

V.I Características físico-químicas del agua

ANDRE ILTIS, JEAN-PIERRE CARMOUZE, JACQUES LEMOALLE

Las características físicas y químicas del agua del Titicaca han sido objeto de observaciones puntuales en el curso de expediciones científicas y, posteriormente, de datos sobre períodos mucho más amplios. Se pueden citar entre otros los trabajos de GILSON (1939-40 y 1964), MONHEIM (1956), LÖFFLER (1960), KESSLER y MONHEIM (1968), WIDMER *et al.* (1975), RICHERSON *et al.* (1975 y 1977), HEGEWALD *et al.* (1976), LAZZARO (1981), HEGEWALD y RUNKEL (1981), CARMOUZE *et al.* (1981, 1983, 1984), RICHERSON *et al.* (1986), ILTIS (1987) y QUINTANILLA *et al.* (1987).

Si los datos de estos autores sobre el hidroclima permiten una información válida de las variaciones espaciales y estacionales, la ausencia de un control regular a largo plazo no permite, por ahora, apreciar una eventual variabilidad plurianual.

La temperatura del agua, el contenido en oxígeno y la transparencia son los tres parámetros para los cuales se tienen actualmente las medidas más numerosas. El conjunto de datos obtenidos muestra una individualización bastante marcada de las grandes regiones morfológicas del lago. Se puede pues distinguir por una parte, el Lago Menor, de una baja profundidad media al cual se debe asociar las grandes bahías poco profundas del Lago Mayor así como las de Puno y de Achacachi y, por otra parte, el Lago Mayor caracterizado por una estratificación estacional y una mayor inercia térmica.

Temperatura del agua

Variaciones estacionales en superficie

Las temperaturas medias mensuales de superficie medidas en el Lago Mayor entre 1977 y 1979 (CARMOUZE *et al.*, 1983) varían entre 11,25 y 14,35°C, la más baja siendo en agosto y la más elevada en marzo (cuadro 1). La temperatura media anual (1977-1979) es de 13,0°C.

Medidas ocasionales (GILSON, 1964 ; ILTIS, 1987) realizadas en el Lago Mayor indican valores mínimos de 10,9°C (fin de julio) y máximos de 17,0°C (febrero) mientras que en el Lago Menor, los valores extremos observados son 8,5°C (junio) y 18,5°C (febrero).

La amplitud anual de variación es pues, para el Lago Mayor, de 3,1 K en promedios mensuales, la diferencia máxima observada siendo del orden de 6 K. En el Lago Menor donde faltan los datos sobre los promedios mensuales, la diferencia máxima observada es de 10 K.

Los factores susceptibles de intervenir en las variaciones de la temperatura del agua en el curso del año son la temperatura del aire, la fuerza del viento y la radiación global incidente (fig. 1). Medidas efectuadas en Puno muestran que las temperaturas medias del aire varían entre 5,07°C en julio y 10,15°C en diciembre. La fuerza del viento es relativamente débil todo el año y varía en promedio entre 0,95 m.s⁻¹ en abril y 1,42 m.s⁻¹ en octubre, pudiendo considerarse el invierno como el período de agitación máxima. La insolación diaria fluctúa entre 9,7 en julio y 5,8 h.j⁻¹ en enero y febrero, la radiación diaria variando entre 2.420 en noviembre y 1.860 J.cm⁻².j⁻¹ en julio (LAZZARO, 1981). De donde resulta que si la acción del viento puede considerarse despreciable, en cambio, la temperatura del aire y la radiación incidente son los dos factores que intervienen más en las variaciones de la temperatura del agua.

ORSTOM Fonds Documentaire

N° :

36641, ex 2

Cote :

