

V.3 Los flujos de materias disueltas y en suspensión en algunos tributarios y en el río Desaguadero

JEAN-LOUIS GUYOT, JEAN-GABRIEL WASSON,
JORGE QUINTANILLA, HECTOR CALLE

La hidrología y la hidroquímica del lago Titicaca y de sus principales tributarios han sido objeto de diversos estudios, y un primer balance de los aportes del lago en materias disueltas ha sido establecido a partir de una decena de campañas de muestreo realizadas de 1976 a 1979 (CARMOUZE *et al.*, 1978, 1981). Si se conoce por medio de estudios sedimentológicos la tasa de sedimentación actual en el Lago Menor (cf. cap. II.3), los aportes directos en sedimentos fluviales sólo han sido objeto de estudios cualitativos (BOULANGE *et al.*, 1981) y la evolución estacional de estos flujos (soluciones y sedimentos) es mal conocida.

Un estudio reciente sobre la tipología de los ríos de la región de La Paz, basado en un enfoque por región ecológica, (WASSON y MARIN, 1988) ha permitido obtener una serie de datos sobre la hidrología, la hidroquímica y las materias en suspensión de dos pequeños afluentes bolivianos del lago Titicaca, los ríos Tiwanaku y Jacha Jahaira (o Keka). Estos dos ríos cuyos módulos anuales son próximos a $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, provienen de cuencas vertientes con características muy diferentes, ya que el primero (TI) está situado enteramente en el Altiplano, mientras que el segundo (JJ) se extiende hasta un valle glacial de la Cordillera Oriental. Unos cuarenta muestreos fueron realizados en cada río, sobre la base de un espacio de tiempo de diez días. Se analizaron análisis químicos sobre los iones mayores y sobre las materias en suspensiones, dosificados por filtración de 1.000 ml de agua sobre filtro Whatman GF/C secado a 105°C durante 2 horas.

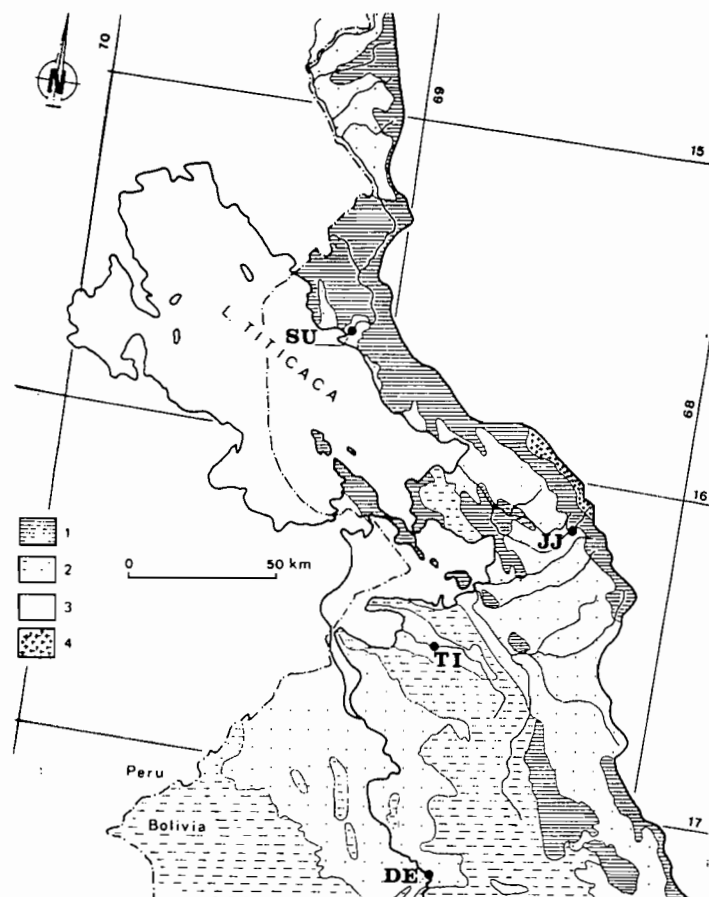


Fig. 1. - Mapa hidrográfico y geológico simplificado de la cuenca vertiente boliviana del lago Titicaca, según el mapa geológico de Bolivia al 1/1.000.000 (YFPF-GEOBOL, 1978).

