

CARGAS EN SUSPENSION, SALINIDADES Y TRANSPORTES DE MATERIA SOBRE EL ALTIPLANO BOLIVIANO

Jorge Quintanilla; Moisés Calliconde
I. I. Q. UMSA, c. p. 303, La Paz, Bolivia

Jean Louis Guyot, Michel Alain Roche
ORSTOM/PHICAB, c. p. 8714, La Paz, Bolivia

Luis Noriega, Héctor Calle y José Cortés
SENAMHI, c. p. 996, La Paz, Bolivia

PRESENTACION DE LA CUENCA

La cuenca cerrada del Altiplano cubre una superficie de 191.000 Km², don el 27% corresponde al Perú, el 4% a Chile y el 69% a Bolivia (Fig. 1), se trata de una vasta depresión alargada, de una anchura media de 200 Km. por una longitud total de alrededor de 1000 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 y su exútorio el río Desaguadero (57.100 Km² donde el 80% está situado en el Perú; La cuenca del Lago Poopó hasta Pampa Aullagas (57.200 Km², donde el 10% está situado en el Perú, el 3% en Chile); la cuenca del Salar de Coipasa (30.200 Km², donde el 20% está situado en Chile); y la cuenca del Salar de Uyuni (46.600 Km²) con cumbres elevadas vecinas de 6.500 m. en las cordilleras Occidental (Sajama), Oriental (Illampu) y una altitud mínima de 3.650 m. en el salar de Uyuni, el sistema fluvio lacustre del Altiplano presenta una pendiente media de 0,02% Dos dominios topográficos se individualizan; el dominio de los cursos de agua Andinos (ríos Suchez, Mauri, Lauca, Grande, etc.) con gradiente fuerte y el sistema de los lagos y salares unidos entre sí por el río Desaguadero y Lacajahuira. Después de los altos niveles alcanzados y observados en el lago Titicaca y lago Poopó, a partir de 1985; la alimentación del

Salar de Coipasa por el lago Poopó a través del río Lacajahuira, normalmente seco, ha llegado a ser efectiva a partir de esa fecha. Esta conexión excepcional recuerda que durante el Cuaternario establecía durante diversas épocas un lago terminal único, de gran extensión en esta región (Servant M. y Fontes C., 1978).

Las precipitaciones disminuyen desde la cuenca alta hacia la cuenca baja (Roche M. A., 1985), es decir del Norte hacia el Sur, con una pluviometría promedio de 710 mm., para la cuenca del lago Titicaca (Lozada G., 1985); de 390 mm para la cuenca del lago Poopó; de 240 mm., para la cuenca del Salar de Uyuni (Mariaca, J. 1985), Al contrario, el régimen pluviométrico en uniforme, con una estación de lluvias bien marcada de Diciembre a Marzo.

Los tres meses má lluviosos representan un 51% en los Andes de la Cordillera Oriental (Vila-Vila) y un 81 % en el Sur del Altiplano boliviano (Salinas de Garci Mendoza) del volúmen anual de las precipitaciones. Los tres meses más secos (de Mayo a Julio), solamente corresponden respectivamente a un 4,2% y 0,4% de este mismo volúmen.

Así, con precipitaciones inferiores a 200 mm., concentradas sobre algunos meses del año; el Sur del Altiplano está sometido a un régimen climático árido, seco y frío, con

una vegetación casi inexistente, con temperaturas medias que varían de 6 a 10 °C. y una pluviometría más importante, el Norte del Altiplano está cubierto de pastizales, que pasa rápidamente a una vegetación rasa (corta) y escasa en altitud.

El Altiplano boliviano está esencialmente ocupado por sedimentos de la edad Terciaria y Cuaternaria. Los relieves de la cordillera Occidental están formados por series eruptivas de la misma época (volcán Sajama). La cordillera Oriental, compuesta principalmente de series detríticas de la Edad Primaria presenta algunos macizos intrusivos que son el origen de las más altas cumbres (Illampu, etc.).

