

IV.1 Climatología e hidrología de la cuenca del lago Titicaca

MICHEL A. ROCHE, JACQUES BOURGES, JOSE CORTES, ROGER MATTOS

Dos sistemas hidrológicos activos y separados se distinguen en la cuenca endorreica del Altiplano : el lago Titicaca (3.809,5 m) que se vierte en el lago Poopó (3.686 m) por intermedio del río Desaguadero, el que a su vez desagua en el salar de Coipasa (3.657 m) durante los períodos de aguas altas y el salar de Uyuni (3.653 m) que recibe el río Grande del Lipez (fig. 1). Las posibilidades de comunicación entre estos dos sistemas se presentan para niveles de agua superiores a los que fueron observados en 1986. El lago Titicaca es, actualmente, la única extensión de agua superficial importante realmente perenne.

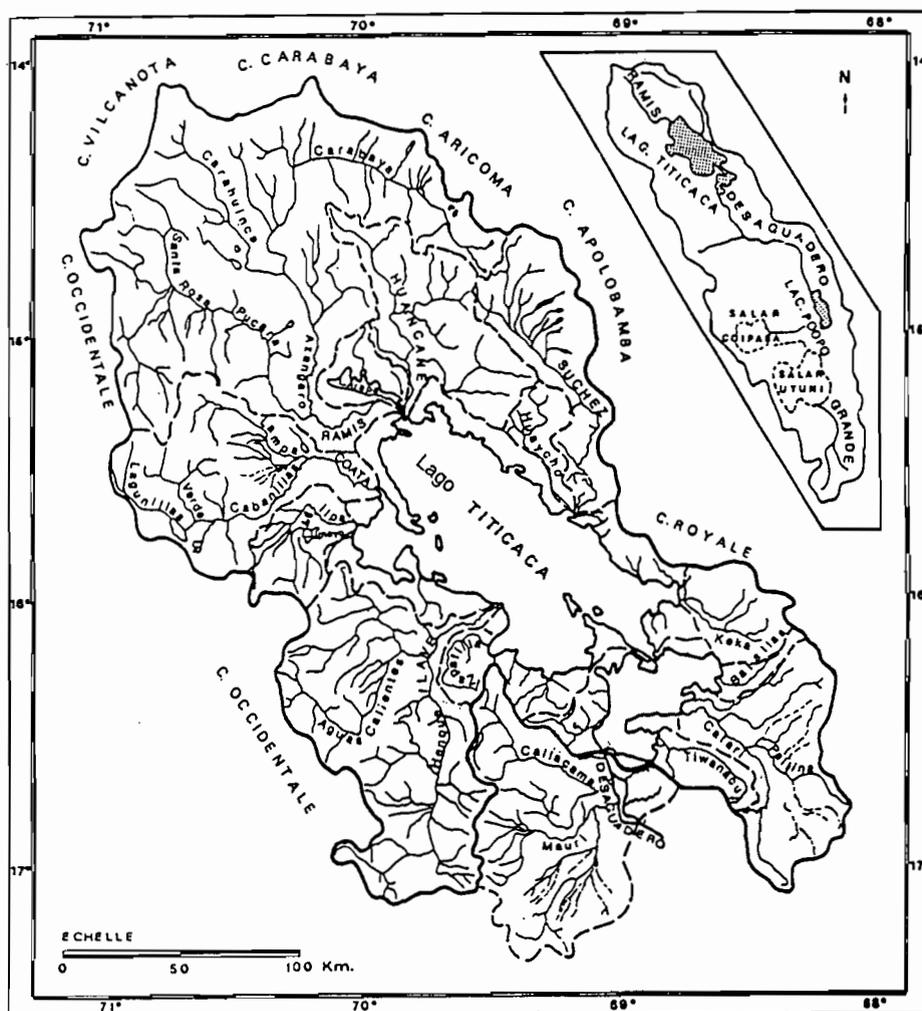


Fig. 1. - Sistemas hidrológicos del Altiplano boliviano-peruano. Hidrografía de la hondonada del lago Titicaca.

ORSTOM Fonds Documentaire
 N° 36610, ex 2
 Cote A

La superficie total de la hondonada del lago Titicaca, hasta el comienzo del Desaguadero es de 57.500 km², incluidas las aguas superficiales, 1/4 de las cuales están en Bolivia y 3/4 en el Perú.

La superficie de la cuenca de drenaje es de 49.010 km², o sea 85 % de la cuenca total, 1/5 de la cual situada en Bolivia y 4/5 en el Perú. Las tres cuartas partes de la cuenca vertiente del lago están drenadas por seis ríos (cuadro I) : los ríos Ramis (31 %), Ilave (15 %), Coata (11 %), Catari (7 %), Huancané (7 %) y Suchez (6 %).

Una proporción del 4 % de la hondonada está situada a una altitud comprendida entre 5.000 y 6.400 m. La planicie del Altiplano representa 28 %, en tanto que el lago mismo se extiende sobre 15 % de la superficie. La pendiente media de los tributarios puede variar de 35 m km⁻¹, en la parte superior de la cuenca, a 0,8 m km⁻¹ en su curso inferior. La longitud de los principales ríos está comprendida entre 120 y 180 km, con excepción del río Ramis que mide 283 km.

El perímetro del lago es de 915 km. Si se supone una fluctuación máxima interanual repartida sobre todo su contorno de ± 200 m alrededor de una posición media de la orilla, y tomando en cuenta una superficie de 8.490 km², la variación de superficie correspondiente sería de $\pm 2,0$ % para el período 1968–1987. No se ha podido aplicar esta corrección en los cálculos relativos a la hidrología del lago por su incertidumbre y ausencia de calibración.

Funcionamiento y balance hidrológico del lago Titicaca

El nivel del lago Titicaca, además de una fluctuación anual, tiene también variaciones a la escala plurianual. Desde 1914, el intervalo de variación es de 6,37 metros.

El lago es alimentado por los aportes de los ríos de su contorno y por las lluvias que caen directamente en su superficie. Las pérdidas se deben a la evaporación y al desagüe superficial que sale por el Desaguadero. Algunos autores (CARMOUZE y AQUIZE JAEN, 1981 ; LOZADA, 1985) conciben una infiltración de las aguas por el fondo del lago, la cual contribuiría a la evacuación de las sales disueltas, en complemento de la evacuación superficial por el río Desaguadero y de la sedimentación físico-química y bioquímica en el lago mismo. Sin embargo, en la orilla, las capas freáticas están en carga con relación al nivel de agua libre (GUYOT *et al.*, 1990) y así contribuyen a la alimentación del lago.

Las variaciones plurianuales de las precipitaciones en la hoya, y la evaporación, determinan así las variaciones del plano de agua. Las pérdidas están también reguladas por los fondos elevados ubicados entre el principio del río Desaguadero (Puente Internacional) y la extremidad inferior de la laguna Lucuchala que corresponde al ensanchamiento de este río hasta unos 30 km del lago (Aguallamaya). A la salida del lago, la sección del exutorio es un paso de forma aproximadamente triangular cuyo fondo está a una altitud de 3.803 m. No constituye siempre el paso de control hidráulico del escurrimiento que puede situarse río abajo. Las aguas vertidas por el lago toman el curso del Desaguadero que drena también hacia el sur otras cuencas vertientes del Altiplano. El sistema hidráulico de pasos y de planos de agua que controla la salida de las aguas del lago resulta complejo, particularmente en período de niveles bajos.

Si los aportes pluviales y fluviales hacen entonces subir el nivel de la laguna Lucuchala más rápidamente que el nivel del lago, se produce un escurrimiento a las dos extremidades, por una parte hacia aguas abajo del Desaguadero, y por otra parte hacia el lago. Esta alimentación del lago se prosigue hasta que su nivel permite el equilibrio hidráulico. La corriente se invierte entonces y el Desaguadero vuelve a su curso normal. Cabe subrayar que esta inversión de corriente es un fenómeno raro y breve que afecta solamente volúmenes de agua relativamente bajos respecto a los valores medios y a los balances.

El balance hídrico del lago Titicaca se escribe :

$$P + Qt + Qn = E + Qd + Qi + Qe + \Delta H$$

donde

- P = Precipitaciones sobre el lago,
 Qt = Aportes de los tributarios al lago, con $Qt = Pt - Et - Qef + \Delta n$, donde :
 Pt : es la precipitación sobre las cuencas de los tributarios,
 Et : la evapotranspiración real,
 Qef : la exportación artificial eventual fuera de la cuenca, a partir de los ríos,
 n : la variación algébrica del almacenamiento de la capa freática.

- Q_n = Aportes de las capas freáticas al lago,
 E = Evaporación de las aguas superficiales del lago,
 Q_d = Pérdidas superficiales por el exutorio que constituye el río Desaguadero,
 Q_i = Infiltraciones profundas del lago, si es que existen,
 Q_e = Exportación artificial eventual fuera de la cuenca, a partir del lago,
 ΔH = Variación algébrica del almacenamiento en el lago.

Clima del lago Titicaca

La climatología del lago Titicaca ha sido estudiada previamente por diversos autores entre los cuales ARCE (1966), DAVILA (1957), MONHEIM (1974), TAYLOR y AQUIZE (1983).

Todos los datos utilizados, tanto para las interpretaciones climáticas como hidrológicas, provienen de los Servicios Nacionales de Hidrología y de Meteorología (SENAMHI), de la Paz y Puno, quienes efectuaron las colecciones.

Temperaturas del aire

Temperaturas medias anuales

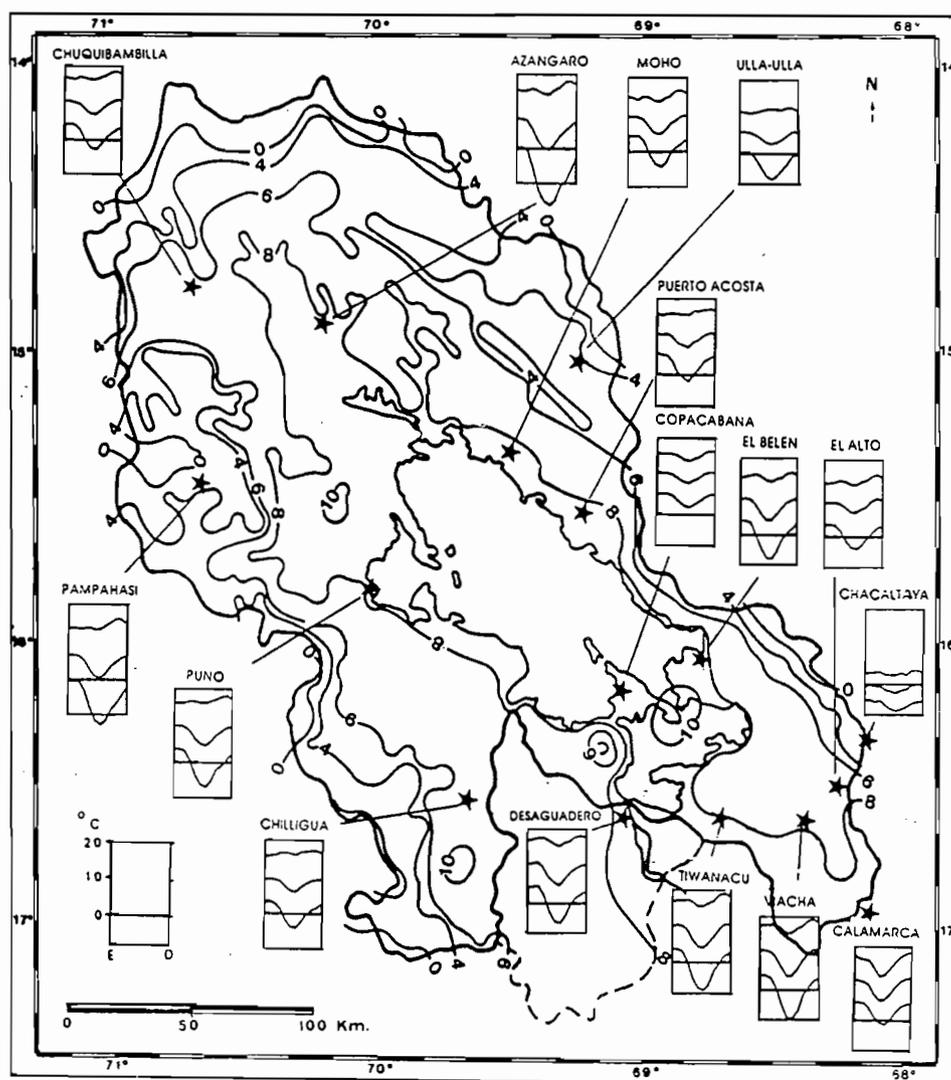


Fig. 2. - Mapas de las temperaturas medias interanuales ($^{\circ}\text{C}$) en la hondonada del lago Titicaca. Variación de las temperaturas mensuales medias, máximas, enero a diciembre.

