

I Q Q

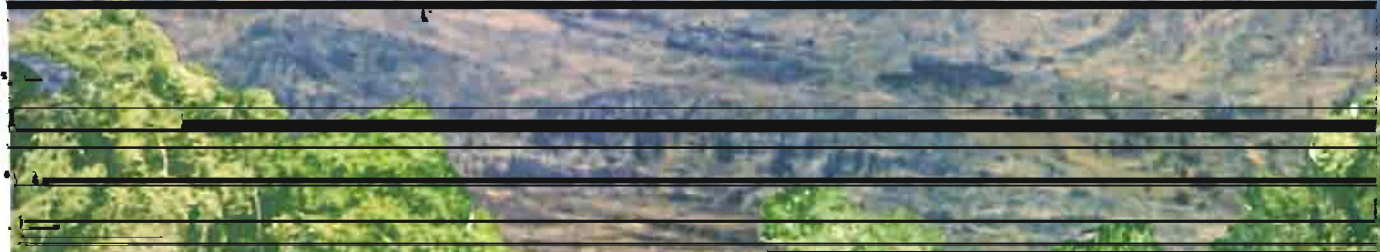
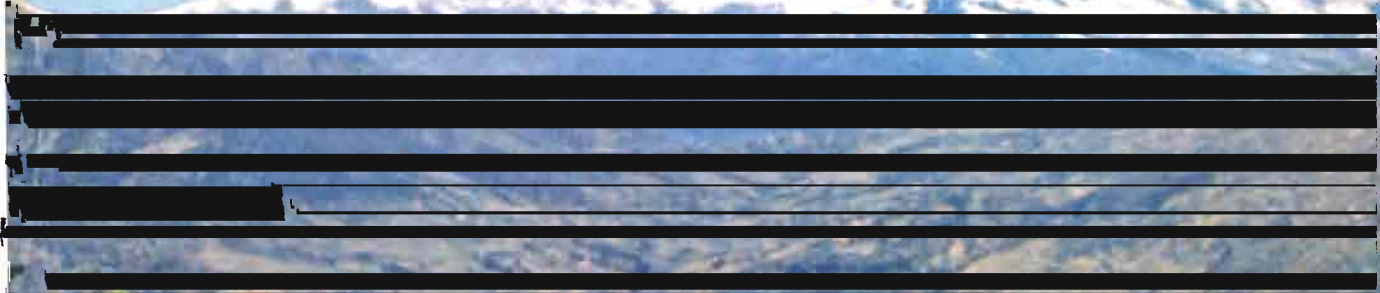
ORSTOM

PHICAB

SENAMHI

**CARGAS EN SUSPENSION, SALINIDADES  
Y TRANSPORTES DE MATERIA**

**SOBRE EL ALTIPLANO BOLIVIANO**



JORGE MANANICA, MOISES CALLEJONDE  
LUCIANO CIELO, HECTOR CALLE Y JOSE CORREA

## CARGAS EN SUSPENSION, SALINIDADES Y TRANSPORTES

### DE MATERIA SOBRE EL ALTIPLANO BOLIVIANO

- Jean Louis Guyot, Michel Alain Roche  
ORSTOM/PHICAB, c.p. 8714, La Paz, Bolivia
- Luis Noriega, Hector Calle y José Cortés  
SENAMHI, c.p. 996, La Paz, Bolivia
- Jorge Quintanilla, Moises Calliconde  
I.Q.Q. - UMSA, c.p. 303, La Paz, Bolivia

### RESUMEN

Las características de las salinidades y de los contenidos en suspensión de los cursos de agua del conjunto de la cuenca endorreica del lago Titicaca, río Desaguadero, lago Poopó y Salares, así como su evolución de la parte alta hacia la parte baja, son puestos en evidencia sobre la base de los resultados de cuatro campañas de muestreo repartidas durante el período de escurrimiento. Por otra parte, los regímenes de salinidades, contenidos en suspensión, transporte de materia son caracterizados gracias a medidas y muestreos efectuados periódicamente en estaciones hidrométricas durante muchos años. La unión efectiva durante los años 1986 y 1987 entre el lago Poopó y el Salar de Coipasa es señalada, recordando que en diversas épocas del Cuaternario existió un lago terminal único de gran extensión en esta región. Las tasas de erosión mecánica y de erosión química han podido ser calculadas para las cuencas que drenan la Cordillera Occidental (río Mauri) y Oriental (río Suchez) de los Andes bolivianos. Lo esencial de los sedimentos proviene de la Cordillera Occidental, con una tasa de erosión mecánica de  $640 \text{ T. Km}^{-2} \cdot \text{año}^{-1}$ , para la cuenca del río Mauri. Por el contrario, es el lago Titicaca, por intermedio del río Desaguadero, el que provee la mayor parte de las materias en solución que son depositadas en el lago Poopó.

### INTRODUCCION

El lago Titicaca y sus tributarios, su exutorio el río Desaguadero que alimenta el lago Poopó, el río Lacajahuira que asegura excepcionalmente la conexión entre este lago y el Salar de Coipasa y el Salar de Uyuni, constituyen, en el corazón de los altos Andes, los principales ejes de drenaje de la vasta cuenca endorreica del Altiplano. El Programa Climatológico e Hidrológico de Bolivia (PHICAB)<sup>x</sup> ha ejecutado muchas operaciones para el estudio de la físico-química de las aguas de la parte alta hacia

la parte baja del Altiplano boliviano, a fin de completar y ampliar los conocimientos preliminares obtenidos particularmente por O. Ballivián y F. Risacher (1981); J.P. Carmouze et al. (1981). Cuatro campañas de muestreo y medidas han tenido lugar durante 1987 y 1988 para caracterizar la salinidad de los numerosos tributarios de los lagos. Por otra parte, los transportes de sedimentos en suspensión han sido evaluados durante el período 1976-1982 para las cuencas andinas que alimentan en Bolivia el lago Titicaca y el río Desaguadero en la parte superior del lago Poopó; sobre la base de datos disponibles en tres estaciones hidrométricas del SENAMHI. Igualmente, las cantidades de materias disueltas transportadas desde el lago Titicaca y desde la Cordillera Occidental de los Andes, hacia el lago Poopó por el río Desaguadero han sido calculadas mediante los datos físico-químicos adquiridos por el PHICAB a partir de 1983 en tres estaciones hidrométricas.

Las distribuciones espacio temporales de los contenidos disueltos y en suspensión, así como los regímenes de aportes de materia han podido ser caracterizados paralelamente a los aportes hídricos, para los cuales las observaciones están disponibles sobre un período máximo de una veintena de años según las estaciones.