LA HIDROLOGIA

La Hidrología de la Cuenca del lago Titicaca ha sido objeto de numerosos estudios. El balance hídrico de este sistema ha mostrado 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 en menos del 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



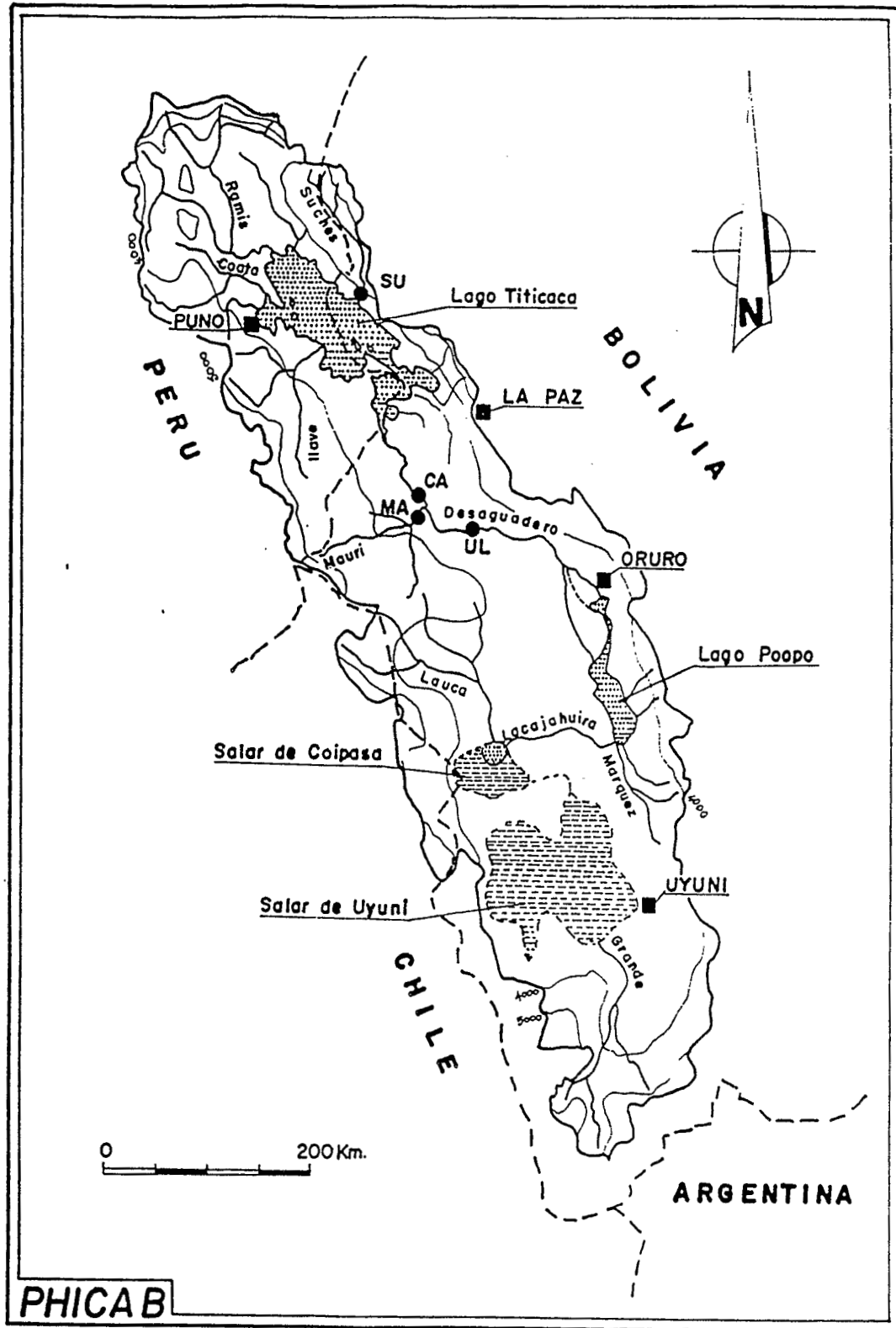


Fig 1.- MAPA DE LA CUENCA ENDORREICA DEL ALTIPLANO, LOCALIZACION DE LAS ESTACIONES DE MEDIDA

TABLA N° 1

Características de las estaciones hidrométricas

CODIGO	ESTACION	R I O	ALTITUD (m)	SUPERFICIE (Km ²)
SU	ESCOMA	SUCHEZ	3.850	3.100
CA	CALACOTO	DESAGUADERO	3.790	9.800 + 57.100 *
MA	CALACOTO	MAURI	3.790	9.400
UL	ULLOMA	DESAGUADERO	3.775	2.800 + 57.100 *

* Superficie de la cuenca del Lago Titicaca.

la cuenca del lago Poopó han sido realizadas, el primero por un método hidroquímico (Carmouze et al., 1988), y el otro mediante un balance climático (Mariaca, 1985) Estos dos estudios han mostrado que se trata de un medio cerrado, sin exútorio superficial y donde los aportes son principalmente debido a los afluentes, especialmente el río Desaguadero.

Las estaciones hidrométricas utilizadas para el estudio de los transportes de materia, están todos situados en la mitad Norte de la cuenca vertiente, es decir río arriba del sistema, el Sur del altiplano boliviano es una zona muy poco poblada de difícil acceso (Tabla N° 1).

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 Km². 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 Occidentales y Orientales 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 adjunta.

Las medidas de materias en suspensión fueron efectuadas en 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 m³/seg., para el período 1956 - 1973 (Carmouze et al, 1978). 75 m³/seg., para el período 1956 - 1978 (Carmouze et al, 1981), 66 m³/seg., para el período 1968 - 1982 (Lozada G., 1985) y finalmente 73 m³/seg., 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 éste período reciente la información de los caudales son incompletos o a veces inexistentes, salvo en la estación de Calacoto para el río Desaguadero. Parece que el módulo de este río es de 94 m³/seg., para el