En las zonas de altitud inferior a 4.000 m, las temperaturas medias anuales varían entre 7 y 10°C. Alrededor del lago mismo, las temperaturas son sin embargo superiores a 8°C. BOULANGE y AQUIZE (1981) evalúan que la temperatura media anual a nivel del lago debería ser de 0°C y atribuyen la diferencia de temperatura al efecto térmico de la masa de agua. No obstante, el mapa de las temperaturas medias anuales de Bolivia (ROCHE *et al.*, 1990) muestra también valores próximos a 8°C en toda la mitad este del Altiplano boliviano (7,3°C en Uyuni) y en el lago Poopó de influencia térmica más reducida. Se debe también notar que estaciones comprendidas entre 3.900 y 4.000 m, en los extremos sur y norte de la región del lago, tienen temperaturas del orden de 7°C. El lago tempera el clima sobre todo disminuyendo la amplitud de las temperaturas, pero no parece ocasionar en su contorno un aumento de la temperatura media anual superior a 2°C.

El mapa de curvas isotermas de la hoyada (fig. 2) fue trazado con la correlación establecida entre temperatura y altitud, y a partir del mapa de curvas de nivel. Los datos de algunas estaciones situadas fuera de la cuenca fueron también tomados en consideración para obtener una escala de altitudes la más amplia posible. El gradiente térmico es de 0,76°C 100 m⁻¹.

Para la zona comprendida entre 3.800 y 4.000 m, la dispersión de las temperaturas es grande debido a los efectos de exposición, de abrigo y de distancia al lago. En las cimas más altas que delimitan la cuenca, la temperatura media anual desciende bajo cero alrededor de 5.100 m.

En toda la cuenca, las temperaturas medias más bajas tienen lugar en julio, en pleno invierno, mientras que las más elevadas se sitúan de diciembre a marzo, generalmente centradas en febrero (fig. 2).

Temperaturas máximas y mínimas medias y amplitudes

La figura 2 muestra la variación de las temperaturas mensuales medias, máximas y mínimas en el curso del año en diferentes estaciones de la cuenca, ilustrando así la amplitud de temperatura sobre el conjunto de la cuenca.

La temperatura mínima media mensual se produce en julio. Por ejemplo, se nota valores de 1,8°C en Copacabana (3.810 m, a orillas del lago), y -11,8°C en Charaña (4.069 m, muy alejado del lago).

La temperatura máxima media mensual es respectivamente de 15,3°C y 3,6°C en estas dos estaciones. Se establece en octubre o noviembre ya que la nebulosidad es entonces menos fuerte que en pleno verano cuando se produce el máximo de precipitaciones. Por esta misma razón, un máximo secundario se observa en marzo-abril. En cambio, la temperatura mínima está centrada en el invierno ya que se produce de noche y depende así poco del tiempo de insolación.

Las amplitudes aumentan desde el lago, donde los valores mínimos son de 10,7°C, hacia las planicies.

Humedad relativa

La humedad relativa media anual en el contorno del lago varía de 50 a 65 %, para temperaturas de 8 a 10°C. Los valores más bajos, de 50 a 45 % se observan en el sur de la cuenca. De manera general, aumentan con la altitud, con un valor máximo de 83 % en Chacaltaya (5.200 m). La variación anual sigue la de las precipitaciones, con un máximo en enero o febrero, y un mínimo en julio. En Copacabana, estos dos valores son respectivamente de 70 % y 52 %.

Los vientos dominantes, de fuerza moderada, generalmente perturbados por brisas locales, son de sectores nordeste durante la época de lluvias y de sector oeste a sudoeste el resto del año.

Tiempo de insolación

La insolación a proximidad del lago es de 2.915 h año⁻¹ en Belén y de 3.000 h año⁻¹ en Puno. Se observan valores mínimos de respectivamente 167 y 180 h en enero y febrero, durante el máximo de las precipitaciones, mientras que valores máximos de 298 y 296 h se notan a mediados del invierno. La radiación solar global medida en el Altiplano en Viacha y Patacamaya tiene un valor medio de 8,8 mm día⁻¹ (VACHER *et al.*, 1989).

Precipitaciones

El conjunto de la información pluviométrica ha sido homogeneizado mensualmente y anualmente por el método del vector espacio-temporal (VECSPAT, Logicial CLIMAR2, ROCHE, 1988), que consiste en un tratamiento matricial, basado en la pseudo-proporcionalidad de los datos (HIEZ, 1972 ; ROCHE, 1988). Este método informatizado permite adquirir automáticamente datos completados, estimando los datos que faltan, o enteramente calculados.

El período común de homogeneización retenido para el establecimiento del balance hídrico es 1968-1987, las estaciones climatológicas siendo poco numerosas antes de 1968.

Repartición espacial y mecanismos de las precipitaciones

El mapa de las isohietas interanuales muestra la distribución espacial de las precipitaciones (fig. 3).

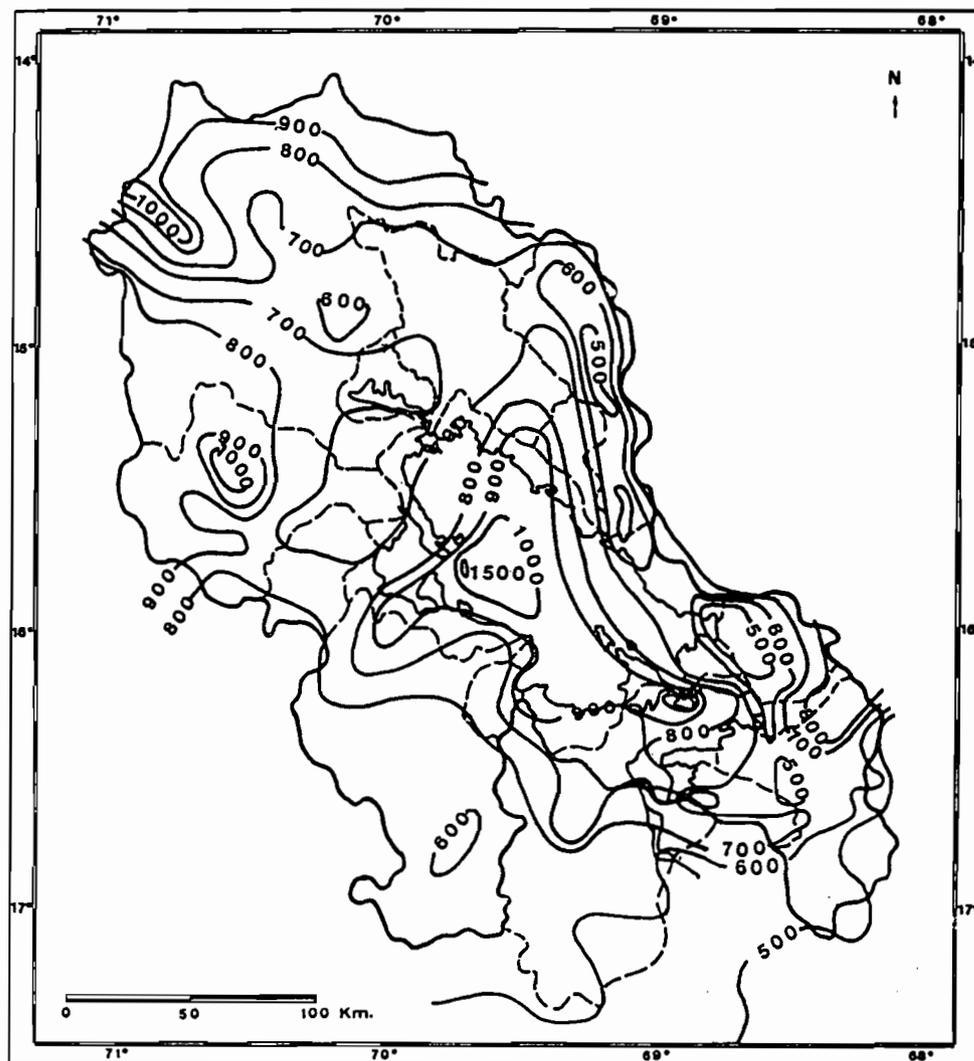


Fig. 3. - Precipitaciones medias anuales (mm) en la hondonada del lago Titicaca (período 1968-1987).

Las isohietas son globalmente concéntricas al lago, al centro del cual se observan precipitaciones superiores a 1.000 mm. Las lluvias tienden a disminuir cuando la distancia al lago aumenta, hasta mínimos de 600 a 500 mm. Luego nuevamente aumentan hacia las cimas de la

Cordillera Oriental donde los valores extremos pueden ser superiores a 800 mm, así como hacia el oeste, hasta las cimas del masivo de Pecajes Caranjas donde los máximos pueden sobrepasar los 1.000 mm.

Esta distribución espacial está determinada por la circulación regional de las masas de aire, y por la influencia de la orografía y de la importante masa de agua que representa el lago.

El aire amazónico húmedo desborda episódicamente de las cimas de la Cordillera Oriental situadas entre 4.500 m y más de 6.400 m, esencialmente en época de lluvias. Los alisios de sector nordeste llevan así el agua al sistema hidrológico, aunque en cantidad menor sobre la vertiente del Altiplano que sobre el flanco amazónico. Cuando la altitud disminuye en dirección del lago, la presión y la temperatura del aire aumentan, permitiendo una disminución de la humedad relativa; las precipitaciones disminuyen también.

Es particularmente notable el efecto de pantalla y de abrigo bajo el viento, asegurado por las cimas más altas. La masa de aire húmedo amazónico se encuentra bloqueada frecuentemente detrás de las cimas, pudiendo pasar generalmente las crestas menos elevadas del resto de la cuenca. La zona del río Suchez, abrigada por la Cordillera de Apolobamba cuya altitud sobrepasa los 6.000 m, recibe así pocas precipitaciones. Los mínimos de precipitación sobre la cuenca tienen lugar al sudoeste del Illampu y de la Cordillera de Apolobamba (Escoma : 507 mm, Belén : 452 mm).