A

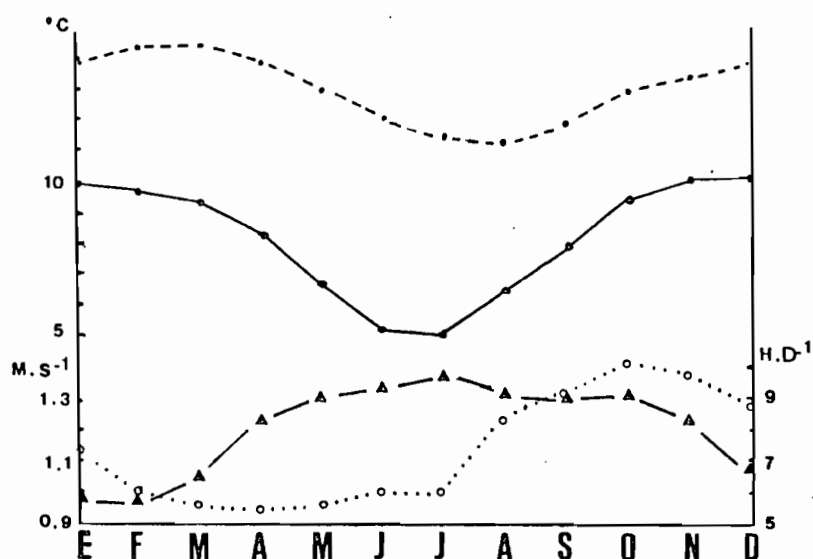


Fig. 1. - Arriba, variaciones anuales, de la temperatura del aire en Puno (línea) y del agua superficial en el Lago Mayor (guiones); abajo, variaciones anuales del tiempo de insolación (línea) y de la fuerza del viento a 2 m del suelo en Puno (puntos) (según CARMOUZE *et al.*, 1983).

La amplitud de las variaciones estacionales en superficie es más próxima de la del aire para las zonas menos profundas, y particularmente para el Lago Menor, del hecho de una inercia menor ligada a una menor profundidad.

Si la amplitud y la variación según la estación están bien correlacionadas a la del aire, el hecho de que la temperatura media anual sea de 13°C para los Lagos Mayor y Menor, cuando la temperatura media del aire en Puno (1964-1978) es sólo del orden de 8,1°C, implica intercambios y un funcionamiento térmico que no se encuentra en condiciones climáticas o de altitud más clásicas.

| | E | F | M | A | M | J | J | A | S | O | N | D | Prom. |
|------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Temp. aire | 9,95 | 9,77 | 9,33 | 8,44 | 6,71 | 5,26 | 5,07 | 6,43 | 7,90 | 9,40 | 10,10 | 10,15 | 8,21 |
| Temp. agua | 13,85 | 14,30 | 14,35 | 13,85 | 13,0 | 12,0 | 11,5 | 11,25 | 11,75 | 12,9 | 13,35 | 13,85 | 13,0 |
| Vel.viento | 1,14 | 1,03 | 0,96 | 0,95 | 0,97 | 1,08 | 1,06 | 1,23 | 1,32 | 1,42 | 1,39 | 1,28 | 1,15 |
| Tiempo sol | 5,8 | 5,8 | 6,6 | 8,5 | 9,1 | 9,4 | 9,7 | 9,1 | 9,0 | 9,2 | 8,5 | 6,8 | 8,12 |
| Radiación | 2.144 | 2.065 | 2.006 | 2.190 | 1.969 | 1.940 | 1.860 | 2.195 | 2.320 | 2.412 | 2.420 | 2.307 | 2.152 |

Cuadro 1. - Variaciones anuales de la temperatura del aire, de la temperatura del agua superficial en el Lago Mayor, de la velocidad del viento a 2 m del suelo en metros por segundo (CARMOUZE *et al.*, 1983), del tiempo de insolación diaria en h.j-1 (BOULANGE y AQUIZE-JAEN, 1981) y de radiación global incidente diaria en J.cm².j-1 (LAZZARO, 1981). Con excepción de las temperaturas del agua medidas en el Lago Mayor, las observaciones provienen de la estación meteorológica de Puno (Perú)