#### PRESENTACION DE LA CUENCA

-----

La cuenca cerrada del Altiplano cubre una superficie de 191.000 Km<sup>2</sup>, donde el 27% corresponde al Perú, el 4% a Chile y el 69% a Bolivia (fig. 1). Se trata de una vasta depresión alargada, de un anchura media de 200 Km. por una longitud total de alrededor 100 Km. encajado entre los relieves de las cordilleras Oriental y Occidental de los Andes. Muchas Sub-cuencas pueden ser individualizadas : la cuenca del lago Titicaca hasta Desaguadero (57.100 Km<sup>2</sup>. donde el 80% está situado en el Perú); la cuenca del lago Poopo hasta Pampa Aullagas (57.200 Km<sup>2</sup>. donde el 10% está situado en el Perú, el 3% en Chile); la cuenca del Salar de Coipasa (30.200 Km<sup>2</sup>. donde el 20% está situado en Chile), y la cuenca del salar de Uyuni (46.600 Km<sup>2</sup>). Con cumbres elevadas vecinas de 6.500 m. en las cordilleras Occidental (Illampu) y

-----  
x Instituciones que lo conforman

- ORSTOM : Instituto Francés de la Investigación Científica para el Desarrollo en Cooperación.
- SENAMHI : Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Bolivia.
- IQQ-UMSA : Instituto de Investigaciones Químicas de la Universidad mayor de San Andrés - La Paz.
- IHH-UMSA : Instituto de Hidráulica e Hidrología de la Universidad Mayor de San Andrés, La Paz.

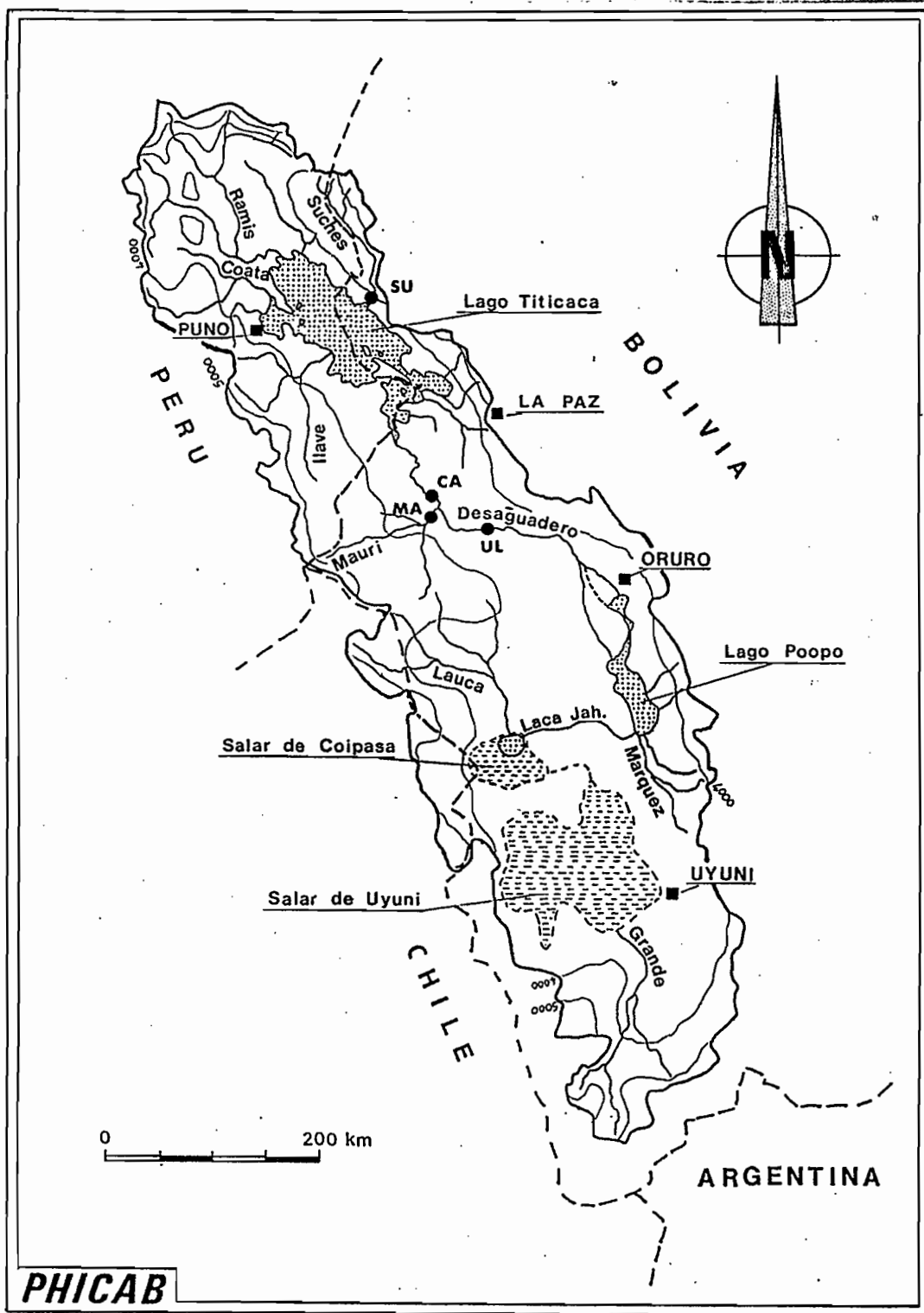


Fig. 1 : Carta de la cuenca endorreica del Altiplano, localización de las estaciones de medida, ver Tabla 1 para el código de las estaciones.



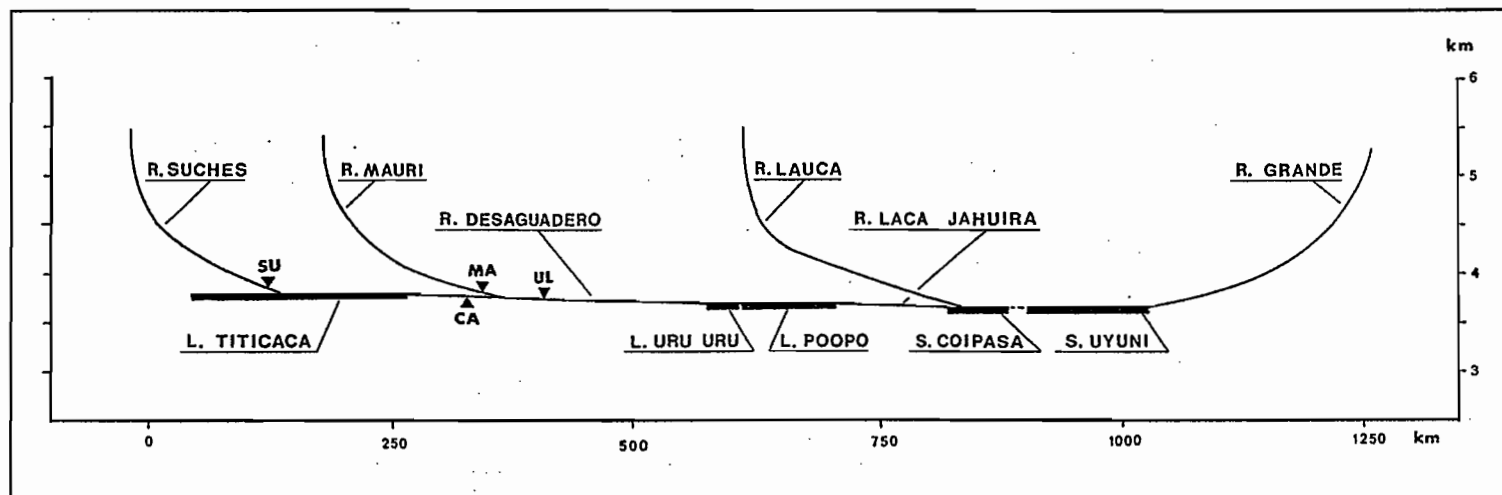


Fig. 2 . : Perfil longitudinal del sistema fluvio lacustre del Altiplano boliviano, ver Tabla 1 para el código de las estaciones.

do que los aportes meteóricos son sensiblemente iguales a los aportes de los afluentes, y que más del 80% de los aportes totales son eliminados por la evaporación. El río Desaguadero juega un rol despreciable y no participará más que en el 5% de las pérdidas del lago (Carmouze et al., 1978; Carmouze et al., 1981; Lozada, G., 1985).