La influencia del lago es consecuencia de su extensa superficie ligada a un volumen importante debido a las grandes profundidades. La fuerte capacidad de absorción de las radiaciones solares induce temperaturas de las aguas (10 a 14°C) netamente más elevadas que las del aire de las tierras circundantes. La restitución térmica por la masa de agua es entonces progresiva. Pasando por el lago, el aire se calienta enriqueciéndose al mismo tiempo en vapor de agua. Sufre entonces una ascensión, más fuerte durante la noche ya que el contraste de temperatura se acentúa entonces. Esta convección provoca tormentas más frecuentes sobre el lago que sobre las tierras, con un total superior a 800 mm, y pudiendo alcanzar más de 1.000 mm en el centro del lago. El máximo es observado sobre la isla de Taquili con 1.535 mm. Este valor único en la cuenca parece elevado, y se debe notar que el valor calculado es sólo de 1.272 mm. El aire húmedo del Lago Mayor puede atravesar el istmo de Yunguyo-Copacabana o el estrecho de Tiquina, para pasar al Lago Menor, provocando precipitaciones aún elevadas sobre la parte oeste de este último, en Desaguadero (797 mm) o en Tiquina (1.050 mm). En cambio, en la parte sudeste del lago, los vientos procedentes del NE afectan insuficientemente el Lago Mayor. En efecto, son desviados parcialmente por el masivo del Illampu o sufren una subsidencia sobre su flanco oeste. Asimismo, las partes sudeste del Lago Mayor y del Lago Menor son relativamente secas.

Precipitaciones medias ponderadas sobre las cuencas y sobre el lago Titicaca

Las alturas de lluvias medias mensuales, anuales, e interanuales fueron calculadas automáticamente ponderando las lluvias de las estaciones por las áreas de influencia de las estaciones (polígonos de Thiessen). Esto fue realizado para un período de 20 años (1968-1987), para 82 cuencas elementales, principales y agrupadas, a partir de los valores homogeneizados, completados por una parte y enteramente calculados por otra parte. Sólo son mencionados en detalle los valores completados.

La pluviometría interanual más baja de este conjunto alcanza 585 mm año⁻¹ en la cuenca del río Keka. La precipitación interanual más elevada es de 811 mm año⁻¹ en la cuenca del río Coata, y de 889 mm año⁻¹ en el Lago Mayor. Las precipitaciones medias interanuales (mm) en las cuencas principales están indicadas en el cuadro 1.

El conjunto de la cuenca recibe una precipitación de 758 mm año⁻¹, o sea un volumen de 43,6 x 10⁹ m³. La lluvia media interanual sobre la totalidad del lago es de 880 mm año⁻¹, o sea un volumen de agua de 7,47 x 10⁹ m³ año⁻¹, equivaliendo a un caudal de 236,7 m³ s⁻¹. El Lago Mayor recibe interanualmente 889 mm año⁻¹ de lluvia y el Lago Menor, con menores precipitaciones, 829 mm año⁻¹. Traducidas en volumen, éstos valores (6,42 x 10⁹ y 1,05 x 10⁹ m³ año⁻¹) corresponden a 86 % y 14 % de la alimentación pluvial del conjunto del lago.

Precipita 664 mm año⁻¹ sobre la parte boliviana de la cuenca, de los cuales 635 mm año⁻¹ sobre las cuencas y 753 mm año⁻¹ sobre el lago boliviano. Asimismo, la parte peruana recibe 786 mm año⁻¹, de los cuales 762 mm año⁻¹ sobre las cuencas y 964 mm año⁻¹ sobre el lago peruano. Expresadas en volumen, estos valores equivalen respectivamente a $9,01 \times 10^9$ m³, $6,48 \times 10^9$ m³, $2,54 \times 10^9$ m³, para Bolivia, y $34,5 \times 10^9$, $29,4 \times 10^9$, $4,94 \times 10^9$ m³ año⁻¹ para el Perú. Se observa así que las partes boliviana y peruana del lago reciben en alimentación directa, respectivamente 34 % y 66 % de la cantidad de lluvia caída en el conjunto del plano de agua.

Las cinco cuencas peruanas para las cuales se observaron los caudales, reciben juntas una precipitación media interanual de 769 mm año⁻¹, mientras que el resto de la cuenca recibe 682 mm año⁻¹.

Distribución temporal de las precipitaciones

La época de lluvias está centrada en enero (fig. 4). Comienza generalmente en diciembre para terminarse en marzo. La época seca, centrada en junio, se escalona de mayo a agosto. Dos períodos de transición separan estas dos épocas, uno en abril y el otro de septiembre a noviembre.

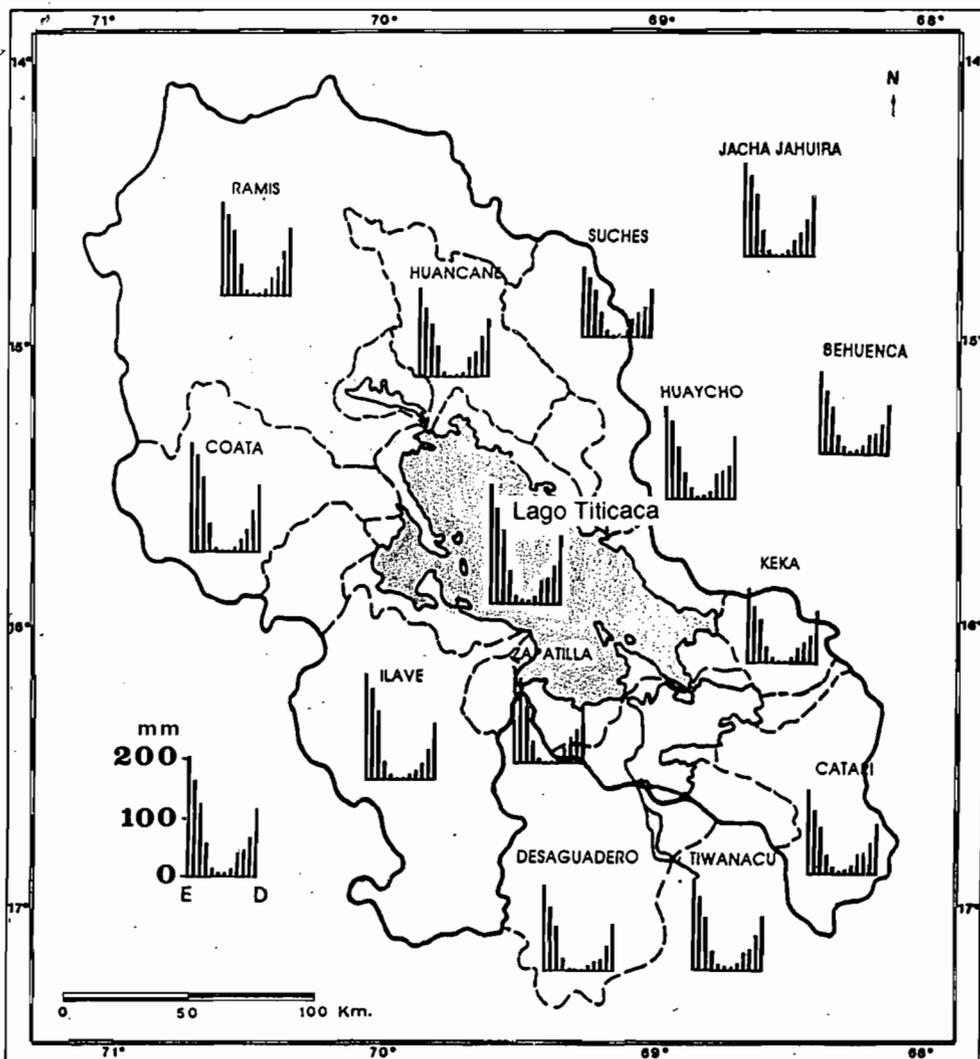


Fig. 4. - Distribución mensual media de las precipitaciones en la hondonada del lago Titicaca (período 1968-1987).

La figura 4 muestra, para las principales cuencas, la variación mensual de las precipitaciones interanuales. El régimen pluviométrico para el conjunto del sistema aparece homogéneo. Según las cuencas, 65 a 78 % de la precipitación anual se acumulan durante los cuatro meses de la época de

lluvias, mientras que solamente 3 a 8 % intervienen durante la época seca. Los dos períodos intermedios corresponden a una participación de 18 a 29 %. Para el conjunto de la cuenca costera, estos valores respectivos son de 70 %, 5 % y 25 %. Son los mismos en el lago y por consiguiente sobre el conjunto de la cuenca del Titicaca.

La lluvia mensual máxima observada sobre el lago alcanzó valores de 300 a 450 mm, según las estaciones, con un promedio ponderado de 353 mm, en enero de 1984, período particularmente lluvioso.

Hidrología de la cuenca del lago Titicaca

La hidrología del lago Titicaca, y particularmente los términos de entrada y de salida de su balance hidrológico medio anual han sido estudiados anteriormente por diversos autores (MONHEIM, 1956 ; BAZOBERY, 1969 ; KESSLER, 1970 ; RICHEISON *et al.*, 1977 y CARMOUZE *et al.*, 1977; CARMOUZE y AQUIZE, 1981). Las evaluaciones pueden conducir a resultados sensiblemente diferentes según la precisión de los tratamientos de datos y los períodos tomados en consideración.

Caudales de los tributarios

Repartición espacial de los aportes fluviales al lago

En el Perú, los caudales medios mensuales han sido registrados para siete estaciones hidrométricas, cinco de las cuales permiten evaluar los aportes fluviales directos al lago. Se trata de los ríos Ramis, Ilave, Huancané en Puente Carretera, del río Coata en Maravillas, y del río Zapatilla en Puente Carretera (fig. 5). Los cuatro primeros controlan ríos que están entre los más

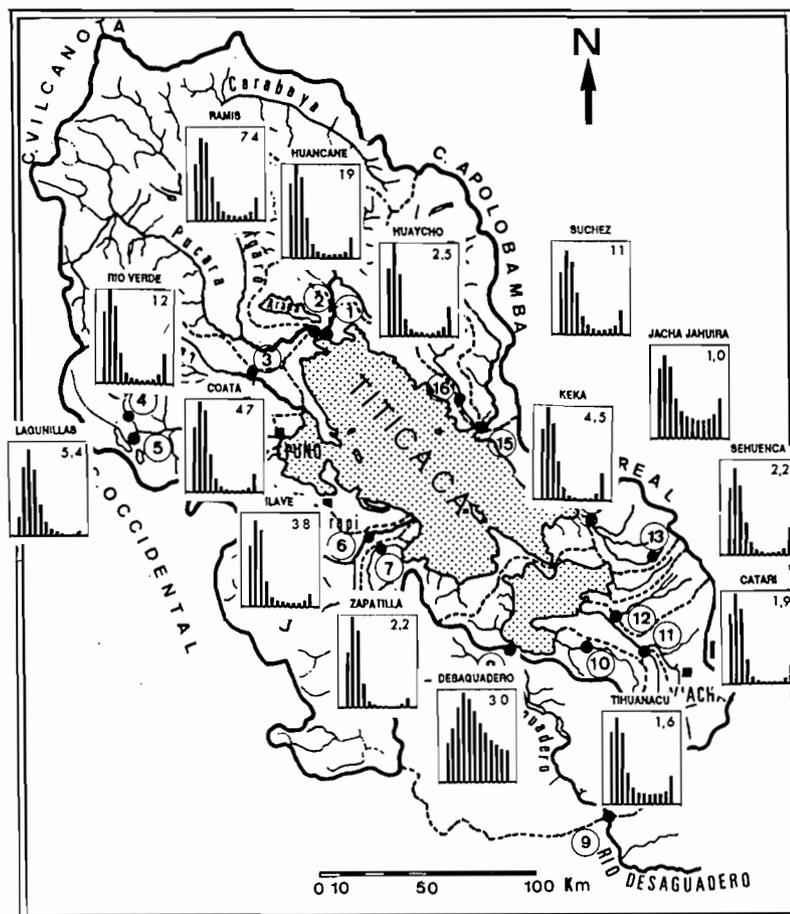


Fig. 5. - Red hidrográfica de la cuenca del lago Titicaca y ubicación de las estaciones hidrométricas. Variación de los caudales medios mensuales interanuales para cada estación.

importantes del sistema. Dos estaciones, incluidas en la cuenca de Coata, están instaladas cerca de los ríos Lagunillas en Lagunillas y Verde en Verde. Las proporciones de superficie de estas cuencas observadas con relación a la superficie total de las cuencas peruanas es de 80,3 %, y con relación al conjunto de la cuenca total del lago, de 63,5 %. El período de observación comienza generalmente en 1956.