- 1 : Paleozoico
- 2 : Cenozoico
- 3 : Cuaternario
- 4 : Macizos graníticos

Ver clave de las estaciones en el cuadro 1.

ORSTOM Fonds Documentaire

N° : 36613, 42

Cote : A

Estos datos llevan una información nueva sobre la variabilidad espacio-temporal de los aportes disueltos y en suspensión en el lago Titicaca, según la naturaleza de las cuencas vertientes y de las estaciones hidrológicas. Están completadas por observaciones sobre los ríos Suhez y Desaguadero (GUYOT *et al.*, 1990), con el fin de precisar los regímenes y los balances de los flujos de materias llegando al lago, y luego exportados por el río Desaguadero (fig. 1).

Los regímenes de materias

- Hidrología

Bajo la influencia de un régimen idéntico de precipitaciones, caracterizado por una época de lluvias bien marcada de diciembre a marzo, los afluentes del lago Titicaca presentan generalmente un período de aguas altas de enero a marzo (fig. 2A). En cambio, en el río Desaguadero, cuyo caudal está directamente influenciado por el nivel del agua en el lago Titicaca, las aguas altas se prolongan hasta el mes de mayo debido a la inercia ligada al volumen del lago (GUYOT *et al.*, 1990).

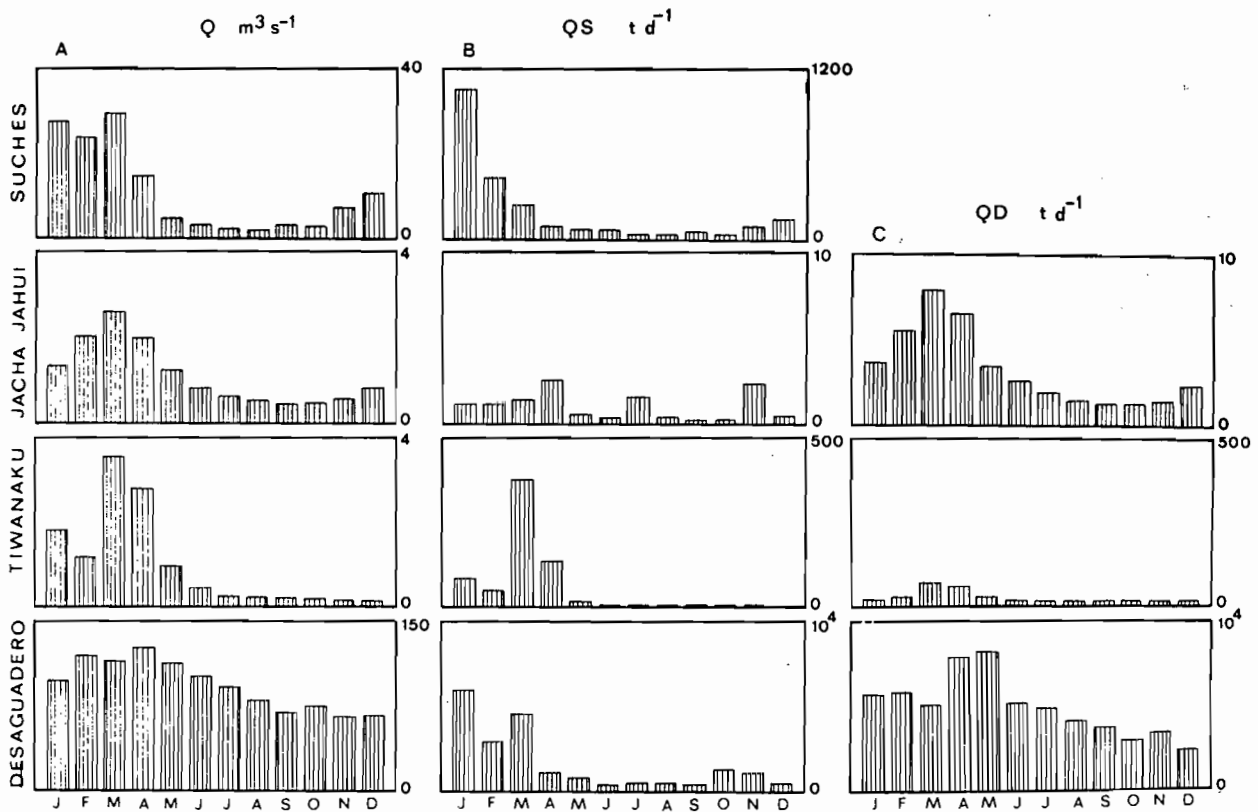


Fig. 2. - Los regímenes hidrológicos, de materias en suspensión y de materia disuelta, de enero a diciembre.

2A : caudales medios mensuales (Q , en $m^{-3} s^{-1}$).

2B : flujos medios mensuales de materias en suspensión