La hidrología del Sur del Altiplano es poco conocida. Dos balances de la cuenca del lago Poopó han sido realizados, el primero con un método hidroquímico (Carmouze et al., 1978) y el otro, mediante un balance climático (Mariaca, 1985). Estos dos estudios han mostrado que se trata de un medio cerrado sin exutorio superficial y donde los aportes se deben principalmente a los afluentes, especialmente el río Desaguadero.

Las estaciones hidrométricas utilizadas para el estudio de los transportes de materia, están todas situadas en la mitad Norte de la cuenca vertiente, es decir río arriba del sistema. El Sur del Altiplano es una zona muy poco poblada de difícil acceso (Tabla 1).

Tabla 1 : Características de las estaciones hidrométricas

CODIGO	ESTACION	RIO	ALTITUD(m.)	SUPERFICIE(Km <sup>2</sup> )
SU	ESCOMA	SUCHEZ	3.850	3.100
CA	CALACOTO	DESAGUADERO	3.790	9.800 + 57.100 x
MA	CALACOTO	MAURI	3.790	9.400
UL	ULLOMA	DESAGUADERO	3.775	22.800 + 57.100 x

x Superficie de la cuenca del lago Titicaca

La estación de Calacoto sobre el río Desaguadero va a permitir caracterizar los aportes del lago Titicaca, a pesar de la influencia de una cuenca vertiente residual de 9.800 Km<sup>2</sup>. Las estaciones de Escoma sobre el río Suchez y de Calacoto sobre el río Mauri, van a dar indicaciones sobre el régimen de los aportes de las cordilleras Oriental y Occidental de los Andes. Finalmente la estación de Ulloma proporcionará una idea de los aportes por el Desaguadero al lago Poopó y a la planicie de inundación adyunta.

Las medidas de materias en suspensión fueron efectuadas de 1976 a 1982, los regímenes hidrológicos de los cursos de agua estudiados van a ser descritos para este mismo período. Se descargan caudales medios diferentes respecto a aquellos publicados en los anteriores estudios. Así el río Ramis, tributario peruano del lago Titicaca presenta los módulos siguientes : 71 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, para

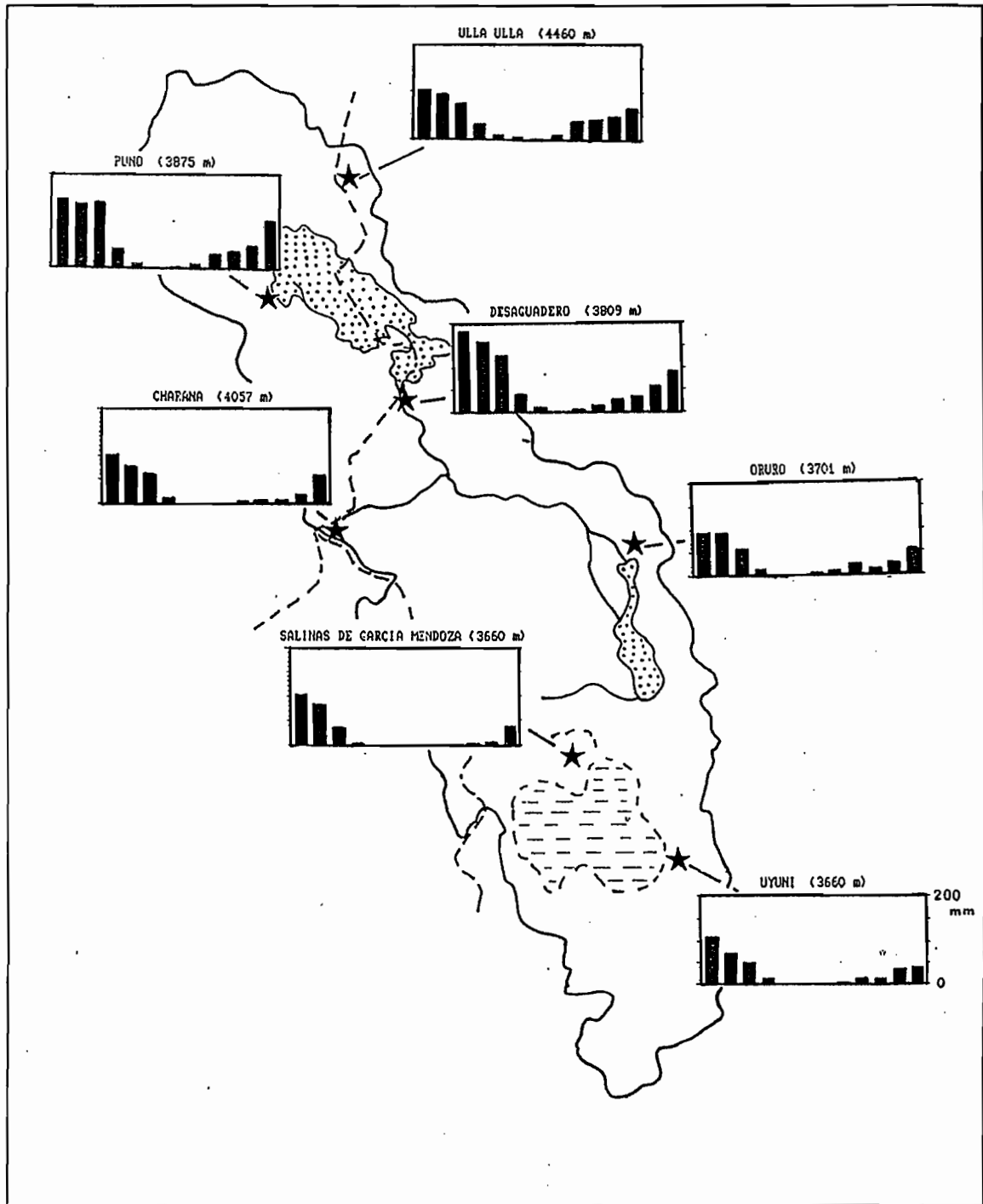


Fig. 3 : El régimen de las precipitaciones sobre el Altiplano (1968-1982), según Lozada (1985) y Mariaca (1985).



el período 1956-1973 (Carmouze et al., 1978),  $75 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , para el período 1956-1978 (Carmouze et al., 1981),  $66 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , para el período 1968-1982 (Lozada G., 1985) y, finalmente,  $73 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , para el período 1976-1982.