En Bolivia, siete cuencas fueron tomadas en consideración : el río Suhez en Escoma, el Huaycho en Puerto Acosta, el Keka en Achacachi, el Catari en Tambillo, el Sehuenca en Villa Iquiaca, el Jacha Jahuirra en Hichu-Kkota, y el Tiwanacu en Tiwanacu (fig. 5). Estos datos abarcan períodos más cortos que los de los datos del Perú. En estas estaciones, Bolivia observa 6.470 km² de cuenca vertiente, de la cual 1.630 km² están situados en el Perú. Bolivia asegura así el control de 47,4 % de su propia cuenca y 13,3 % de la cuenca vertiente total del lago. Los caudales se observan finalmente sobre 76 % de la cuenca de drenaje binacional.

En la superficie restante, no observada, 4.400 km² son representados por cuencas (Pallina, Batallas, etc...) de características similares, y 7.100 km² están constituidos de pequeñas cuencas para las cuales se calculó el escurrimiento a partir de la pluviometría. Según este modo de cálculo, el volumen anual de aportes al lago, entre 1968 y 1987, varía de 3,11 x 10⁹ m³ en 1983 a 15,78 x 10⁹ m³ en 1986, el promedio situándose alrededor de 8,90 x 10⁹ m³. Sobre la base de los caudales observados para las cinco grandes cuencas, el promedio de los aportes para el período 1956-1987 sería de 8,09 x 10⁹ m³, correspondiendo a un módulo de 256 m³ s⁻¹.

Ha sido también aplicado otro modo de evaluación. Después de la homogeneización de los datos por el método VECSPAT, los caudales desconocidos son evaluados automáticamente a partir de los del grupo de cuencas peruanas observadas, tomando en cuenta las relaciones de las superficies (caudales específicos), de las lluvias y de los coeficientes de escurrimiento anuales determinados. Los valores obtenidos con un coeficiente de escurrimiento medio (KE) de 22 % para las cuencas no observadas, fueron retenidos. Para el período 1968-1987, los aportes anuales medios son de 8,51 x 10⁹ m³ o sea 270 m³ s⁻¹, valor próximo de la evaluación anterior. Este aporte fluvial, relacionado con la superficie del lago equivale a una lámina de agua de 1.002 mm. La proporción de los caudales observados representa entonces 71 % del total. Los resultados del cuadro I, comparables con los del cuadro II, fueron así obtenidos por diferentes conjuntos de cuencas. Los caudales estimados, con coeficientes de arroyos de 15 a 25 % para el complemento de cuenca no observada, varían de 250 a 290 m³ s⁻¹, equivaliendo a láminas de agua en el lago de 930 a 1.080 mm.

	SUPERFICIE km ²	LLUVIAS mm	MODULO			KE			DE mm
			m ³ s ⁻¹	10 ⁶ m ³	%	mm	l s ⁻¹ km ⁻²	%	
Ramis*	15.060	795,4	78,1	2464,1	29,0	163,6	5,2	22,2	632
Coata*	4.650	885,5	46,6	1470,9	17,3	316,4	10,0	35,7	569
Ilave*	7.290	699,6	42,7	1346,2	15,8	184,8	5,9	26,4	515
Huancané*	3.580	714,4	20,8	655,7	7,7	183,3	5,8	25,7	531
Zapatilla*	440	823,2	2,3	71,3	0,9	161,7	5,2	19,6	661
Cuenca Perú*	31.010	769,0	190,4	6007,3	70,6	193,7	6,1	25,2	575
Complemento	18.000	628,4	79,3	2501,1	29,4	139,0	4,4	22,0	489
Total cuenca	49.010	736,2	269,7	8508,4	100,0	173,6	5,5	23,6	563

* observado

Cuadro 1. - Balances hídricos de las cuencas tributarias del lago Titicaca (1968-1987)

Coefficientes de escurrimiento y caudales específicos

Para el conjunto de las cuencas peruanas observadas, el coeficiente de escurrimiento medio es de 25,2 %, con, un máximo, por cuenca elemental, de 38,3 % (Coata) y un mínimo de 19,6 % (Zapatilla). Según las evaluaciones precedentes, el coeficiente de escurrimiento medio del conjunto de la cuenca del lago es de 23,6 %.

Los caudales específicos se reparten en dos zonas :

- El norte y el oeste donde los caudales específicos medios son próximos a $5,5 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$, con excepción del Coata que presenta un caudal específico de $10 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$.
- El sur y el este que cubren principalmente el territorio boliviano donde los caudales específicos son de 3 a $4 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$, con excepción del Sehuencas que alcanza $6 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$.

Los aportes más bajos provienen de las zonas menos lluviosas, situadas en la franja oriental, y de las cuencas situadas en el Altiplano donde los bajos relieves perjudican el escurrimiento en beneficio de la infiltración y de la evapotranspiración. En las zonas de fuerte pluviosidad y de relieve acentuado, los caudales específicos son de $15 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$. Sin embargo, en cuencas de altitud también elevada como la de la cuenca del Suchez ($3,7 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$), estos caudales pueden ser relativamente bajos debido a las débiles precipitaciones y de la fuerte retención de las aguas por los terrenos fluvio-morénicos o por las turberas. La influencia de los relieves, tanto por la pendiente que crean como por su rol de pozo de agua, es pues evidente sobre el escurrimiento, lo que explica que el caudal específico del río Sehuencas, que desciende directamente de la cordillera para desembocar en el lago, sea más elevado que el del río Keka que se pierde parcialmente en la planicie.

Pese al relieve, los caudales máximos diarios no son muy elevados. Se sitúan para el año medio entre 20 y $60 \text{ l s}^{-1} \text{ km}^{-2}$. La repartición espacial de estos caudales es idéntica a la de los módulos.

Variación temporal de los caudales

El histograma de los caudales mensuales interanuales (fig. 6) muestra un máximo de caudal en febrero, excepto para el río Ramis donde una leve superioridad aparece para el mes de marzo. Existe una diferencia de 1 a 2 meses en relación a las precipitaciones. Un total de 80 % de los aportes anuales llega al lago de enero a abril. Las lluvias tardías o precoces no tienen prácticamente influencia sobre el escurrimiento.

APORTE MENSUAL DE LAS 5 GRANDES CUENCAS
(1958 - 1987)

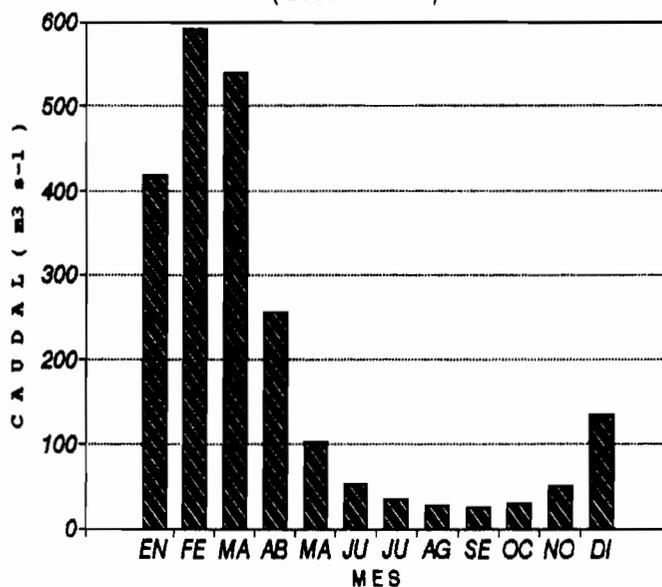


Fig. 6. - Variación de la suma de los caudales medios mensuales interanuales agrupados de los ríos Ramis, Huancané, Coata, Ilave y Suchez.

La variación temporal de los módulos resalta los bajos valores de los períodos 1956-1958, 1964-1967, y sobre todo de 1983, año afectado por la excepcional corriente El Niño (fig. 7). Asimismo, se distinguen módulos elevados para los años 1962-1963, 1974-1976 y 1984-1986,

durante los cuales los aportes son de 1,5 a 2 veces superiores al promedio. En concordancia con la importancia de los aportes pluviales al lago, estos aportes fluviales débiles o fuertes tienen influencia directa sobre las variaciones plurianuales del nivel del lago. El período 1956-1987 comprende un ciclo seco hasta 1974 seguido de un ciclo mucho más húmedo, particularmente de 1984 a 1986.

El análisis estadístico de la distribución de los módulos para el período 1956-1987, proporciona valores de diversas recurrencias (cuadro 2).

	Ramis	Ilave	Coata	Huancané	Suchez
Superficie (km ²)	15.060	7.290	4.650	3.580	3.170
Mínimo	25	10	11	5	4
Medio	74	38	47	19	11
Máximo	121	90	99	40	20
Cincuenta seco	36	13	15	8	6
Mediano	70	37	36	19	12
Cincuenta húmedo	140	100	90	42	24

Cuadro 2. - Módulos anuales observados y ajustados (m³ s⁻¹) ; período 1956-1987.

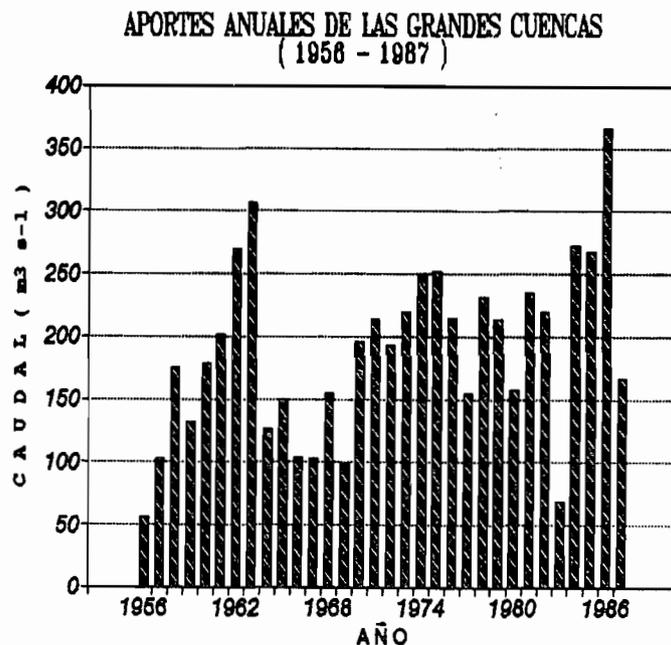


Fig. 7. - Caudal medio anual total de los ríos Ramis, Huancané, Coata, Ilave y Suchez.

El estudio de la distribución estadística de los caudales medios diarios máximos anuales da una indicación de los caudales excepcionales (cuadro 3) y muestra que, en el caso del Ilave y del Ramis, para un mismo caudal mediano, el caudal de recurrencia centenal puede ser dos veces más fuerte, mientras que la superficie de la cuenca es dos veces menor.

