_F = (i)_I + (i)_S + (i)_D + \delta(i)^L$;
- para el LM : $(i)_{F^{LM}} = (i)_{I^{LM}} + (i)_{S^{LM}} + (i)_T + \delta(i)^{LM}$;
- para el Lm : $(i)_{F^{Lm}} + (i)_T = (i)_{I^{Lm}} + (i)_{S^{Lm}} + (i)_D + \delta(i)^{Lm}$;

donde :

- $(i)_F, (i)_{F^{LM}}, (i)_{F^{Lm}}$: aportes fluviales en i al L, al LM y al Lm.
- $(i)_I, (i)_{I^{LM}}, (i)_{I^{Lm}}$: pérdidas en i por infiltración en L, LM y Lm.
- $(i)_S, (i)_{S^{LM}}, (i)_{S^{Lm}}$: pérdidas en i por sedimentación en L, LM y Lm.
- $(i)_D, (i)_{D^{LM}}, (i)_{D^{Lm}}$: pérdidas en i por el Desaguadero.
- $(i)_T$: cantidad de i que pasa de LM a Lm por el estrecho de Tiquina.
- $\delta(i)^L, \delta(i)^{LM}, \delta(i)^{Lm}$: variaciones de la reserva de i en L, LM y Lm.

Aportes en sales disueltas por los ríos.

Para el cálculo de los aportes medios anuales en sales disueltas al lago, se ha establecido la composición química anual de las aguas, en cada una de las regiones hidrológicas, luego han sido estimados en base a la ponderación hecha en función de los flujos medios de agua proporcionados por CARMOUZE y AQUIZE, 1981. Para ciertos ríos, por falta de datos, se han hecho aproximaciones. Así para las aguas de las zonas que se indican, la misma composición química que las de las aguas de los ríos correspondientes :

- litoral Huancané = río Huancané ;
- litoral Arapa-Capachica = río Ramis ;
- litoral Puno-Tiquina = intermedia de los ríos de la región ;
- litoral Desaguadero-Guaqui = intermedia entre los ríos Challa Jahuirá y Chilla ;
- litoral Taraco = río Tiwanaku ;
- litoral Huatajata-Tiquina = río Ramis ;
- litoral Tiquina-Achacachi-Escoma = río Keka.

Los aportes al lago (L), al Lago Mayor (LM) y al Lago Menor (Lm), se han calculado en promedio anual sobre el período 1964-1978, utilizando los volúmenes de agua medios anuales de los diferentes aportes fluviales entre 1964 y 1978 (Tabla II). El Lago Mayor recibe cerca a un 85 % de los aportes, mientras que el Lago Menor recibe el 15 %.

	Lago	Lago Mayor	Lago Menor
HCO ₃	11,04	9,50	1,54
SO ₄	6,43	5,17	1,26
Cl	12,69	11,20	1,46
Na	13,93	12,20	1,72
K	0,90	0,74	0,15
Ca	8,23	6,88	1,35
Mg	2,84	2,38	0,47
SiO ₄ H ₄	1,37	1,20	0,17

Tabla II. - Aportes en sales disueltas al lago en su conjunto, al LM y al Lm en moles x 10⁹ (CARMOUZE *et al.*, 1981).

Pérdidas en sales disueltas por el Desaguadero.

El estudio hidrológico (CARMOUZE y AQUIZE, *op. cit.*) ha mostrado que algunos años, durante los meses de enero y febrero, el Desaguadero se convierte en afluente. Las aguas que ingresan al lago tienen una composición química vecina a las del lago en esta región, ya que son de origen lacustre y son revertidas de la planicie de inundación adyacente. Se puede evaluar, entonces, con una precisión satisfactoria, las pérdidas netas en sales disueltas por el Desaguadero, considerando la composición química media de las aguas lacustres cercanas al Desaguadero y el volumen neto vertido en promedio anual en el período considerado (1964-1978) de $0,217 \times 10^9 \text{ m}^3$. Estas son, en moles $\times 10^9$:

$$\begin{aligned} (\text{HCO}_3/\text{CO}_3)_D &= 0,41 & (\text{SO}_4)_D &= 0,57 & (\text{Cl})_D &= 1,72 & (\text{Na})_D &= 1,86 \\ (\text{SiO}_4\text{H}_4)_D &= 0,003 & (\text{K})_D &= 0,095 & (\text{Ca})_D &= 0,33 & (\text{Mg})_D &= 0,32 \end{aligned}$$

Los aportes fluviales en promedio anual (1964-1978) alcanzan a $46,5 \times 10^9$ moles, mientras que las pérdidas fluviales a $5,3 \times 10^9$ moles. El Desaguadero evacúa entonces, sólo el 11,4 % de los aportes fluviales, el resto es eliminado por infiltración y sedimentación biogeoquímica o almacenado en el medio.

Pérdidas por infiltración.

Se ha supuesto que las aguas que se infiltran tienen una composición química media cercana a la de las aguas lacustres (Tabla III). El volumen medio de las aguas que se infiltran ha sido estimado a partir del balance de Cl (CARMOUZE y AQUIZE, *op. cit.*) : $1,36 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{año}$ para el L, $0,93 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{año}$ para el LM y $0,44 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{año}$ para el Lm, de donde las pérdidas por infiltración son las que se encuentran en la Tabla IV.

Pérdidas por sedimentación biogeoquímica.