En cambio, la evolución de las mineralizaciones en las estaciones de Calacoto (ríos Mauri y Desaguadero) y de Ulloma ha sido seguida por el PHICAB desde 1983. Para este período reciente, la información de los caudales son incompletas o, a veces, inexistentes; salvo en la estación de Calacoto para el río Desaguadero. Parece que el módulo de este río es de  $94 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , para el período 1983-1988 y sólo de  $52 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , para el período 1976-1982, para un caudal medio anual de  $46 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , para el conjunto de medidas de 1964-1988. La fuerte variabilidad de los módulos del río Desaguadero está ligada a nivel del lago Titicaca (fig. 4). Los períodos de estudio (1976-1982 y 1983-1988) son períodos de mayor hidraulicidad en relación a la media de 1928-1988. Este excedente pluviométrico es todavía más marcado para el segundo período, lo que tendrá como consecuencia las dramáticas inundaciones en los bordes del lago Titicaca, de la región de Oruro y, finalmente, del lago Poopó, donde la subida de las aguas va a volver a desaguar y escurrir en el río Lacajahuira. Este curso de agua dreña entonces desde 1985 las aguas del lago Poopó hacia el Salar de Coipasa. En ausencia de estaciones de medidas, algunos afloramientos puntuales fueron realizados por el PHICAB sobre este río. Los caudales registrados varían de  $4 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (Febrero 1988) a  $120 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (Abril 1988).

Los regímenes hidrológicos de los tributarios andinos (ríos Ramis, Suhez y Mauri) son parecidos y presentan una distribución de los caudales medios mensuales comparable a la distribución de las precipitaciones (fig. 5). Las aguas altas, de Enero a Marzo, son entonces responsables del 55% (río Suhez) y del 66% (río Ramis) del caudal medio anual. El régimen del río Desaguadero en Calacoto es idéntico a la distribución de las alturas medias mensuales del nivel del lago Titicaca en Huatajata, lo que tiende a probar que el río Desaguadero en Calacoto es esencialmente alimentado por las aguas del lago Titicaca. Por el contrario, en la estación de Ulloma, la influencia del río Mauri de origen andino es muy sensible y el río Desaguadero presenta entonces un régimen mixto con un máximo de crecida de Enero a Marzo, luego de un decrecimiento lento de los caudales y la ausencia de estiaje pronunciado.

## LAS MATERIAS EN SUSPENSION

-----

Las campañas de muestreo, de materia en suspensión (MES), realizadas por el SENAMHI de 1976 a 1982 en las estaciones de Escoma, Calacoto y Ulloma, han permitido estimar los transportes de sedimentos sobre este sistema fluvio-lacustre del Altiplano.



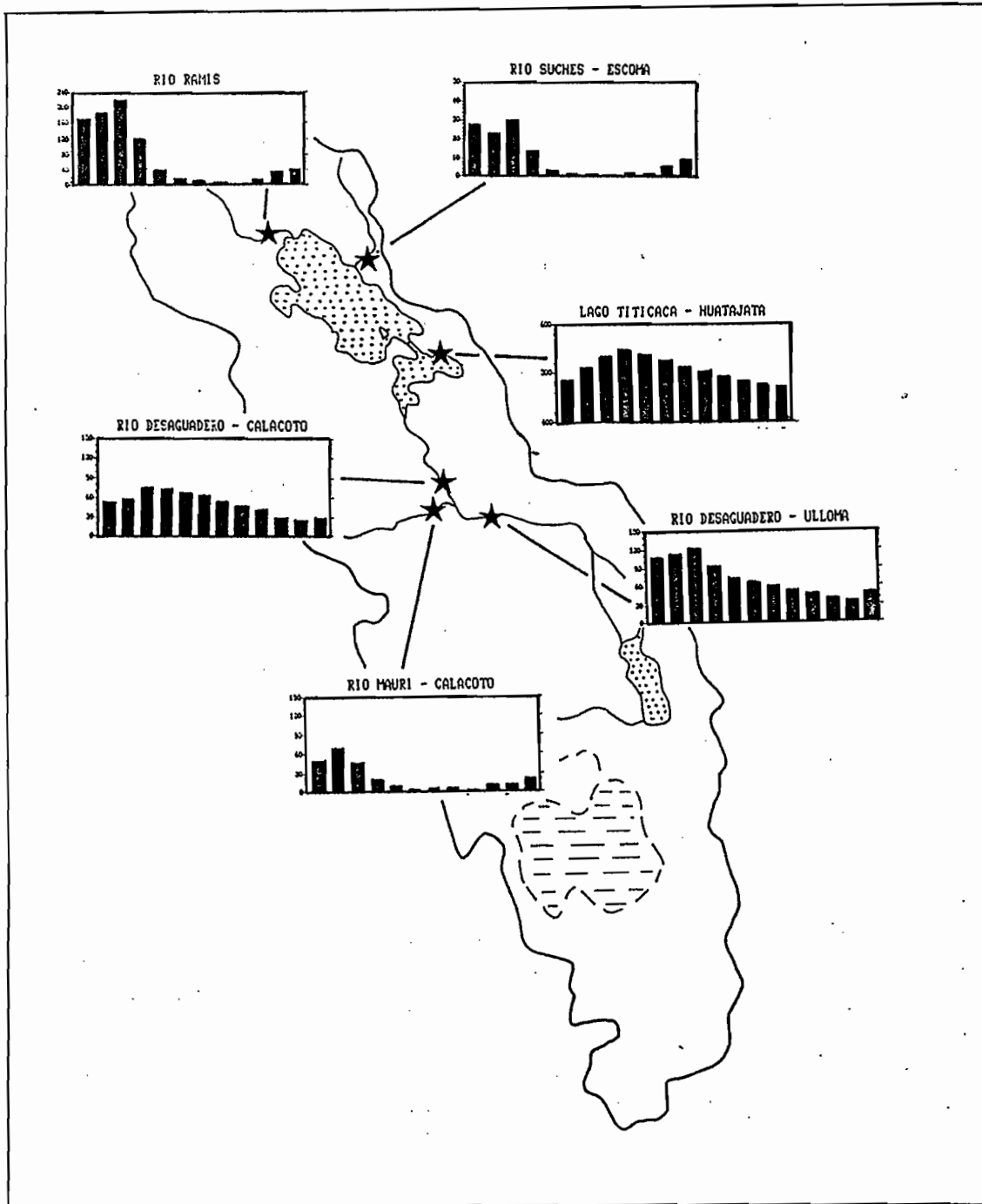


Fig. 5 : El régimen hidrológico de los cursos de agua del Altiplano y los niveles del lago Titicaca en Huatajata (1976-1982), según los datos de SENAMHI de Perú y Bolivia.

Parece, ciertamente, que lo esencial de la exportación de los sedimentos, para todas las estaciones, se produce de Diciembre a Marzo y corresponde al regimen pluviométrico, es decir a las crecidas de los cursos de agua andinos (fig. 6). Los tres meses de fuerte exportación representan así del 71% (río Desaguadero en Calacoto), al 81% (río Suchez y Mauri) del volumen anual de sedimentos. El río Desaguadero en Calacoto presenta la misma distribución que el río Mauri, pero con valores 10 veces más débiles (Tabla 2).