	Ramis	Ilave	Coata	Huancané	Suchez
Mediano	350	350	270	130	60
20 años	550	800	580	240	140
100 años	660	1.130	810	320	220

Cuadro 3. - Frecuencia de retorno de los caudales diarios máximos ($m^3 s^{-1}$). Período 1956-1987.

Caudales del exutorio del lago Titicaca

Los caudales del Desaguadero, medidos en Puente Internacional a la salida del lago, muestran lagunas que han sido completadas por interpolación. El módulo así evaluado es de $30,6 m^3 s^{-1}$ para el período 1968-1987.

Estos caudales han sido relacionados a los niveles del lago en Puno, para el período 1957-1988, luego reconstituidos en función de estos últimos valores, para reducir la fuerte heterogeneidad que aparece según los períodos. El módulo obtenido sobre la base de esta correlación es de $48,5 m^3 s^{-1}$, para el período 1968-1987.

Por otra parte, con el fin de paliar la incertidumbre sobre los caudales medidos en esta estación, los caudales fueron también estimados según aquéllos medidos en Calacoto, situado a 150 km río abajo, deducción hecha de la estimación de los aportes por la cuenca intermedia. El módulo es de $37,5 m^3 s^{-1}$ para este mismo período.

Se debe apreciar que el módulo puede variar del simple al doble entre los valores medidos a la salida del lago y los que son reconstituidos por uno u otro de los métodos precedentes.

La figura 8 ilustra la variación de los módulos anuales vertidos por el lago de 1956 a 1987.

DESAGUADERO EN PUENTE INTERNACIONAL
CAUDALES MEDIOS ANUALES CALCULADOS

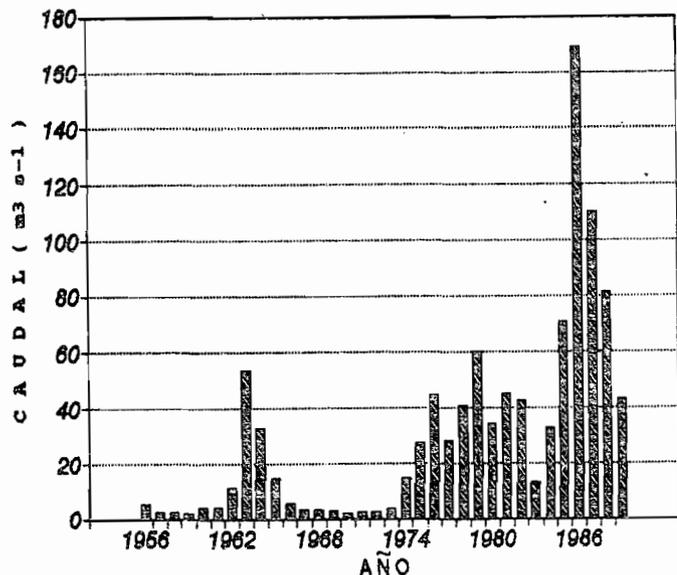


Fig. 8. - Variación de los caudales anuales calculados del río Desaguadero a la salida del lago Titicaca (1956-1989).

Para todo el período observado, se constata que los desagües anuales del lago aumentan por ciclos sucesivos, hasta el módulo máximo de $169 m^3 s^{-1}$ en 1986. El caudal diario máximo observado, de $250 m^3 s^{-1}$, tiene lugar en abril de este mismo año. El módulo vertido es muy variable ya que algunos años es casi nulo a "negativo" (1971-1973), mientras

que otros años (1986-1987) puede sobrepasar $100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, en período de niveles altos del lago. El promedio tiene pues una significación relativa puesto que si se saca de esta serie los cuatro años más fuertes, de 1985 a 1988, su valor se reduce a $19,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

El período 1956-1989 corresponde a un ciclo húmedo, sobre todo a partir de 1974, en comparación al conjunto del período observado que comienza en 1916 y que abarca particularmente los años más secos de 1935 a 1945. Para el primer período, la mediana es de $15 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ mientras que disminuiría a menos de $5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para el conjunto de la serie. El caudal medio anual de $10 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ se alcanzaría sólo un año sobre tres. El ajuste estadístico de los módulos indica $250 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para valor de recurrencia centenal. Para los caudales medios diarios máximos, el valor correspondiente de igual frecuencia sería de $350 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

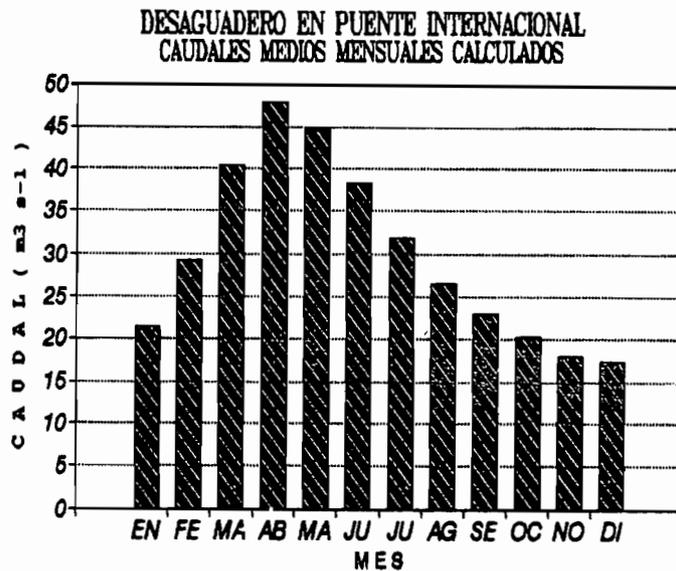


Fig. 9. - Variación de los caudales medios mensuales del río Desaguadero a la salida del lago Titicaca, para el período 1956-1989.

Debido a la inercia del lago, y a las condiciones climáticas, se observa el caudal mensual máximo a la salida en abril (fig. 9), mes del nivel anual más alto del lago, en tanto que los aportes de la cuenca vertiente son más importantes en febrero. La decrecida es luego más progresiva, a tal punto que los volúmenes evacuados en mayo son más abundantes que los de marzo. A causa de este efecto regulador del lago, solamente 60 % del volumen anual es vertido en el Desaguadero de enero a junio mientras que los aportes fluviales del conjunto de la cuenca equivalen a más de 85 % para el mismo período.

Niveles del lago Titicaca

La figura 10 muestra la variación de las alturas diarias en Puno, de 1914 a 1989. La altitud del cero de la escala limnigráfica es de 3.809,93 m.

La fluctuación anual es determinada por el juego de los aportes y de las pérdidas en agua. El máximo anual de altura está generalmente centrado en abril, al final del período de lluvias y del aporte elevado de los tributarios. El mínimo interviene generalmente en diciembre, justo antes de las lluvias importantes del año.

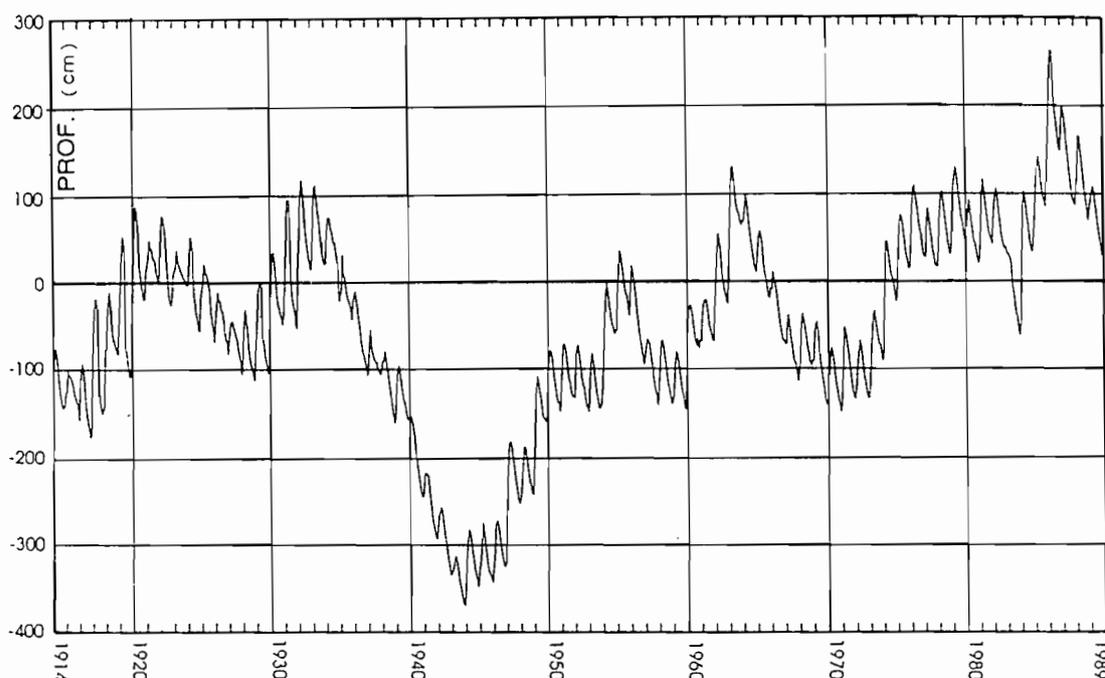


Fig. 10. - Variación de los niveles del lago Titicaca en Puno.

Para este mismo período, la amplitud interanual de variación del nivel fue de 6,37 m, con un mínimo minimorum de -3,72 m en diciembre de 1943 y un máximo maximorum de 2,65 m en abril de 1986, con relación al cero de la escala limnimétrica.

Las amplitudes de ciclo anual variaron entre 1,80 m (en 1986) y 0,04 m (en 1983).

Las diferencias de nivel en el curso de un mes son, en general, máximas en febrero, con un valor medio de 0,26 m. Corresponden entonces al fuerte ascenso de las aguas provocado por el máximo de los aportes globales de las lluvias y de los tributarios. Las diferencias mensuales mínimas de nivel tienen lugar generalmente en diciembre y abril, correspondiendo a los escalonamientos de los niveles mínimo y máximo anuales. El ascenso es más acentuado que el descenso debido al aporte concentrado esencialmente sobre 5 meses mientras que las pérdidas por evaporación están más regularmente repartidas a lo largo del año.

Volúmenes de agua del lago Titicaca

BOULANGE y AQUIZE (1981) estiman el volumen del lago en $895,9 \times 10^9 \text{ m}^3$ para el período 1964-1979 durante el cual el nivel de las aguas fue, en promedio, más bajo de 0,46 m que el del período 1968-1987. El aumento correspondiente es de $3,89 \times 10^9 \text{ m}^3$. Se retiene así para este último período, un volumen del lago de $900 \times 10^9 \text{ m}^3$. Teniendo en cuenta los aportes medios, el índice de renovación de las aguas es de 1,79 %, o sea un tiempo de residencia medio de 55,8 años. Los volúmenes del Lago Mayor, de $887,5 \times 10^9 \text{ m}^3$, y del Lago Menor, de $12,5 \times 10^9 \text{ m}^3$, son muy desiguales.

Establecimiento del balance hídrico, de la evapotranspiración de las cuencas y de la evaporación del lago Titicaca

La evapotranspiración y la evaporación reales son generalmente los términos del ciclo del agua que son los más difíciles de medir. Es el caso para el lago Titicaca y su cuenca, para los cuales hay

una incertidumbre sobre sus valores. En efecto, la medida o la evaluación puntual de estos términos, así como la extensión regional de los valores obtenidos, son muy delicados. Uno de los intereses del cálculo del balance hídrico es el de permitir la estimación de las pérdidas, que no salen por evacuación superficial de la hondonada, y que se considera como un valor aproximado de la evaporación. Según la ecuación del balance (párrafo 2), éstas equivalen a la suma algébrica de los otros términos.