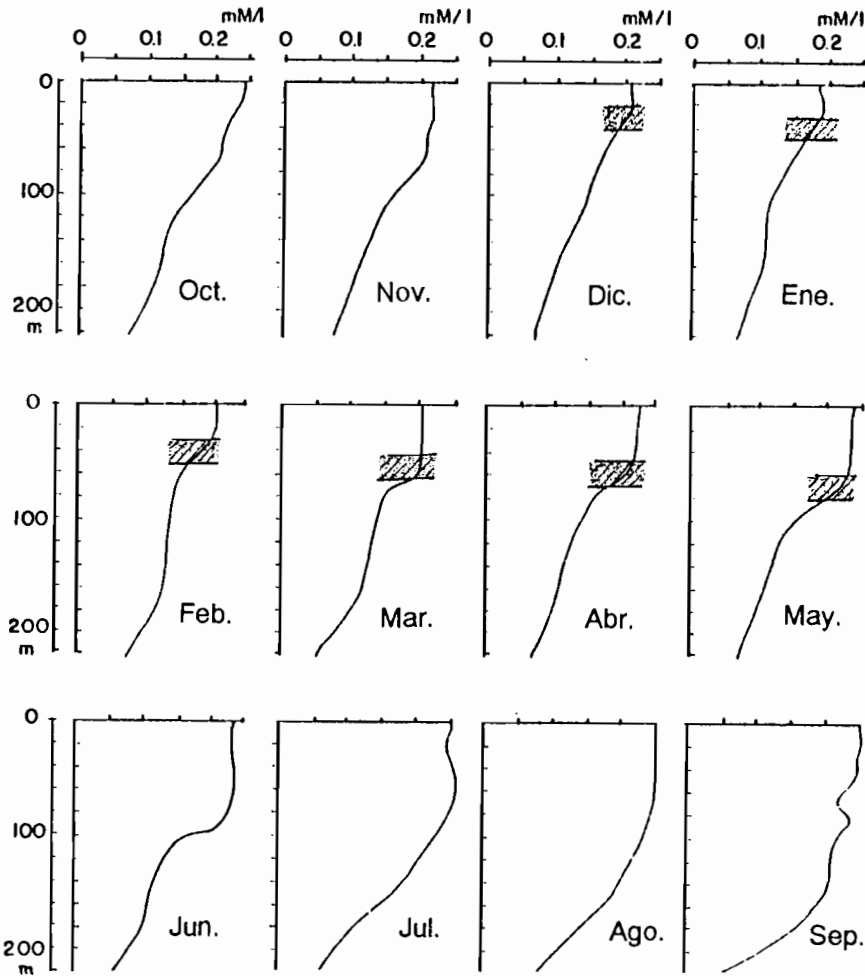


Fig. 2. - Perfiles verticales medios mensuales de las concentraciones en oxígeno disuelto de las aguas. La zona rayada indica la posición de la termoclina (CARMOUZE *et al.*, 1984).

Variaciones horizontales

La diferencia de amplitud de variación de las temperaturas de superficie se traduce por variaciones horizontales : el Lago Menor es más frío que el Lago Mayor en invierno y más caliente en verano. Entre 1985 y 1987, por ejemplo, cinco series de observaciones cubriendo 47 estaciones del conjunto de la parte boliviana del lago (ILTIS, 1987) permitieron establecer que la temperatura media en la superficie era de 1 K más elevada en verano y 1,5 K más fría en invierno en el Lago Menor con relación al Lago Mayor. Estas diferencias se anulan evidentemente en los períodos de transición (abril y septiembre-octubre).

Variaciones verticales

En el Lago Mayor, un calentamiento de las aguas se produce a partir de octubre en la superficie y se propaga progresivamente hacia las capas más profundas con establecimiento de una termoclina bien marcada a partir de diciembre. Luego esta termoclina permanece hasta el mes de mayo para desaparecer de junio a septiembre (fig. 2). Los datos publicados tratan de los primeros cien metros durante el período 1976-1978 (CARMOUZE *et al.*, 1984). Sin embargo parece que la mezcla no es total hasta el fondo o, por lo menos, que la circulación es más reducida : para una

temperatura de 11°C, el porcentaje de saturación en oxígeno no sobrepasa los 70 % a 180 metros al final del período de circulación (septiembre).

Teniendo en cuenta los datos disponibles, el lago Titicaca puede colocarse en la categoría de los lagos monomícticos calientes de la clasificación de HUTCHINSON (1957), la mayor parte del Lago Menor y las bahías poco profundas (= a 20 m) siendo de tipo polimíctico.

Contenido en oxígeno disuelto

Los primeros factores de control de la concentración en oxígeno disuelto son la presión atmosférica y la temperatura.

A la altitud del lago Titicaca, la presión media es de 646 hPa (para aproximadamente 1.020 hPa al nivel del mar). La temperatura relativamente baja de las aguas compensa en parte este efecto de presión y se tiene así una concentración de saturación del orden de 7 mg.l⁻¹. Una curva de saturación para la gama de temperaturas encontradas en el lago, calculada según MONTGOMERY *et al.* (1964), está representada en la figura 3.