TABLA 2 : Transporte de sedimentos (1976 - 1982)

CODIGO	CAUDAL ( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	M.E.S. ( $mg \cdot l^{-1}$ )	CAUDAL SOLIDO ( $10^6 \cdot ton \cdot año^{-1}$ )	EROSION ( $ton \cdot Km^{-2} \cdot año^{-1}$ )
SU	10	180	0,07	21
CA	52	250	0,58	59
MA	22	---	6,00 x	640
UL	73	1800	6,60	290

x Obtenido por diferencia entre UL y CA

El lago Titicaca no aporta MES al río Desaguadero, las tasas de erosión en las estaciones de Calacoto y Ulloma han sido calculadas sin tener en cuenta la superficie de la cuenca vertiente del lago Titicaca.

Lo esencial de los aportes en sedimentos parece provenir de los ríos de la Cordillera Occidental. Los ríos Suchez y Mauri que son alimentados respectivamente por las cordilleras Oriental y Occidental; con un perfil similitar a lo largo, presentan flujos de sedimentos muy diferentes, ligados a la naturaleza geológica de su cuenca vertiente. El río Suchez drena, en efecto, la Cordillera de Apolobamba constituida de series detríticas del Primario, mientras que el río Mauri atravieza series volcano-sedimentarias del Terciario. la participación del río Desaguadero en la parte superior de Calacoto es débil, las materias en suspensión (MES) provenientes de las series sedimentarias del Altiplano donde el relieve es poco contrastado.

#### LAS MATERIAS EN SOLUCION

El régimen de materias en solución, estudiado en las estaciones de Calacoto y Ulloma por el PHICAB desde 1983, muestran distribuciones mensuales cercanas a la distribución de los caudales en

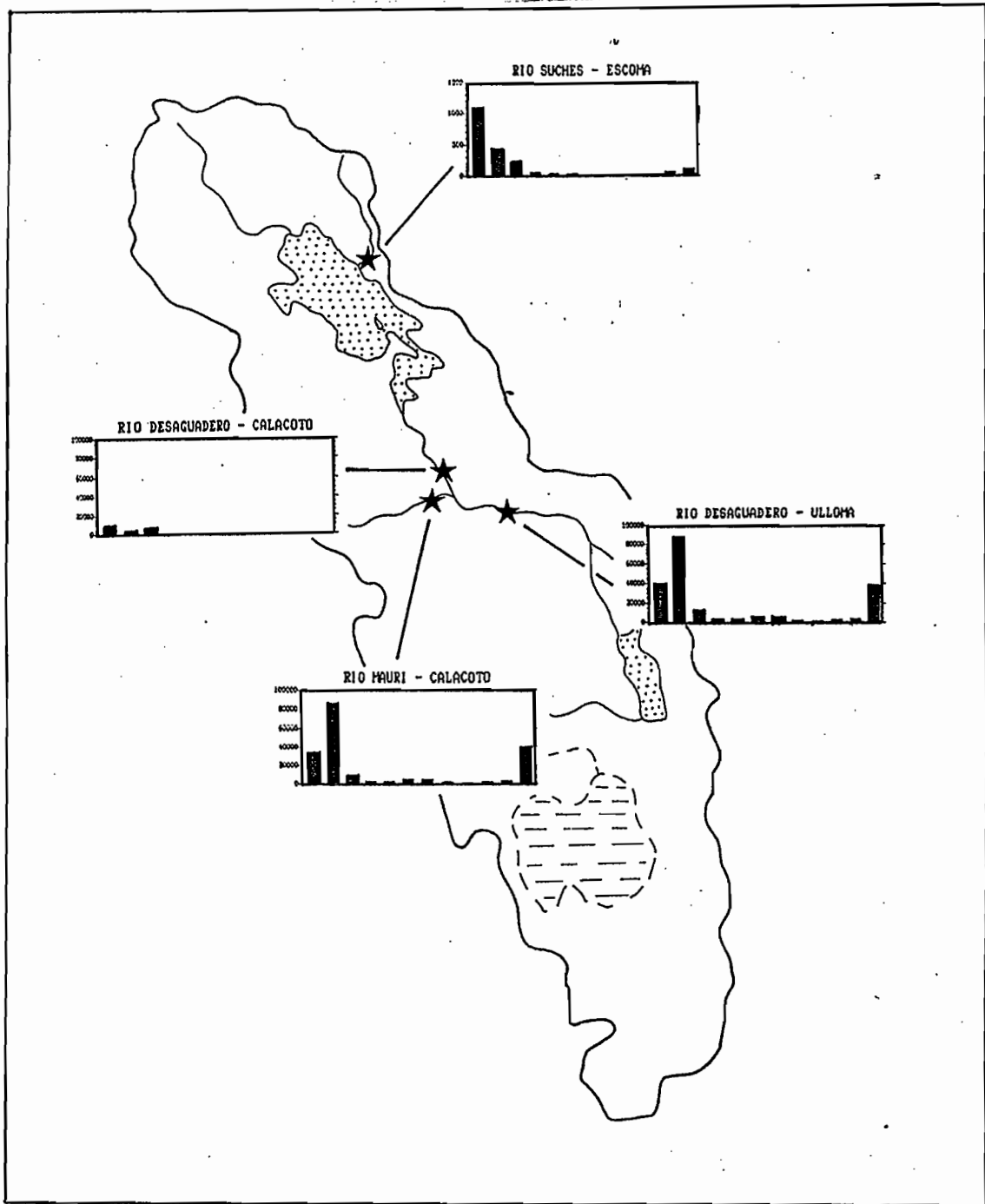


Fig. 6 : El régimen de las exportaciones de sedimentos sobre el Altiplano boliviano (1976-1982).

las mismas estaciones (fig. 7), con un máximo en Abril y Mayo para el río Desaguadero en Calacoto, y de Diciembre a Marzo para el río Mauri. El río Desaguadero en Ulloma presenta, igualmente, una distribución mixta. La variación interanual de los flujos de materia disuelta es netamente menos fuerte que para los sedimentos. Los tres meses de más fuerte transporte en solución sólo son responsables del 34% (río Desaguadero en Ulloma) al 46% (río Desaguadero en Calacoto) del volumen anual de las materias disueltas. El aporte del río Suchez, que drena los macizos del Paleozoico, al Titicaca es muy débil (Carmouze et al., 1981). Lo esencial del aporte de materias en solución (70%) es suministrado por el río Desaguadero, es decir proviene del lago Titicaca (Tabla 3).