Han sido obtenidas por diferencia a partir de las ecuaciones :

- para L : $(i)_s^L = (i)_F^L - (i)_I^L - (i)_D^L - \delta(i)^L$;
- para LM : $(i)_s^{LM} = (i)_F^{LM} - (i)_I^{LM} - (i)_T^{LM} - \delta(i)^{LM}$;
- para Lm : $(i)_s^{Lm} = (i)_F^{Lm} + (i)_T^{Lm} - (i)_I^{Lm} - (i)_D^{LM} - \delta(i)^{Lm}$.

Previamente, se debe calcular $(i)_T$, $\delta(i)^L$, $\delta(i)^{LM}$ y $\delta(i)^{Lm}$. Las cantidades de sales disueltas que pasan por Tiquina son iguales a : $(i)_T = (v)_T \times |i|^{LM}$; $(v)_T$ = volumen de agua que pasa por Tiquina = $0,515 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{año}$ (CARMOUZE y AQUIZE, *op. cit.*) (Tabla III).

	i L	i LM	i Lm	i D	(i) ^T	$\delta(i)^L$	$\delta(i)^{LM}$	$\delta(i)^{Lm}$
HCO ₃ /CO ₃	2,19	2,21	1,97	1,90	0,41	0,39	0,33	0,06
SO ₄	2,64	2,64	2,80	2,65	0,57	0,47	0,40	0,08
Cl	7,11	7,10	7,60	7,95	1,72	1,28	1,06	0,22
Na	7,78	7,76	8,40	8,55	1,85	1,40	1,16	0,25
K	0,39	0,39	0,43	0,44	0,10	0,07	0,06	0,01
Ca	1,63	1,64	1,54	1,53	0,33	0,29	0,25	0,05
Mg	1,44	1,44	1,53	1,50	0,32	0,26	0,22	0,05
SiO ₄ H ₄	0,03	0,03	0,03	0,01	0,003	0,005	0,004	0,009

Tabla III. - Composición química de las aguas del Lago | i | L, del Lago Mayor | i | LM, del Lago Menor | i | Lm, y del Desaguadero | i | D en mM/l. Variación de las reservas salinas medias anuales (1964-1978) en el lago $\delta(i)^L$, el LM $\delta(i)^{LM}$ y el Lm $\delta(i)^{Lm}$ en moles $\times 10^9$. Tránsito de sales disueltas en Tiquina, $(i)_T$, en moles $\times 10^9/\text{año}$ (CARMOUZE *et al.*, 1981).

Las variaciones de las reservas en i en el lago, LM y Lm son :

$$\delta(i)^L = \delta(v)^{LX} | i |^L; \delta(i)^{LM} = \delta(v)^{LMX} | i |^{LM}; \delta(i)^{Lm} = \delta(v)^{LmX} | i |^{Lm};$$

donde $\delta(v)$ representan las variaciones del volumen de L, LM y Lm y son iguales a $0,18 \times 10^9$, $0,15 \times 10^9$ y $0,03 \times 10^9$ m³. Se puede, entonces, calcular $(i)^L$, $(i)^{LM}$ y $(i)^{Lm}$ (Tabla V).

Por hipótesis se ha admitido que Cl no sedimenta. La sedimentación reportada para Na no es significativa frente a la incertidumbre introducida en el balance. Las pérdidas por sedimentación en HCO₃/CO₃, SO₄, K, Ca, Mg y SiO₄H₄, representan 65,6 %, 27,7 %, 21,6 %, 67,8 %, 10,2 % y 96,3 %, respectivamente, de los aportes fluviales. La sedimentación de SiO₄H₄, HCO₃/CO₃, Ca, K y SO₄ son respectivamente 7,7 ; 5,3 ; 4,6 ; 2,9 y 2,25 veces más importantes en LM que en el Lm, mientras que la de Mg es dos veces mayores en el Lm que en el LM. Globalmente, las pérdidas por sedimentación representan 28,5 % de los aportes fluviales, 77,5 % se llevan a cabo en el LM y 22,5 % en el Lm.

	$(i)^L$	$(i)^{LM}$	$(i)^{Lm}$
HCO ₃ /CO ₃	2,19	2,01	1,08
SO ₄	2,64	2,40	1,18
Cl	7,11	6,48	3,19
Na	7,78	7,08	3,53
K	0,39	0,35	0,18
Ca	1,63	1,50	0,65
Mg	1,44	1,31	0,64
SiO ₄ H ₄	0,03	0,03	0,001

Tabla IV. - Pérdidas por infiltración en el lago $(i)^L$, en el Lago Mayor $(i)^{LM}$ y en el Lago Menor $(i)^{Lm}$ en moles $\times 10^9$ (CARMOUZE *et al.*, 1981).

	Lago	Lago Mayor	Lago Menor
HCO ₃ /CO ₃	7,22	6,02	1,38
SO ₄	1,78	1,01	0,78
Cl	0,0	0,0	0,0
Na	0,07	0,03	0,07
K	0,19	0,13	0,06
Ca	5,38	4,29	1,16
Mg	0,29	0,11	0,20
SiO ₄ H ₄	1,32	1,15	0,17

Tabla V. - Pérdidas por sedimentación biogeoquímica en el lago $(i)^L$, en el LM $(i)^{LM}$ y en el Lm $(i)^{Lm}$, en moles $\times 10^9$ (CARMOUZE *et al.*, 1981).