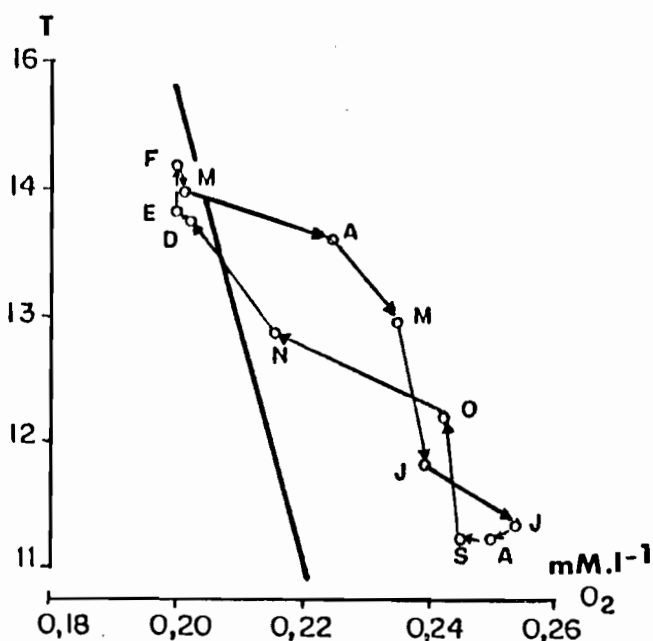


Fig. 3. - Relación en las aguas de superficie entre las concentraciones medias mensuales en O₂ disuelto expresadas en mM.l⁻¹ y las temperaturas correspondientes expresadas en grados Celsius. El segmento de la derecha delimita respectivamente a la derecha y a la izquierda los campos de sobre-saturación y de sub-saturación de las aguas en oxígeno (CARMOUZE *et al.*, 1984).

En el Lago Menor, las aguas superficiales tienen concentraciones próximas a las que corresponden al equilibrio durante todo el año (> 95 % de saturación). Los valores más altos registrados en invierno se deben al aumento de solubilidad del oxígeno que acompaña la disminución de la temperatura de las aguas. En la fosa de Chúa, durante la estratificación estival, el hipolimnio, privado de intercambios, sólo contiene 1 a 2 mg.l⁻¹ (LAZZARO, 1981) con anoxia en el fondo en marzo de 1979 y 1980.

En el Lago Mayor, los datos publicados para el período 1976-78 (CARMOUZE *et al.*, 1984) indican una evolución original (fig. 3) del porcentaje de saturación en oxígeno en el curso del tiempo para las aguas de superficie : el grado de saturación es sensiblemente más elevado en

período de circulación vertical que en período de estratificación. La inversa se produce generalmente para los lagos templados donde el período frío corresponde frecuentemente al período lluvioso. Aquí, por el contrario, lo esencial de las precipitaciones tiene lugar entre diciembre y marzo. Sin embargo, esta eventual correlación no explica la sobresaturación en julio-agosto-septiembre.

Los perfiles verticales de oxígeno disuelto, de tipo ortógrado, indican un déficit relativo en el hipolimnio durante el período de estratificación del Lago Mayor. En el curso del período 1976-78 (CARMOUZE *et al.*, 1984), la circulación vertical de julio a septiembre no basta para reoxigenar completamente las capas profundas. Es posible que la variación interanual de los principales factores climáticos se traduzca por una inversión más o menos eficaz de la masa de agua.

Transparencia

La transparencia medida con el disco de Secchi es más importante en el Lago Mayor que en el Lago Menor. En estos dos medios, sin embargo, la variabilidad espacial o temporal es importante.

En el Lago Menor, los valores extremos observados son 1,2 y 9 metros (LAZZARO, 1981 ; ILTIS, 1987) con transparencias más débiles en verano-otoño y más fuertes en invierno. A manera de ejemplo, cinco series de medidas efectuadas en 28 estaciones del Lago Menor muestran promedios de 4,7 m en junio de 1985, 4,5 m en diciembre de 1985, 5,6 m en abril de 1986, 5,4 m en octubre de 1986 y 3,2 m en febrero de 1987.

La relación entre la transparencia al disco de Secchi (S ; m) y el coeficiente K de atenuación vertical (PAR, base Ln, captor plan) es $K.S = 1,12$.

Excepto en las zonas más profundas del Lago Menor (fosa de Chúa), la zona eufótica (euphotic depth) está frecuentemente limitada por el fondo. En Chúa, la atenuación de la luz depende estrechamente de la concentración en fitoplancton. En las otras estaciones, principalmente por la proximidad del fondo, otras partículas en suspensión juegan un rol importante (LAZZARO, 1981).