**TABLA 3 : Transporte de materias en solución (1983 - 1988)**

CODIGO	CAUDAL $m^3 \cdot s^{-1}$	MINERALIZACIONES ( $mg \cdot l^{-1}$ )	CAUDAL DISUELTO ( $10^6 \cdot ton \cdot año^{-1}$ )	EROSION ( $ton \cdot Km^{-2} \cdot año^{-1}$ )
SU	15 x	60	0,03 x	9 x
CA	94	670	1,80	-
MA	36 x	540	0,80 x	87 x
UL	130 x	660	2,60 x	-

x Valores estimados

La evolución de las mineralizaciones del río Desaguadero en Calacoto, durante los ciclos hidrológicos de 1983/1984/1985 (fig. 8), muestran una inversión clásica entre la curva de caudales y la de las mineralizaciones. Las crecidas debidas a las precipitaciones sobre la cuenca vertiente comprendida entre la estación y el lago Titicaca, se traducen por una caída de la mineralización. Al final del estiaje, las materias disueltas tienen tendencia a aumentar, probablemente en relación con la alimentación del río Desaguadero por las napas aluviales. Después de las crecidas, la mineralización aumenta rápidamente hasta un nivel estable que corresponde en efecto a la salinidad de las aguas del lago Titicaca. Esta planicie presenta una lenta evolución en la parte baja para el período considerado, por el hecho del aumento del escurrimiento superficial del sistema.

#### CARACTERIZACION FISICO QUIMICA DE LOS CURSOS DE AGUA

En el marco del PHICAB, cuatro campañas de muestreo han sido

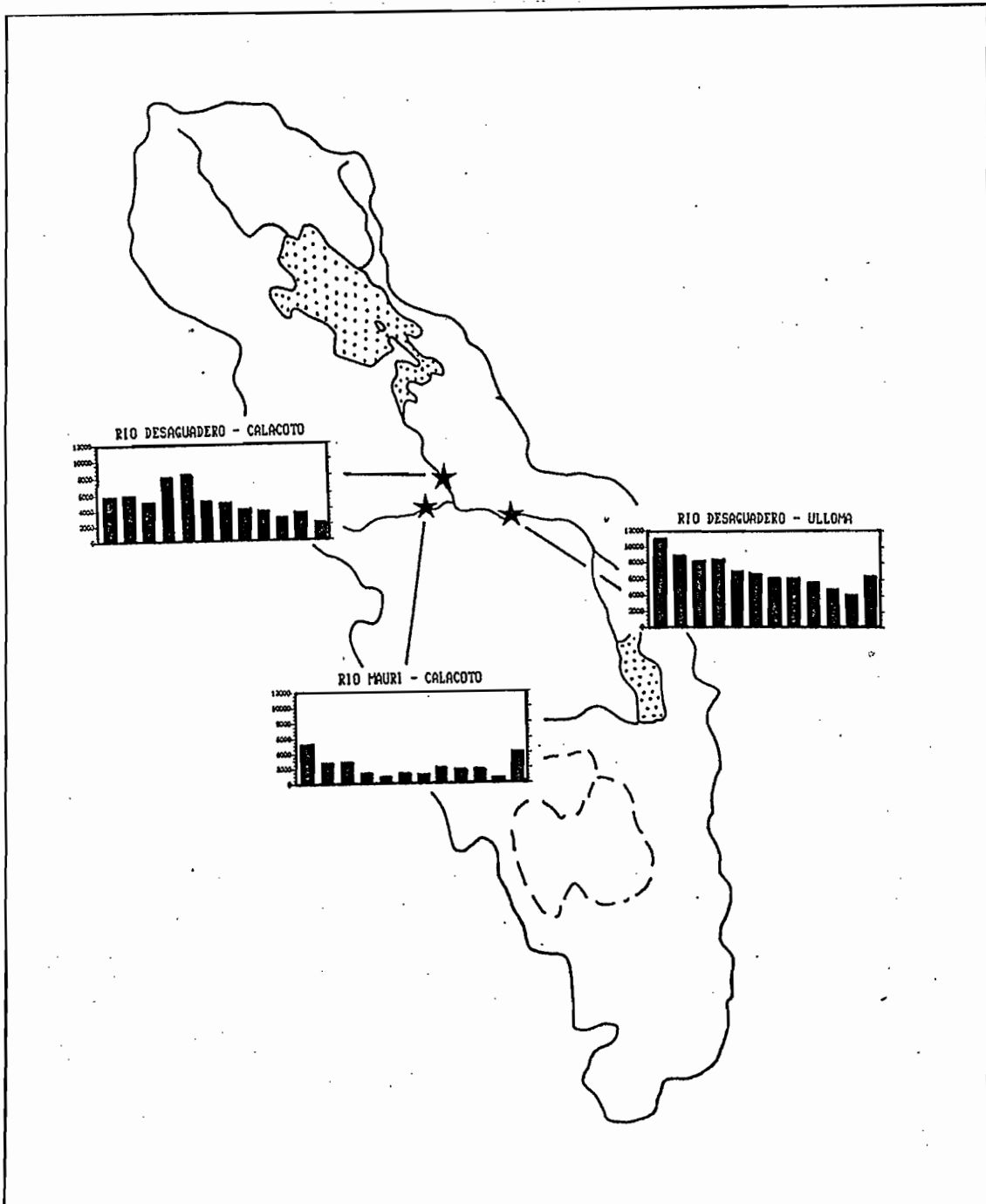


Fig. 7 : El régimen de las exportaciones de materias disueltas sobre el Altiplano boliviano (1983-1988).

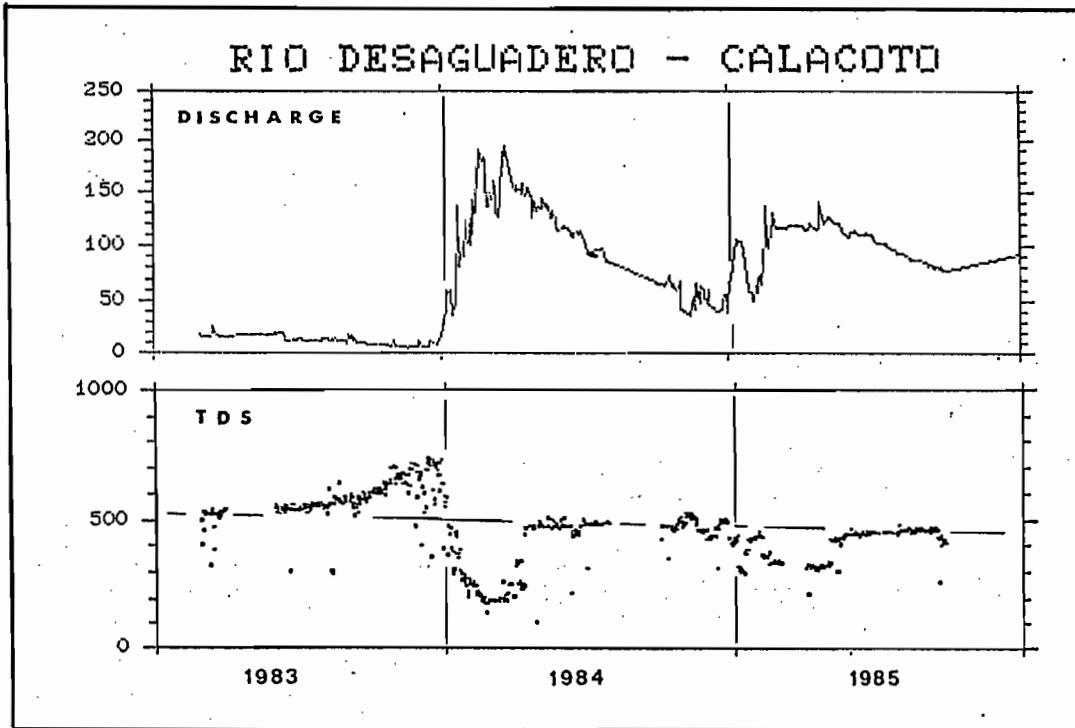


Fig. 8 : Evolución diaria de los caudales y de la mineralización del río Desaguadero en la estación de Calacoto (1983-1985).



realizadas sobre el conjunto de la cuenca vertiente endorreica del Altiplano boliviano, acompañadas de aforamientos sobre los principales cursos de agua y de análisis físico-químicos efectuados en el Instituto de Investigaciones Químicas de la UMSA. Estas campañas tuvieron lugar en Septiembre y Diciembre de 1987 así como en Febrero y Abril de 1988.