(QS , en toneladas por día).

2C : flujos medios mensuales de materia disuelta
(QD , en toneladas por día).

- Concentraciones

Los contenidos en materias disueltas y en suspensión evolucionan de manera muy diferente en los ríos Tiwanaku y Jacha Jahuira. En el primero, la evolución de los caudales ocasiona grandes variaciones en los contenidos en solución y en suspensión, mientras que en el segundo, los contenidos permanecen más bajos y notablemente estables en el curso del ciclo hidrológico.

Estas diferencias se deben relacionar a las características geológicas y geomorfológicas de las cuencas vertientes. Para el río Jacha Jahuira, la presencia exclusiva de series del Paleozoico dominadas por los relieves graníticos de la cordillera explica los contenidos más bajos en elementos disueltos. El perfil en gradas del valle, que determina la presencia de una serie de lagos río arriba de la estación de medida, contribuye a disminuir los contenidos en sedimentos transportados. Por el contrario, el río Tiwanaku arrastra los sedimentos cuaternarios del Altiplano, puestos más fácilmente en movimiento durante las crecidas (fig. 3).

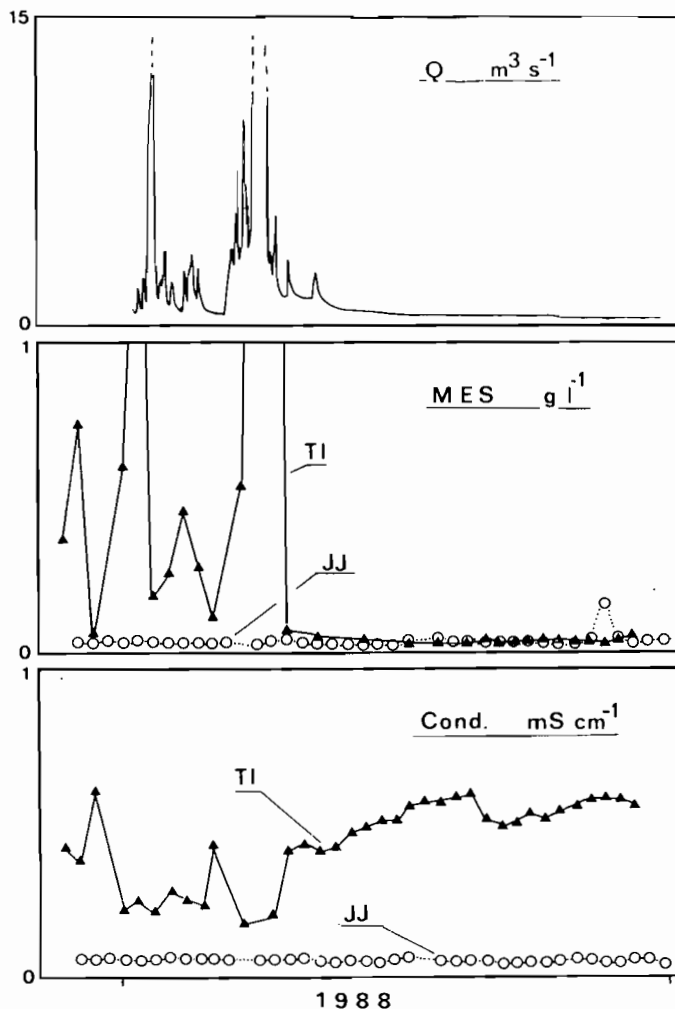


Fig. 3. - Ciclo hidrológico 1987-1988. Evolución de los caudales en Tiwanaku (Q, en $m^3 s^{-1}$), de las materias en suspensión (MES, en $g l^{-1}$) y de la conductividad eléctrica (Cond., en $mS cm^{-1}$ a $25^\circ C$) en Tiwanaku (TI) e Hichu Kkota (JJ).