En el Lago Mayor, RICHERSON *et al.* (1977) citan valores variando entre 4,5 y 10,5 m. Observaciones hechas en 1982 indican un máximo de 13,3 m mientras que, en 1984-85, el promedio era de 15,7 m (ALFARO y RONCAL, unpublished data). En la parte boliviana del Lago Mayor, cinco series de medidas, cubriendo cada una 19 estaciones, muestran un promedio de 11,8 m en junio de 1985, 11,9 en diciembre de 1985, 13,2 en abril de 1986, 12,4 en octubre de 1986 y 13,9 en febrero de 1987, los valores extremos siendo 7,5 y 18,5 m (ILTIS, 1987). Estos valores concuerdan con los de las 4 series de observaciones (QUINTANILLA *et al.*, 1987) realizadas entre agosto de 1984 y mayo de 1985 donde los promedios se situaban entre 11,3 y 14,6 metros.

Características químicas

pH

Los valores del pH en superficie son relativamente estables. En el Lago Menor, LAZZARO (1981) señala valores comprendidos entre 8,55 y 8,65 (1979-80). Entre 1985 y 1987, se ha observado en 28 estaciones valores medios de 8,68 en diciembre de 1985, 8,40 en abril de 1986, 8,38 en octubre de 1986 y 8,31 en febrero de 1987 ; los valores extremos observados eran 8,06 y 9,38 (ILTIS, 1987).

En la parte peruana del Lago Mayor, RICHERSON *et al.* (1977) señalan para 1973 unos pH de 8,6 en período estratificado y de 8,5 en período de isoterma. Los promedios observados en 19 estaciones de la parte boliviana son de 8,48 en diciembre de 1985, 8,30 en abril de 1986, 8,31 en octubre de 1986 y 8,20 en febrero de 1987 (ILTIS, *ibid.*).

Los pH son en promedio un poco más elevados en el Lago Menor que en el Lago Mayor, posiblemente debido a una actividad fotosintética más alta del fitoplancton y de las muy abundantes macrofitas bénticas.

Contenido global en sales disueltas

Fue medido por intermedio de la conductividad eléctrica a 25°C. En el Lago Menor, el promedio de 16 medidas efectuadas en abril de 1985 se eleva a 1.343 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. Series de 28 medidas indican luego los siguientes valores : 1.521 en diciembre de 1985, 1.368 en abril de 1986, 1.490 en octubre de 1986 y 1.366 en febrero de 1987. En la parte boliviana del Lago Mayor, el promedio de 19 medidas es de 1.501 μS en diciembre de 1985, 1.448 en abril de 1986, 1.490 en octubre de 1986 y 1.409 en febrero de 1987 (ILTIS, *ibid.*).

Así como para la temperatura, los promedios encontrados para cada una de las dos cuencas lacustres presentan variaciones más marcadas en el Lago Menor donde la desaladura en el momento de la época de lluvias y la concentración en sales durante la época seca son más acentuadas que en el Lago Mayor. En épocas intermediarias, como por ejemplo en octubre de 1986, la conductividad es idéntica en los dos medios. Las estaciones situadas a proximidad de la desembocadura de los ríos Catari, Tiwanaku y Suhez presentan conductividades inferiores de 100 a 300 μS a las de las otras estaciones.

Las mineralizaciones en sales disueltas señaladas para el Titicaca varían según los autores entre 1,2 (LAZZARO, 1981), 1,03 (HEGEWALD *et al.*, 1976) y 0,78 $\text{g}\cdot\text{l}^{-1}$ (RICHERSON *et al.*, 1977).

Composición química de las aguas

Ha sido analizada por diferentes autores : NEVEU-LEMAIRE (1906), POSNANSKY (1911), GILSON (1964), LÖFFLER (1960), RICHERSON *et al.* (1977), HEGEWALD *et al.* (1976-1980) y CARMOUZE *et al.* (1981) (cuadro 2). Las aguas presentan una facies cloro-sulfatada sódica ; la clasificación de los cationes se efectúa de la siguiente manera : $\text{Na} > \text{Ca} > \text{Mg} > \text{K}$.

| | NEVEU- LEMAIRE 1903 | POSNANSKY 1908 | GILSON 1937 | LÖFFLER 1954 | RICHERSON <i>et al.</i> 1973 | HEGEWALD <i>et al.</i> 1974-77 | CARMOUZE <i>et al.</i> 1977 |
|-----------------|---------------------------|-------------------|----------------|-----------------|------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| Ca | 64,6 | 68,7 | 65,4 | 54,3 | 64,0 | 62,0 | 65,2 |
| Mg | 18 | 16 | 34,5 | 41 | 36 | 36,4 | 35 |
| Na | 261 | 240 | 167,7 | 176 | - | 205,0 | 178,9 |
| K | 8 | 4 | 14,9 | 14 | - | 21,7 | 15,4 |
| SO ₄ | 392 | 285 | 246,2 | 251 | 282 | 265,7 | 253,4 |
| Cl | 287 | 339 | 247 | 244 | 260 | 272,0 | 253,8 |

Cuadro 2. - Composición iónica (en $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$) de las aguas del Titicaca según las dosificaciones publicadas por diferentes autores (la fecha mencionada es la del año de muestreo).