Las aguas del sistema fluvio lacustre Titicaca-Desaguadero-Poopó-Lacajahuira-Coipasa-Uyuni son de tipo cloruro sódico con un aumento progresivo de la mineralización desde río arriba hacia río abajo (fig. 9), con contenidos del orden de 0,5 g/l, en el lago Titicaca, hasta más de 300 g/l para las salmueras de los salares de Coipasa y Uyuni (Ballivián et al., 1981). Los tributarios de este sistema, provenientes de la Cordillera Occidental o aún del Altiplano, presentan generalmente las mismas facies Cloruro sódicas, alguna vez sulfato sódicas. Por el contrario, los cursos de agua nacidos de la Cordillera Oriental, débilmente mineralizados, son esencialmente de tipo bicarbonato cálcico, a veces de magnesio con facies localmente de sulfato de calcio ligadas a fuentes termales.

La evolución del río arriba hacia abajo de los contenidos en solución y en suspensión sobre el conjunto del sistema fluvio-lacustre, a partir de valores medios de cuatro campañas de muestreo (fig. 10), muestra un aumento progresivo del caudal del río Desaguadero hasta el Puente Japonés, es decir hasta la entrada a las planicies de inundación. Este caudal disminuye considerablemente al atravesar el lago Poopó, testimoniando así una fuerte evaporación. La carga en sedimentos MES, disminuye fuertemente durante la travesía del lago Titicaca; la totalidad de las suspensiones van a sedimentar en el lago. Seguidamente, los contenidos aumentan progresivamente a lo largo del río Desaguadero, al mismo tiempo que los caudales, para caer desde la entrada en la zona de inundación del sistema Uru-Uru/Poopó. Estas suspensiones van a sedimentar en este medio lacustre para no presentar, a la salida del lago Poopó, más que contenidos despreciables. La carga de materias en solución se mantiene relativamente estable a lo largo del río Desaguadero, desde la salida del lago Titicaca hasta el lago Poopó. Después, la mineralización aumenta fuertemente, a la inversa de los caudales, por el efecto de la evaporación.

## CONCLUSIONES

-----

Las campañas de muestreo realizadas sobre el conjunto de la cuenca endorreica del Altiplano boliviano, han permitido caracterizar, desde un punto de vista hidroquímico, los diferentes tributarios andinos de este sistema. Las aguas nacientes de la Cordillera Oriental están débilmente mineralizadas; generalmente de tipo bicarbonato cálcico y presentan contenidos de MES muy

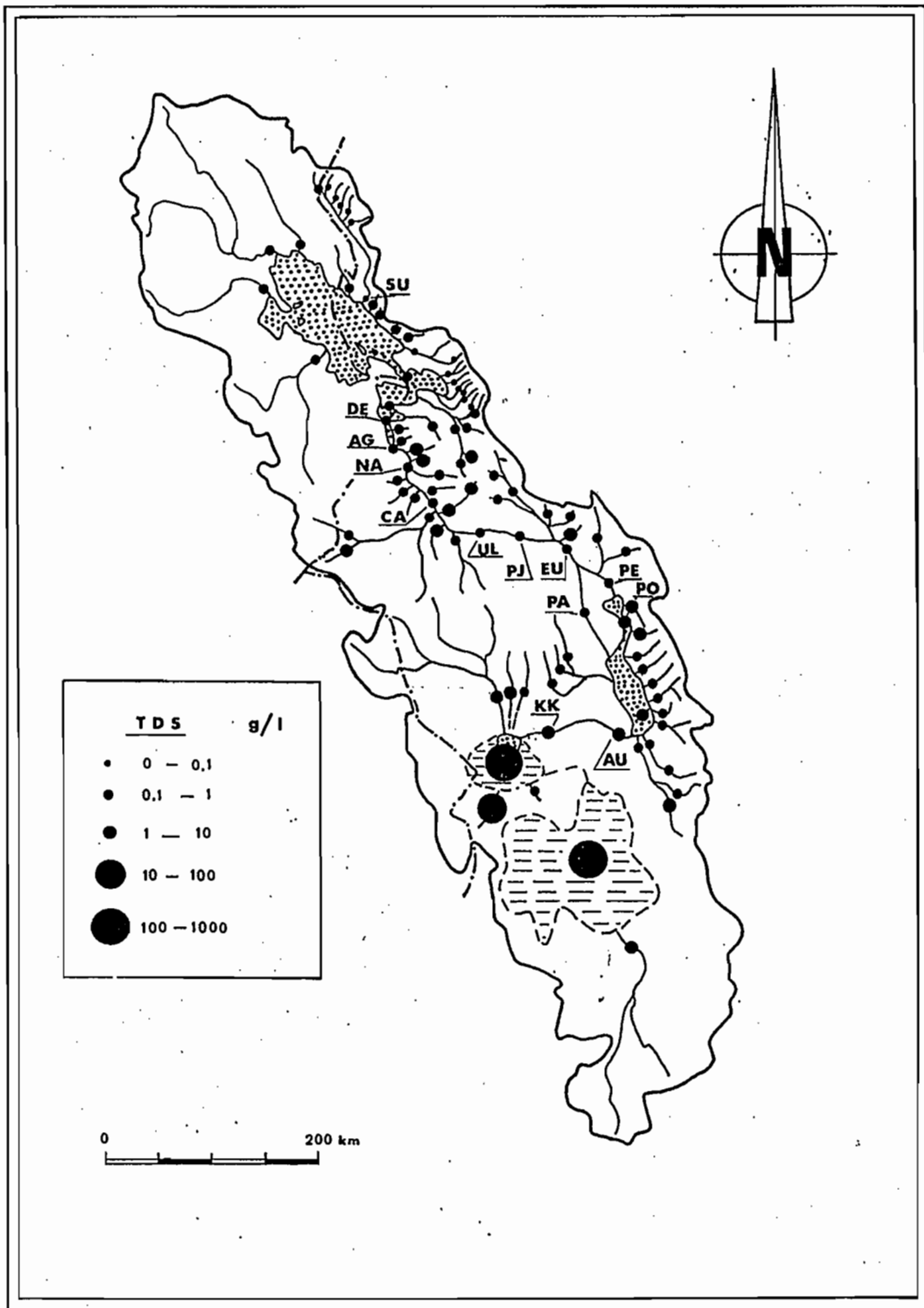


Fig. 9 : Carta de las mineralizaciones de los cursos de agua y de los lagos del Altiplano boliviano.