En el caso del lago Titicaca y de su cuenca, el interés aumenta aún puesto que se trata de la evaluación regional de la evaporación real de un extenso plano de agua, y de la evapotranspiración real de un complejo terreno-cobertura de montaña de elevada altitud, en zona intertropical.

Los caudales que salen eventualmente por infiltración a través de los fondos del lago, así como aquéllos que entran por descarga de las capas en el lago, podrían ser integrados sin ninguna dificultad al balance si sus valores antagonistas fueran conocidos. No es el caso ya que estos fenómenos son mal comprendidos, aunque se pueda pensar que los aportes subterráneos, tales como los de las capas freáticas de orilla, que se manifiestan por fuentes y terrenos húmedos, son superiores a las eventuales pérdidas profundas del lago, bajo el Desaguadero, en dirección del lago Poopó. Estas ganancias o pérdidas eventuales no fueron pues consideradas en los cálculos. Se debe saber que un aporte de las capas freáticas tiende a ocasionar una subestimación de las pérdidas globales, y así del valor aproximado de la evaporación. Lo contrario es válido para las infiltraciones.

De este modo, diferentes tentativas de evaluación de la evaporación sobre el Altiplano fueron realizadas según diversos métodos. Entre éstos, CARMOUZE y AQUIZE JAEN (1981) evalúan por balance hídrico las pérdidas globales a $1.880 \text{ mm año}^{-1}$ y, después de haber estimado las infiltraciones en 160 mm año^{-1} a partir del balance del cloro disuelto, calculan una evaporación de $1.720 \text{ mm año}^{-1}$. Con el balance térmico del lago, CARMOUZE *et al.* (1983) obtienen una evaporación de $1.720 \text{ mm año}^{-1}$. En cambio, VACHER (1989, comun. pers.) evalúan la evapotranspiración potencial sobre el Altiplano, por la fórmula de Penman, después de haber medido los términos del balance radiativo, en $1.300 \text{ mm año}^{-1}$ en Belén y $1.350 \text{ mm año}^{-1}$ en Patacamaya. Estos valores son más bajos que los precedentes en razón de la debilidad de la radiación neta.

MARIACA (1985) presenta valores de $1.860 \text{ mm año}^{-1}$ y $1.955 \text{ mm año}^{-1}$, obtenidos en cubeta de clase A, respectivamente en Desaguadero (Perú) y en Patacamaya. Estos valores se reducen a $1.490 \text{ mm año}^{-1}$ y $1.565 \text{ mm año}^{-1}$ por aplicación de un coeficiente de cubeta de 0,8. En Belén, la evaporación es mínima en junio, con un valor de 110 mm. Es máxima en octubre con 154 mm. El total anual es de 1.692 mm. En la isla del Sol, en el lago mismo, pero a una altura de 150 m encima del plano de agua, el valor anual es 1.606 mm. Después de aplicación del coeficiente de cubeta, estos dos últimos valores se vuelven 1.355 mm y 1.285 mm .

La evapotranspiración real de las cuencas vertientes del lago Titicaca

La cuenca vertiente total del lago recibe 736 mm año^{-1} de lluvia, o sea un volumen de $36,1 \times 10^9 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ (cuadro 2). El escurrimiento sólo representa 174 mm año^{-1} ó $8,5 \times 10^9 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$.

La evapotranspiración real (ETR) sobre las cuencas, considerada para un largo período, equivale al déficit de escurrimiento (DE) que sale del balance lluvia-caudal. En el presente caso, una incertidumbre subsiste sin embargo ya que convendría tomar en cuenta la variación de las reservas de las capas freáticas de la cuenca. De la misma manera que en el lago, se puede pensar que el almacenamiento aumentó al final del período considerado, como consecuencia del fuerte episodio húmedo de los años 1984-1986. La evapotranspiración calculada por el balance hídrico sería entonces sobrestimada. La evapotranspiración real varía entre 490 y 660 mm año^{-1} según las grandes cuencas, con un valor de 563 mm para el conjunto de la cuenca costera del lago (cuadro 2). Esta lámina de agua representa un volumen de $27,6 \times 10^9 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$, o sea una pérdida de 76,4 %, la componente más elevada de las pérdidas de la hondonada.

Los términos del balance hídrico y la evaporación real del lago Titicaca

Como ya se ha expuesto en los párrafos anteriores, diversos métodos fueron utilizados para evaluar cada término del balance, que dieron lugar a resultados sensiblemente diferentes. Es interesante mencionarlos a la escala plurianual, ya que este procedimiento de estimación, utilizado por primera vez, ofrece una evaluación del margen de incertidumbre que pueden tener los valores finales retenidos.

- Dos valores de la precipitación media sobre el lago fueron obtenidos utilizando el método Vecspat : $7,47 \times 10^9 \text{ m}^3$ con estimación de las lagunas, y $7,07 \times 10^9 \text{ m}^3$ con los valores calculados.

- Dos valores son presentados para los aportes fluviales : por un lado $8,90 \times 10^9 \text{ m}^3$, basándose en los resultados observados completados por correlación, por otro lado $8,51 \times 10^9 \text{ m}^3$ con las lagunas estimadas por Vecspat y un coeficiente de escurrimiento de 22 % para las cuencas no observadas. Los caudales calculados por Vecspat concluyen en los mismos resultados globales. Los valores varían de $7,86 \times 10^9 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ a $9,11 \times 10^9 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$, si se adopta una escala de coeficientes de escurrimiento de 15 a 25 % para la parte no observada.

- Los volúmenes saliendo por el Desaguadero son de $0,965 \times 10^9 \text{ m}^3$ según los datos brutos completados por interpolación, $1,53 \times 10^9 \text{ m}^3$ según la correlación con los niveles del lago, y $1,18 \times 10^9 \text{ m}^3$ según las estimaciones basadas sobre los caudales en la estación de Calacoto (BOURGES *et al.*, in press).

- La variación del nivel de agua, según los promedios móviles de las alturas del lago sobre 5 días, corresponde a una ganancia media anual de volumen de $0,802 \times 10^9 \text{ m}^3$, o sea 95 mm por año para el período de 20 años tomado en consideración.

De esta manera, diferentes combinaciones de los resultados precedentes pueden ser aplicados al cálculo de las pérdidas globales que resultan del balance.

Un mínimo de pérdidas globales de $12,6 \times 10^9 \text{ m}^3$, o sea 1.485 mm es evaluado tomando los valores mínimos de los aportes y máximos del caudal del Desaguadero. Viceversa, un máximo de $14,8 \times 10^9 \text{ m}^3$ o sea 1.745 mm es calculado. El promedio de los dos valores es de 1.615 mm, con una diferencia de $\pm 8 \%$.

Dos estimaciones, basadas sobre la mediana y el promedio de los valores disponibles de cada término, establecen pérdidas globales respectivas de $14,0 \times 10^9 \text{ m}^3$ y $13,9 \times 10^9 \text{ m}^3$, o sea 1.650 mm y 1.630 mm.

Basadas en los valores obtenidos por Vecspat y los caudales del exutorio deducidos de la correlación con los niveles del lago, las pérdidas globales, estimadas a partir de los resultados completados de las precipitaciones son de $13,6 \times 10^9 \text{ m}^3$, o sea 1.610 mm, en tanto que son de $13,2 \times 10^9 \text{ m}^3$, o sea 1.560 mm según los valores calculados, el promedio de los dos tipos de valores siendo de 1.585 mm.

Según los valores de caudales medidos y completados por correlaciones, de caudales al exutorio evaluados en función de los caudales en Calacoto, y de las lluvias completadas por Vecspat, las pérdidas globales son evaluadas a $14,4 \times 10^9 \text{ m}^3$, o sea 1.695 mm. La misma evaluación, tomando en cuenta las lluvias calculadas por Vecspat, concluye en pérdidas globales de $14,0 \times 10^9 \text{ m}^3$, o sea 1.645 mm.

Si hay que retener un solo valor de los términos del balance hídrico, se adoptarán las lluvias y caudales completados por Vecspat, y el promedio de los dos valores de caudales reconstituidos para el Desaguadero (cuadro 4). Para las pérdidas globales que no sean las que salen por el Desaguadero, se propone un volumen de $13,8 \times 10^9 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$, o sea una lámina de 1.630 mm año^{-1} . Tomando un margen de incertidumbre de $\pm 3 \%$, se obtiene una evaluación aproximada de la evaporación real que cubre la mayoría de las estimaciones.

Unidades	Pluvial	Fluvial	Efluente	Evaporación	Almacenamiento lago
Lámina mm	880	1.002	160	1.628	94
Volumen 10^9 m ³	7,47	8,51	1,36	13,82	0,80
%	46,8	53,2	8,9	91,1	

Cuadro 4. - Balance hídrico del lago Titicaca.

El balance hídrico global de la hondonada

En conformidad con los valores evaluados para las cuencas costeras y el lago, la precipitación total en la hondonada fue de $43,6 \times 10^9$ m³ año⁻¹. Un volumen de $0,80 \times 10^9$ m³ año⁻¹ fue almacenado en el lago, mientras que $41,4 \times 10^9$ m³ año⁻¹ se evaporó. La exportación fuera de la hondonada por el Desaguadero, en dirección del lago Poopó, fue de $1,36 \times 10^9$ m³ año⁻¹. La evaporación y la evapotranspiración representan así el 96,8 % de las pérdidas hídricas de la hondonada en tanto que la evacuación superficial sólo participa con el 3,2 %.

Conclusión

El clima de la cuenca del lago Titicaca, templado el día y frío la noche debido a la altitud, es el de una región de alta montaña sometida por su situación geográfica a un régimen tropical. La influencia de la imponente masa de agua se hace sentir por una reducción de las amplitudes de temperaturas y, en menor medida, sobre los valores de las temperaturas medias con relación a lo que deberían ser a tales altitudes. El lago, con aguas más calientes que el aire circundante, influencia también las precipitaciones que son máximas en su centro. Estas son esencialmente de diciembre a marzo, pudiendo presentar totales del simple al doble según los años.

Así, el régimen hidrológico es tropical, pero, sin embargo, con un escalonamiento del escurrimiento más pronunciado en las cuencas orientales donde los glaciares cubren las altas cimas. Los módulos pueden variar del simple al triple según los años, repercutiendo de manera amplificada la irregularidad interanual de las precipitaciones. El máximo de aportes fluviales, en retraso de uno a dos meses sobre las precipitaciones, tiene lugar durante la segunda mitad del verano, el 80 %virtiéndose en 4 meses.

La irregularidad interanual de las lluvias sobre el lago y de los aportes fluviales, frente a una regularidad relativa de la evaporación y a la modesta evacuación superficial por el exutorio, son las causas de las grandes variaciones observadas. Desde 1914, la variación de $\pm 3,18$ m observada generó una variación de volumen del lago de ± 3 %. Dada la fuerte diferencia de volumen, esta variación es de $\pm 2,6$ %, para el Lago Mayor, y de ± 33 % para el Lago Menor. La estabilidad del medio lacustre es pues muy variable según las zonas.