Nitratos y fosfatos son objeto de un sub-capítulo especial (*cf. infra*).

Respecto a la sílice, la mayoría de los valores publicados están comprendidos entre 0 y 2,6 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ con un promedio representativo de 1,8 mg (CARMOUZE *et al.*, 1981).

En el Lago Menor, las concentraciones en sílice varían entre 0,2 y 1,8 $\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$ en el curso del ciclo anual en los primeros cinco metros. Los valores máximos son obtenidos durante la mezcla

invernal, en las estaciones profundas. En los lugares donde la profundidad es inferior a 5 metros, los contenidos son débiles durante todo el año.

LÖFFLER (1960) indica contenidos variando entre 0,5 y 1 mg de SiO₂ en la bahía de Puno. Según RICHERSON *et al.* (1977), como resultado de observaciones sobre un solo ciclo anual, el contenido en sílice en el epilimnio varía en la parte peruana del Lago Mayor entre 0,49 y 1,18 mg.l⁻¹ de enero a fines de mayo, luego disminuye rápidamente (= 0,18 mg.l⁻¹). En el hipolimnio, durante toda esta época (enero a 15 de junio), los contenidos varían entre 1,82 y 2,60 mg. En julio, en el momento de la uniformización térmica, la concentración en sílice de las aguas de superficie se sitúa entre 0,28 y 0,46 mg.l⁻¹, mientras que la de las aguas profundas desciende a 0,34 mg.l⁻¹. De septiembre a fines de año, el contenido en sílice se eleva lentamente en la capa superior y más rápidamente en profundidad donde el valor más alto (3,7 mg.l⁻¹) se observa a 150 metros a fines de año.

Entre los elementos-trazas, DERKOSH y LÖFFLER (1961) citan la presencia de boro, de hierro y de plomo, de trazas de cromo, de manganeso, de aluminio y de arsénico. Están ausentes el cobalto, níquel y vanadio. GILSON (1964) señala la presencia de litio (0,9 mg.l⁻¹) y de aluminio (0,4 mg.l⁻¹). HEGEWALD *et al.* (1976) y HEGEWALD y RUNKEL (1981) indican, en el agua de la bahía de Puno, trazas de hierro, de cobre, de zinc y 0,26 mg.l⁻¹ de aluminio.

Conclusiones

El análisis de las características físico-químicas de las aguas del Titicaca revela, en el curso del año, una variabilidad reducida de los diferentes parámetros del medio lacustre que puede considerarse por este hecho prácticamente estable.

La amplitud de variación de las temperaturas de superficie en el curso del año es relativamente débil (3 K) con respecto a la observada en los lagos africanos a la misma latitud (TALLING, 1969). Esto se explica parcialmente por la altitud, pero también por el clima: el período de lluvias interviene en el curso del verano y la insolación invernal compensa pues en parte la disminución de temperatura del aire.

Las zonas profundas (Lago Mayor, fosa de Chúa) tienen un comportamiento monomítico caliente mientras que las zonas menos profundas (Lago Menor, bahía de Puno) pueden ser asimiladas a medios relativamente individualizados con régimen polimítico y con variaciones estacionales más marcadas.

Respecto al índice de oxigenación en el fondo del Lago Mayor (y en Chúa en el Lago Menor), los datos se extienden raramente a más de un año. Las variaciones interanuales de los contenidos en oxígeno del fondo, tanto en período de estratificación como en período de circulación, no son conocidas.

El contenido en sales disueltas, relativamente elevado, es atribuido a la fuerte erosión de la cuenca vertiente. Su estabilidad está asegurada por un tiempo de permanencia importante de las aguas en el lago.

En las extensas zonas poco profundas que representan el Huiñaimarca o la bahía de Puno, y que son relativamente aisladas de la masa central del Lago Mayor, las variaciones de algunos parámetros pueden alcanzar amplitudes más elevadas ya que estas regiones están influenciadas por condiciones locales particulares (desembocaduras de ríos, presencia o ausencia de macrofitas inmersas...) que las vuelven heterogéneas. Resulta que la mayoría de las variables estudiadas presentan diferencias más grandes, en relación a los valores medios, que en el Lago Mayor.