débiles. Los cursos de agua del Altiplano y aquellos provenientes de la Cordillera Occidental son en general muy mineralizados y de tipo cloruro sódico. La evolución del río de arriba hacia abajo muestra un aumento de la mineralización luego de la travesía de las planicies inundables y de los lagos, ligada a la evaporación. A la inversa, las materias en suspensión nacidas principalmente de la Cordillera Occidental van a sedimentar luego de la travesía de este sistema fluvio-lacustre. A partir de resultados de un muestreo regular en algunas estaciones, el balance de los flujos de materias transportadas ha sido llevado a cabo. Las tasas de erosión mecánica observadas van de  $21 \text{ ton.Km}^{-2}.\text{año}^{-1}$  para la cuenca del río Suchez que drena un pequeño macizo de la Cordillera Oriental, a  $640 \text{ ton.Km}^{-2}.\text{año}^{-1}$  para la cuenca del río Mauri formado por series volcano sedimentarias de la Cordillera Occidental. El balance de las materias disueltas muestra que una gran parte de ellas provienen del lago Titicaca (70%). Las tasas de erosión química para las cuencas de los ríos Suchez y Mauri son, respectivamente, de 9 y  $87 \text{ ton. Km}^{-2}.\text{año}^{-1}$ ; sea 2 y 7 veces menos que la erosión mecánica.

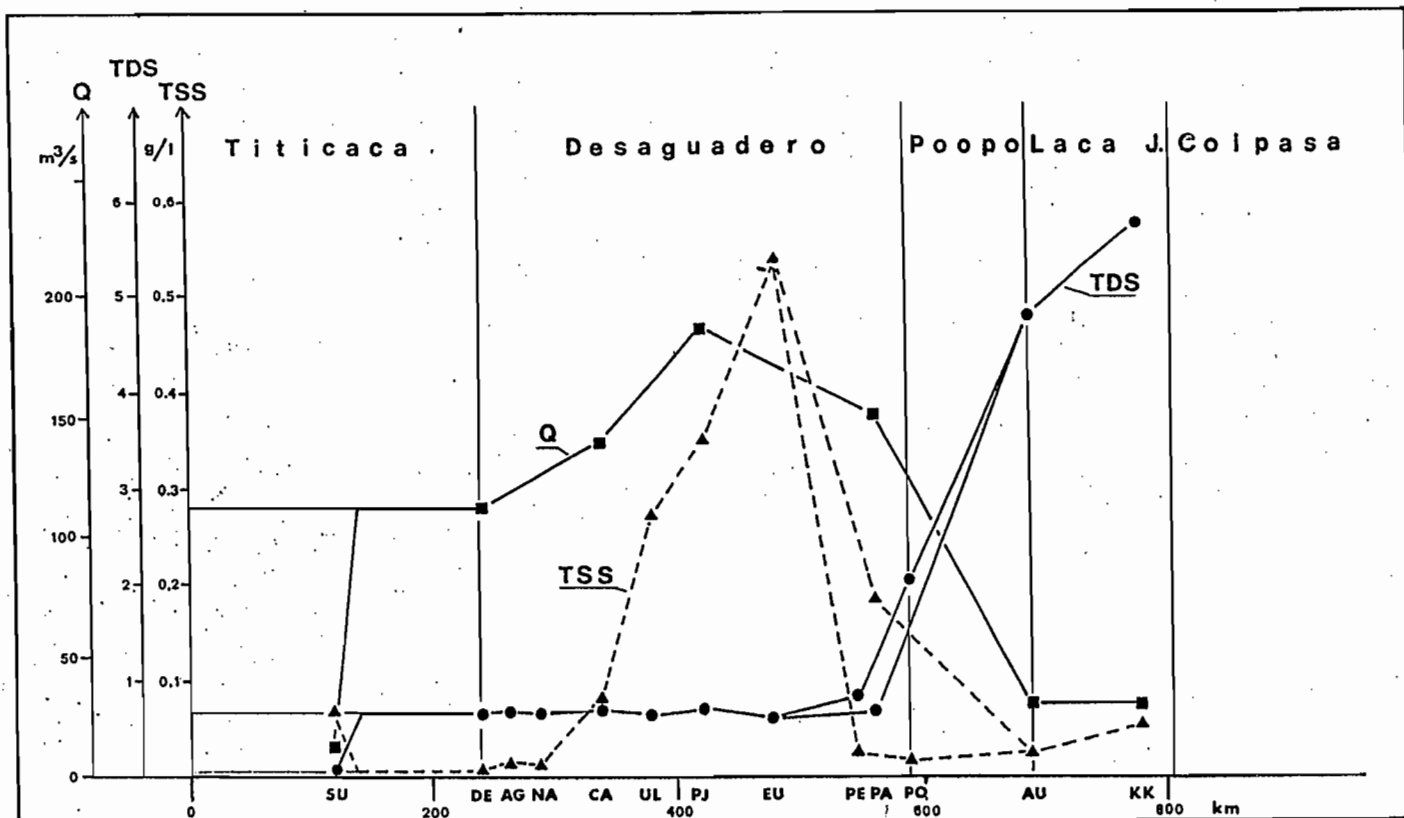


Fig. 10 : Evolución del río arriba hacia abajo, de los contenidos medios en materias en suspensión y en solución, a lo largo del sistema lago Titicaca - río Desaguadero - Lago Poopó - Río Lacajahuira (Septiembre 1987 - Abril 1988).

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

---

- Ballivián O. y Risacher F. (1981).- Los salares del Altiplano boliviano. ORSTOM publ., 246 p.
- Carmouze J.P.; Arze C. y Quintanilla J. (1978).- Circulación de materia (agua-sales disueltas) a través del sistema fluvio lacustre del Altiplano; la regulación hídrica e hidroquímica de los lagos Titicaca y Poopó. Cah. ORSTOM, Ser. Geol. (10) 1, 49-68.
- Carmouze J.P. y Aquize Jean 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. y Quintanilla J. (1981).- Régulation hydrochimique du lac Titicaca et l'hydrochimie de ses tributaires. Rev. Hydrobiol. Trop. 14(4), 329-348.
- Lozada Encinas G.A. (1985).- Balance hídrico de la cuenca del lago Titicaca. PHICAB publ., 158 p.
- Mariaca Carrasco J. (1985).- Balance hídrico de la cuenca del lago Poopó y los salares Uyuni y Coipasa. PHICAB publ., 203 p.
- Roche M.A. y Rocha N. (1985).- Mapa pluviométrico de Bolivia y regiones vecinas. PHICAB, 1 hoja offset-color.
- Servant M. y Fontes J. Ch (1978).- Les lacs quaternaires des hauts plateaux des Andes boliviennes. Premières interprétations paleo-climatiques. Cah. ORSTOM, Ser. Géologie. Vol X, N° 1, 9-23 p.