Las precipitaciones aportan al lago 880 mm, o sea $7,47 \times 10^9$ m³ año⁻¹, mientras que los ríos vierten la equivalencia de 1.002 mm, o sea $8,51 \times 10^9$ m³ año⁻¹. La evaporación (incluyendo los aportes o las pérdidas desconocidos en aguas subterráneas) substraee 1.630 mm ± 3 %, sea $13,8 \times 10^9$ m³ año⁻¹, mientras que el Desaguadero evacúa superficialmente 160 mm año⁻¹, o sea $1,36 \times 10^9$ m³ año⁻¹. La alimentación del lago proviene así de las lluvias por 47 % y de sus tributarios por 53 %. La evaporación, asegura 91 % de las pérdidas totales, mientras que las evacuaciones por el Desaguadero sólo representan 9 % de aquéllas. La originalidad del método de tratamiento de datos pluviométricos e hidrológicos, enteramente informatizado, garantiza una buena precisión de los resultados. Es seguro que el período 1968-1987, más lluvioso que los que habían sido tomados en cuenta anteriormente por otros autores, conduce a modificar los valores relativos del balance aumentando la parte de los tributarios y la del Desaguadero, en detrimento de la de las lluvias y de la evaporación. En comparación, CARMOUZE (1982) mencionó para el período 1956-1978, más seco que el de 1968 a 1987, pérdidas del lago de 1.720 mm por evaporación y de $0,22 \times 10^9$ m³ año⁻¹ por desagüe en el Desaguadero.

El lago Titicaca, por su superficie y su volumen, y por su situación de altitud elevada en zona intertropical, es una originalidad hidrológica en el mundo.

Referencias

- AMBROGGY (R.), 1965. – Cuencas acuíferas del lago Titicaca. *In* : Hidrología del Altiplano de Bolivia. La Paz. Min. Agric. : 11 p.
- Anon., 1955. – Estudio del lago Titicaca. Ingenieros Ejecutivos S.A., Lima, multigr.
- Anon., 1956. – Segundo Informe sobre la instalación de estaciones meteorológicas y de aforos en la cuenca del lago Titicaca. Ingenieros Ejecutivos S.A., Lima, multigr.
- Anon., 1965. – Programa de inventario y evaluación de los recursos naturales del Departamento de Puno. Sector de Prioridad I ; Cap. 2 : Climatología ; Cap. 3 : Geología y Rec. Mineros ; Cap. 4 : Hidrología, vol. 2 ; Cap. 5 : Suelos, vol. 3 ; Cap. 6 : Ecología y Agrostología, vol. 4 ; Cap. 7 : Diagnóstico Económico, vol. 5. INP/ONERN/CORPUNO, Lima.
- Anon., 1971. – Informe sobre estudio físico-químico realizado en el lago Titicaca. Dic. 1969. Of. de Investig. Min. Marina. n° 124, Lima : 10 p.
- Anon., 1972. – El Altiplano de Puno. Estudios agroclimáticos por cuencas. Dir. Agrometeorología. SENAMHI. Lima. Climatología, multigr.
- Anon., 1973 a. – Estudio de las sequías en la Hoya del Titicaca. Dir. Agrometeorología ; 1 y 2 : Climatología, Hidrología, SENAMHI., Lima : 42 p.
- Anon., 1973 b. – Evaluación agroclimática del Departamento de Puno. Dir. Agrometeorología, SENAMHI., Lima, multigr.
- Anon., 1981. – Estudio de la cuenca del río Ilpa. Min. Agric., Puno PGAS Proy. Manejo de cuencas. Tomo 1 : diagnóstico de la cuenca, 114 p. Tomo 2 : plan de manejo de la cuenca, 102 p.
- AQUIZE JAEN (E.), 1980. – Clima de la cuenca del lago Titicaca. UNTA, Puno.
- AQUIZE JAEN (E.), 1983. – La sequía en Puno. Alternativas Institucionales, Tecnológicas y Populares : El lago Titicaca, Inundaciones y Sequías. IISDA, Convenio UNTA. NUFFIC, Puno.
- ARCE (B.), 1966. – El clima de la cuenca del Titicaca y su influencia en la producción agrícola. Tesis UNSAA, Cuzco.
- BAZOBERRY (A.), 1969 a. – Anteproyectos y alternativas sobre la utilización de las aguas del lago Titicaca, Desaguadero y Poopó con fines de energía e irrigación. Imp. Artist., La Paz : 50 p.
- BAZOBERRY (A.), 1969 b. – Balance hídrico del lago Titicaca. Dir. Irrig. Minist. Fom., Lima, multigr.
- BAZOBERRY (A.), 1971. – Aprovechamiento de las aguas del lago Titicaca : Proyecto conjunto Bolivia-Perú. Imp. Artist., La Paz : 63 p.
- BOULANGE (B.), AQUIZE JAEN (E.), 1981. – Morphologie, hydrographie et climatologie du lac Titicaca et de son bassin versant. *Rev. Hydrobiol. trop.*, 14 (4) : 269-287.
- BOULANGE (B.), VARGAS (C.), RODRIGO (L.A.), 1981. – La sédimentation actuelle dans le lac Titicaca. *Rev. Hydrobiol. trop.*, 14 (4) : 299-309.
- BOURGES (J.), CARRASCO (M.), CORTES (J.), 1991. – El lago Titicaca. Aportes en aguas superficiales y desagüe. PHICAB, La Paz (in press).
- CAMPOS (R.), 1977. – Evaluación del potencial eólico en la Hoya del lago Titicaca. Tesis Prog. Ciencia, UNA - La Molina, Lima : 150 p.
- CANAZA MAMANI (V.), 1988. – Análisis de consistencia de datos hidrometeorológicos de la cuenca del río Ramis. Tesis UNTA, Puno : 127 p.
- CARI (A.), 1977. – Caracterización hidrológica de la cuenca del río Ilave. Tesis Ing. Agron. UNTA, Puno : 106 p.
- CARO (M.), 1980. – Determinación de la evotranspiración potencial a gran altitud. Tesis Ing. Agron. UNA - La Molina, Lima : 77 p.

- CARMOUZE (J.P.), AQUIZE JAEN (E.), 1981. - La régulation hydrique du lac Titicaca et l'hydrologie de ses tributaires. *Rev. Hydrobiol. trop.*, 14 (4) : 311-328.
- CARMOUZE (J.P.), ARZE (C.), QUINTANILLA (J.), 1977. - La régulation hydrique des lacs Titicaca et Poopó. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrobiol.*, 11 (4) : 269-283.
- CARMOUZE (J.P.), ARZE (C.), QUINTANILLA (J.), 1978. - Circulación de materia (aguas, sales disueltas) a través del sistema fluvio-lacustre del Altiplano. *Cah. ORSTOM, sér. Géol.*, 10 (1) : 49-68.
- CARMOUZE (J.P.), ARZE (C.), QUINTANILLA (J.), 1981. - Régulation hydrochimique du lac Titicaca et l'hydrochimie de ses tributaires. *Rev. Hydrobiol. trop.*, 14 (4) : 329-348.
- CARMOUZE (J.P.), ARZE (C.), QUINTANILLA (J.), MIRANDA (J.), 1978. - Estudio de la regulación hídrica del sistema fluvio-lacustre del Altiplano. *Rev. Boliviana de Química*, 2 (1) : 2-22.
- CARMOUZE (J.P.), MIRANDA (L.), 1978. - Estudio de los factores de control de los carbonatos disueltos en las aguas del lago Titicaca. Proceso de precipitación de calcita. *Rev. Boliviana de Química*, 2 (1) : 57-67.
- CARMOUZE (J.P.), AQUIZE JAEN (E.), ARZE (C.), QUINTANILLA (J.), 1983. - Le bilan énergétique du lac Titicaca. *Rev. Hydrobiol. trop.*, 16 (2) : 135-144.
- CASTRO (M.), 1970. - El lago Titicaca. *Rev. de Marina*, Lima, 4 (326) : 371-382.
- CEHAK (K.), KESSLER (A.), 1976. - Varianzspektrumanalyse der seespiggelschwankungen des Titicaca Sees (Sudamerica). *Arch. Met. Geoph. Biokl.*, ser. B, 24 : 201-208.
- CHOQUEHUANCA CORNEJO (P.), 1978. - Calidad de agua de los principales afluentes del río Ramis (1978). Tesis Ing. Agron. UNTA, Puno : 66 p.
- CHURATA (J.), 1977. - Caracterización hidrológica del río Ramis. Tesis Ing. Agron. UNTA, Puno.
- CHURATA SALLUCA (J.), MAMANI HUANCA (L.A.), 1977. - Hidrología de la cuenca del río Ramis. Tesis Ing. Agron. UNTA, Puno : 173 p.
- COLQUE ROJAS (Z.S.), 1983. - Primera evaluación de la radiación solar en Puno. Tesis Ing. Agron. UNTA, Puno : 82 p.
- CUTIPA LUQUE (J.), 1973. - Predicción de sequías e inundaciones en base a precipitaciones pluviales a través del análisis ondulatorio hasta el año 2000 en el distrito de Puno. Tesis Ing. Agron. UNA - La Molina, Lima : 30 p.
- DAVILA (R.), 1957. - Problemas meteorológicos e hidrológicos del lago Titicaca. 1. Algunas sugerencias sobre observaciones de circulaciones terciarias y problemas de tiempo en la cuenca del Titicaca. 2. Algunas consideraciones sobre el balance hidrológico del Titicaca. *Rev. Inst. Geogr. Lima*, 3 : 6-25.
- DEL CASTILLO (A.), 1977. - Ciclos del lago Titicaca en función de manchas solares y desplazamiento del centro de alta del Pacífico. Carta no publicada. Inst. Mar Perú, Puno.
- FERNANDEZ JAUREGUI (C.A.), ROCHE (M.A.), ALIAGA (A.), PEÑA (J.), 1987. - Los recursos hídricos en Bolivia. PHICAB, CONAPHI, IHU.UMSA, ORSTOM, SENAMHI, La Paz : 20 p., multigr.
- FONTES (J.), BOULANGE (B.), CARNIYGE (J.), FLOROWSKI (T.), 1979. - Preliminary oxygen-18 and deuterium study of the dynamics of Lake Titicaca. In : Meeting International Atomic Energy Agency, AIEA, Vienna : 145-150.
- FUSE (J.), 1964. - Informe sobre radiación solar total que debe incidir en la Bahía de Tamán del lago Titicaca. Instit. Geofís. Univ. S. Agustín, Arequipa.
- GILSON (H.), 1939. - The Percy Sladen Trust Expedition to Lake Titicaca in 1937. *Trans. Linn. Soc. London*, ser. 3, 1 : 1-357.
- GILSON (H.), 1964. - Lake Titicaca. *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 15 : 112-127.
- GILSON (H.), HOLMES (P.), 1939. - 2. Meteorology. In : The Percy Sladen Trust Expedition to Lake Titicaca in 1937. *Trans. Linn. Soc. London*, ser. 3, 1 (1) : 21-26.
- GOMEZ (J.), 1972. - Estudio del lago Titicaca para aprovechamiento de sus aguas. Tesis Ing. Agron. UNA. - La Molina, Lima : 118 p.
- GOMEZ BRAVO (J.A.), 1979. - Calidad de los recursos hídricos de la cuenca de Pamacanchi. Tesis UNTA, Puno : 138 p.