- Flujos

En consecuencia, los regímenes de flujos de materias disueltas y en suspensión son muy diferentes en estos dos ríos. En el río Jacha Jahuira, el caudal sólido presenta fluctuaciones poco significativas, y el caudal disuelto sigue la evolución del régimen hidrológico. En cambio, en el río Tiwanaku, el caudal sólido es muy elevado durante los cuatro meses de aguas altas, y casi nulo en época seca. Las variaciones del caudal disuelto son mucho menos fuertes, debido a una cierta dilución durante las crecidas (fig. 3).

Los regímenes de las materias en suspensión (MES) de los ríos Suchez (estación de Escoma) y Desaguadero (estación de Calacoto) presentan, así como el del río Tiwanaku, una característica común: lo esencial del transporte sólido se efectúa durante las aguas altas (fig. 2B). Esto no es sorprendente para el río Desaguadero cuyas MES provienen de los afluentes situados entre el lago Titicaca y la estación de medición, y que drenan cuencas vertientes del Altiplano del mismo tipo que la del río Tiwanaku. Para el río Suchez, eso significa que las series sedimentarias del Cenozoico y del Cuaternario atravesados por este río, después de las formaciones paleozoicas, tendrían una influencia significativa sobre el régimen de las MES.

El balance de los transportes de materias

A partir de los datos disponibles, un balance de los flujos de materias transportadas (caudal x contenidos, con un espacio de tiempo diario) ha sido calculado (cuadro 1).

En lo que se refiere a la estación de Hichu Kkota (JJ) para la cual los datos hidrológicos provienen de observaciones más antiguas (S.N.D.C.-G.T.Z., 1981), los cálculos han sido efectuados a partir de promedios mensuales correspondiendo a períodos diferentes, debido a la ausencia de crónicas de caudal. En este caso particular, este método no presenta inconveniente mayor en vista de la estabilidad de las concentraciones medidas. En cambio, en el caso de ríos como el río Tiwanaku, donde variaciones importantes de los contenidos son observadas en el curso del ciclo hidrológico, un cálculo del balance a partir de los promedios anuales (caudal y concentración) se traduciría por una subestimación notable de los flujos de sedimentos y una sobreestimación de los flujos de materias disueltas.

Los resultados consignados en el cuadro 1 resaltan la uniformidad aparente de los índices de erosión químicas (soluciones), calculados con corrección de los aportes atmosféricos (bicarbonatos en solución). Son del orden de $10 \text{ t km}^{-2} \text{ año}^{-1}$ en los tres tributarios del lago estudiados pese a la disparidad de sus situaciones geográficas.

A la inversa, los índices de erosión mecánica son muy variables en función de la localización de las cuencas vertientes en el Altiplano o en la cordillera. Así, en el río Jacha Jahuira, el flujo de materias disueltas es aproximadamente dos veces superior al flujo de sedimentos, y el índice de erosión mecánica ($5 \text{ t km}^{-2} \text{ año}^{-1}$) figura entre los más bajos observados en los Andes bolivianos (GUYOT *et al.*, 1988 et 1990 ; GUYOT *et al.*, en impresión). El del río Suchez, cuatro veces superior, es aún relativamente modesto. Al contrario, en el río Tiwanaku, aunque los contenidos medios de MES son del mismo orden de magnitud que los de las materias disueltas, el flujo de MES es cinco veces superior al flujo disuelto debido a la fuerte variabilidad temporal de las concentraciones. El índice de erosión mecánica de este río es de $110 \text{ t km}^{-2} \text{ año}^{-1}$ y el del río Desaguadero es alrededor de la mitad.