- GONZALES GONZALES (V.A.), 1985. – Capacidad erosiva de las precipitaciones en la localidad de Juli. Tesis UNTA, Puno : 51 p.
- GUEVARA (A.), 1953. – El clima de Puno. Boletín de la Direc. Gral de Agric., Lima : 78–87.
- GUYOT (J.L.), GUMIEL (D.), 1990. – Premières données sur l'hydrogéologie et l'hydrogéochimie du nord de l'Altiplano bolivien. *Hydrogéologie*, 3 : 159–164.
- GUYOT (J.L.), ROCHE (M.A.), NORIEGA (L.), CALLE (H.), QUINTANILLA (J.), 1990. – Salinities and sediment transport in the bolivian highlands. *J. Hydrol.*, 113 : 147–162.
- GUYOT (J.L.), ROCHE (M.A.), QUINTANILLA (J.), CALLICONDE (M.), NORIEGA (L.), CALLE (H.), CORTES (J.), 1989. – Cargas en suspensión, salinidades y transportes de materia sobre el Altiplano boliviano. PHICAB, IIQ.UMSA, ORSTOM, SENAMHI, La Paz : 20 p., multigr.
- HANN (J.), 1903. – Zum Klima des Hochlandes von Peru and Bolivia. *Peterm. Geogr. Mitteil*, 49 (5) : 280–282.
- HIEZ (G.), 1977. – L'homogénéité des données pluviométriques. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, 14 (2) : 129–172.
- HOLLOWAY (A.), 1957. – Reporte de un reconocimiento del agua dulce del Perú. Lago Titicaca. SCIPA, Lima : 77 p.
- HUTCHINSON (G.E.), 1957. – A treatise on Limnology. I. Geography, Physics, and Chemistry. John Wiley & Sons, New York, 1015 p.
- JIMENEZ (A.), 1967. – El plan nacional de agua potable rural en Puno, estudio de fuentes. Tesis UNI, Lima.
- KESSLER (A.), 1947. – Atmosphärische Zirkulationsanomalien und Spiegelschwankungen des Titicaca Sees. *Klimat. Forsch.*, 17 : 361–372.
- KESSLER (A.), 1963. – Über Klima und Wasserhaushalt des Altiplano (Bolivien–Peru) während des Hochstandes der letzten Vereisung. *Erdkunde, Arch. für Wissenschaft. Geogr.*, Bonn, 17 : 165–173.
- KESSLER (A.), 1966. – Junge Laufaderung des Desaguadero und die Entstehung des Uru Sees (bolivianischer Altiplano). *Erdkunde, Arch. für Wissenschaft. Geogr.*, Bonn, 20 : 194–204.
- KESSLER (A.), 1970. – Über den Jahresgang der potentiellen Verdunstung im Titicaca Becken. *Arch. Met. Geoph. Biokl.*, Ser. B, 18 : 239–252.
- KESSLER (A.), MONHEIM (F.), 1967. – El balance hidrológico del lago Titicaca, una contribución al aprovechamiento de sus aguas. Serv. Nac. Planif. Coord., La Paz : 6 p.
- KESSLER (A.), MONHEIM (F.), 1968. – Der Wasserhaushalt des Titicaca Sees nach neueren Messergebnissen. *Erdkunde, Arch. für Wissenschaft. Geogr.*, Bonn, 22 (4) : 275–283.
- KIRKISH (M.), TAYLOR (M.), 1978. – Micrometeorological Measurements at Lake Titicaca (Peru–Bolivia). *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 20 : 1203–1209.
- LA PUENTE (I.), 1982. – Estudio monográfico del lago Titicaca. *Bol. Soc. Geogr.* Lima, 1 : 263–391.
- LOZA ANCCO (C.F.), 1983. – Determinación de la precipitación efectiva en la cuenca del río Ramis. UNTA, Puno : 38 p.
- LOZADA (G.A.), 1985. – Balance hídrico superficial de la cuenca del lago Poopó y los salares de Uyuni y Coipasa, Bolivia. PHICAB, IHH.UMSA, ORSTOM, SENAMHI, La Paz : 158 p., multigr.
- MARCA AROCUPITA (P.), 1984. – Curvas escala – gastos de los ríos Ramis y Huancané. Tesis UNTA, Puno : 109 p.
- MARCOY (P.), 1877. – Voyage dans la région du Titicaca et dans les vallées de l'est du Bas Pérou. *Le Tour du Monde*, 257 p.
- MARIACA (J.J.), 1985. – Balance hídrico superficial de la cuenca del lago Poopó y los salares de Uyuni y Coipasa, Bolivia. PHICAB, IHH.UMSA, ORSTOM, SENAMHI, La Paz : 203 p., multigr.
- MERCADO (R.), (no dated). – Clima y agua del Titicaca. Dir. Irrigación, Min. Agric., Lima, 4 p., multigr.
- MEYBECK (M.), 1979. – Concentrations des eaux fluviales en éléments majeurs et apports en solution aux océans. *Rev. Géol. Dynam. et Géogr. Phys.*, 21 (3) : 215–246.

- MONHEIM (F.), 1955. – Bericht über Forschungen in den zentralen Anden insbesondere im Titicaca Becken. *Erdkunde, Arch. für Wissenschaft. Geogr.*, Bonn, 9 : 204–216.
- MONHEIM (F.), 1956 a. – Beiträge zur Klimatologie und Hydrologie des Titicacabeckens. *Selbstverl. d. Geograph. Heidelberg*, 1 : 1–152.
- MONHEIM (F.), 1956 b. – Contribución a la climatología e hidrología de la cuenca del lago Titicaca. Traducción Carlos Pecka, UNTA, Puno : 232 p.
- MORLON (P.), 1979. – Apuntes sobre el problema agronómico de las heladas. El aspecto meteorológico. CIDA.Min. Agric. Alim., Puno : 54 p., multigr.
- MORLON (P.), BANEGAS (M.), 1980. – Evapotranspiración y aridez. Estudio agroclimatológico de la cuenca del lago Titicaca. CIDA.Min. Agric. Alim., proyecto colza y cereales, región 10, Puno, multigr.
- NEVEU-LEMAIRE (M.), 1906. – Les lacs des hauts plateaux de l'Amérique du Sud. Imprimerie Nationale, Paris, 197 p.
- ORTEGA BAILON (G.F.), 1974. – Determinación de la evotranspiración y balance hidrológico en el altiplano. Tesis Ing. Agron. UNTA, Puno : 68 p.
- PALOMINO (P.), 1983. – La sequía en Puno. Alternativas institucionales tecnológicas y populares : cultura popular y predicciones de sequía. IIDSA, Convenio UNTA.NUFFIC. Puno.
- PAUCAR PACHECO (A.), 1977. – Frecuencia de sequías del Altiplano. Tesis UNTA, Puno : 35 p.
- PEGUY (C.P.), 1970. – Précis de Climatologie. Masson, Paris, 468 p.
- PONCE VILCAPAZA (D.B.), 1982. – Hidrograma unitario sintético de la cuenca del río Ilave. Tesis UNTA, Puno : 54 p.
- POSNANSKY (A.), 1911. – El clima del Altiplano y la extensión del lago Titicaca, con relación a Tihuanacu en épocas prehistóricas. Tipografía comercial de Ismael Argote, La Paz, 29 p.
- POSNANSKY (A.), 1928. – La remoción del ángulo climático en el Altiplano de los Andes como factor del despueblo de la gente interandina. 23th Inter. Congr. of Americanist, New York, S. 235, 246 p.
- QUINTANILLA (J.), CALLICONDE (J.), GUYOT (J.L.), ROCHE (M.A.), NORIEGA (L.), CALLE (H.), CORTES (J.), 1989. – Cargas en suspensión, salinidades y transportes de materia sobre el Altiplano boliviano. *Rev. Ingeniería Sanitaria*, 4 (5) : 54–59.
- QUINTANILLA (J.), GUMIEL (D.), GUYOT (J.L.), 1991. – Evaluación preliminar de la hidrogeología en hidrogeoquímica del Norte del Altiplano boliviano. Congreso boliviano de Química, La Paz, August 1990 (in press).
- QUISPE ZAPARA (L.L.), AMANQUI AMANQUI (A.A.), 1978. – Caracterización hidrológica de la cuenca del río Coata. Tesis Ing. Agron. UNTA, Puno : 143 p.
- RICHERSON (P.J.), WIDMER (C.), KITTEL (T.), 1977. – The limnology of Lake Titicaca (Peru-Bolivia). Univ. California, Davis, Inst. Ecology, 14 : 78 p., multigr.
- ROCHE (M.A.), 1986. – Distribuciones espacio-temporales de los parámetros climatológicos sobre Bolivia. Premier Symposium de la Recherche française en Bolivie, La Paz, Sept. 1986 : 29–32, multigr.
- ROCHE (M.A.), 1987. – Les bilans hydriques des Andes et de l'Amazonie, Bolivia. Symp. Paléolacs et Paléoclimats en Amérique latine et en Afrique, ORSTOM, Bondy, Janvier 1987. *Géodynamique*, 2 (2) : 97–98.
- ROCHE (M.A.), 1988. – CLIMAR 2, logiciel d'exploitation de données pour l'étude des variations climatologiques spatio-temporelles. PHICAB.ORSTOM, La Paz, 76 p., multigr.
- ROCHE (M.A.), 1989. – Présentation générale des études sur la physicochimie des eaux à l'ORSTOM. Quatrième Journées hydrologiques de l'ORSTOM, Montpellier, Septembre 1988 : 3–9.
- ROCHE (M.A.), FERNANDEZ JAUREGUI (C.), 1986. – Los balances hídricos de Bolivia. Premier Symposium de la Recherche française en Bolivie, La Paz, Sept. 1986 : 44–47, multigr.
- ROCHE (M.A.), ROCHA (N.), 1985. – Mapa pluviométrico de Bolivia y regiones vecinas, 1/4.000.000. PHICAB, ORSTOM, SENAMHI, La Paz.
- ROCHE (M.A.), FERNANDEZ JAUREGUI (C.), ABASTO (N.), ALIAGA (A.), 1989. – Mapa de temperaturas anuales de Bolivia. 1/5.000.000. PHICAB, ORSTOM, SENHAMI, La Paz.

- SERVANT (M.), VILLARROEL (R.), 1979. - Le problème paléoclimatique des Andes boliviennes et de leurs piedmonts amazoniens au Quaternaire. *C.R. Acad. Sciences*, Paris, 288 : 665-668.
- STENZ (E.), 1950. - Condiciones climatológicas del Altiplano de Bolivia. *Nimbus*, Soc. Met. Bolivia, 2 (6-7) : 24-53.
- TAYLOR (M.), AQUIZE JAEN (E.), 1984. - A climatological energy budget of Lake Titicaca (Peru-Bolivia). *Verh. Internat. Verein. Limnol.*, 22 : 1246-1251.
- TEJADA CARI (A.), 1977. - Caracterización hidrológica de la cuenca del río Ilave. Tesis Ing. Agron. UNTA, Puno : 104 p.
- TEJADA CARI (J.R.), 1980. - Caracterización hidrológica de la cuenca del río Huancané. Tesis Ing. Agron. UNTA, Puno : 101 p.
- TERRY (B.), 1966. - Estudio de la precipitación pluvial, de la temperatura y las manchas solares en el Dpto. de Puno. Tesis Ing. Agron. UNA - La Molina, Lima.
- VACHER (J.), 1989. - Third International Conference in Southern Hemisphere. *Meteorology and Oceanography*. Buenos Aires. Abstracts : 169-172.
- VEGA (L.), 1968. - Primera aproximación del balance hidrológico del lago Titicaca con fines de futuros aprovechamientos de sus aguas. Dir. Irrig. Min. Fom. Obr. Públ., Lima, multigr.
- VEGA (L.), 1970. - Estudio de niveles del lago Titicaca. 5° Seminario Latinoamericano de Irrigación en Caracas, Venezuela, 1968. SENAMHI, 1 (1), Lima.
- WASSON (J.G.), GUYOT (J.L.), DEJOUX (C.), ROCHE (M.A.), 1989. - Régimen térmico de los ríos de Bolivia. PHICAB, ORSTOM, SENAMHI, UMSA, La Paz : 35 p., multigr.
- YEPES (J.), 1950. - Definición de ambientes naturales en el Altiplano. *Nimbus*, Soc. Met. Bolivia, 2 (6-7) : 3-23.