Esta región del Altiplano parece pues caracterizada por un índice de erosión global (soluciones + suspensiones) del orden de 60 a $120 \text{ t km}^{-2} \text{ año}^{-1}$, mientras que los resultados obtenidos en los ríos Suchez y Jacha Jahuira conducen a índices cuatro veces menos elevados (de 14 a $30 \text{ t km}^{-2} \text{ año}^{-1}$) para la vertiente oeste de la Cordillera Oriental.

Consecuencias para el lago Titicaca

Estos datos permiten por primera vez precisar la variabilidad espacio-temporal de los regímenes de materias disueltas y particulares entrando o saliendo del lago Titicaca.

Respecto a la exportación de materias por el río Desaguadero, análisis efectuados a lo largo de este río han mostrado que la mineralización en Calacoto corresponde a la del lago Titicaca (GUYOT *et al.*, 1990) ; esta estación de aforo puede ser utilizada válidamente para el balance del lago. Evidentemente, sólo el flujo de materias disueltas ($1.800 \times 10^3 \text{ t año}^{-1}$), directamente ligado al caudal, debe tomarse en consideración. En complemento, un flujo saliendo de carbono orgánico total, principalmente bajo forma disuelta, ha sido evaluado a $18 \times 10^3 \text{ t año}^{-1}$ para el período 1976-1982 (WASSON *et al.*, en impresión).

Características de las estaciones					Hidrología		
Claves	Ríos	Estaciones	Altitudes de las estaciones (m)	Superficies de las cuencas vertientes (km ²)	Períodos de observación	Caudales medios anuales (m ⁻³ s ⁻¹)	Caudales específicos (l.s ⁻¹ .km ⁻²)
SU	Suchez	Escoma	3.850	3.100	1976-1982	10	3.4
JJ	Jacha Jahuira	Hichu Kkota	4.320	63	1945-1975	1.1	17
TI	Tiwanaku	Tiwanaku	3.850	320	1987-1988	1.2	3.8
DE	Desaguadero	Calacoto	3.790	9.800 + SL*	1976-1982	52	-

SL* = cuenca vertiente del lago Titicaca (57.100 km²)

Materias en suspensión						Materias en solución				
Claves	Períodos de observación	N° muestra	Contenidos (mg l ⁻¹)	Caudales sólidos (10 ³ t año ⁻¹)	Indices de erosión (t km ⁻² año ⁻¹)	Períodos de observación	N° muestra	Contenidos (mg l ⁻¹)	Caudales disueltos (10 ³ t.año ⁻¹)	Indices de erosión (t km ⁻² año ⁻¹)
SU	1976-82	52	180	65	21	1983-88	5	60	30	9
JJ	1987-88	39	9	0.3	5	1987-88	39	34	1.2	9
TI	1987-88	40	330	34	110	1987-88	40	280	6.6	10
DE	1976-82	100	250	580	59	1983-88	788	670	1800	-

Cuadro 1. - Características de las estaciones y balances de materias.

La evaluación de los flujos que entran constituye un problema mucho más complejo, ya que tomar en cuenta la variabilidad que ha sido puesta en evidencia es fundamental para el establecimiento de los balances de materias. Los ríos que drenan las series sedimentarias del Terciario y del Cuaternario presentan grandes variaciones en sus concentraciones en sales y sobre todo en MES en el curso del ciclo hidrológico.

Un enfoque regionalizado por tipo de cuenca vertiente, y a partir de crónicas de medidas en número suficiente, parece indispensable para llegar a evaluaciones precisas, particularmente respecto a los flujos de sedimentos. Actualmente, la ausencia de datos concerniendo las MES de los otros afluentes del Titicaca impide establecer un balance global (soluciones + suspensiones) de los flujos de materias entrando en el lago. Los resultados presentados aquí constituyen una primera aproximación en esta dirección, e interesan en este aspecto los estudios sobre la sedimentación actual en el lago Titicaca. Se inscriben igualmente en un estudio más global de los transportes de materias y de la erosión en los Andes de Bolivia.