período 1983 - 1988 y solamente de 52 m³/seg., para el período 1976 - 1982; para un caudal medio, anual de 46 m³/seg., para el conjunto de medidas de 1964 - 1988. La fuerte variabilidad de los módulos del río Desaguadero está ligada al nivel del lago Titicaca. Los períodos de estudio (1976 - 1982 y 1983 - 1988) son períodos de más fuerte hidraulicidad en relación a la media de 1988 - 1988. Este excedente pluviométrico es todavía más marcado para el se-

gundo 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 drena entonces desde 1985 las aguas del lago Poopó hacia el Salar de Coipasa. En ausencia de estaciones de medidas, algunos aforamientos puntuales fueron realizados por el PHICAB sobre éste río, los caudales registrados varían de 4 m³/seg. (Febrero 1988) a 120 m³/seg. (Abril 1988).

Los regímenes hidrológicos de los tributarios andinos (ríos Ramis, Suchez y Mauri) son parecidos y presentan una distribución de los caudales medios mensuales comparable a la distribución de las precipitaciones.

Las aguas altas, de Enero a Marzo, son así responsables del 55% (río Suchez) 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 está esencialmente alimentado por las aguas del lago Titicaca. Al 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 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, ha permitido estimar los transportes de sedimentos sobre éste sistema fluvio-lacustre del Altiplano. Parece ciertamente que lo esencial de la exportación de los sedimentos, para todas las estaciones, se produce de Diciembre a

TABLA Nº 2

Transporte de sedimentos (1976 - 1982)

CODIGO	CAUDAL	M.E.S. (mg/l)	CAUDAL SOLIDO (10 Ton/año)	EROSION (Ton./Km ² . año)
SU	10	180	0,07	21
CA	52	250	0,58	59
MA	22	—	6,00	640
UL	73	1800	6,60	290

* Obtenido por diferencia entre UL y CA

Marzo y Corresponde al régimen pluviométrico, es decir a las crecidas de los cursos de agua andinos. 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 Nº 2).

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 de 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 similar a lo largo, presentando flujos de sedimentos muy diferentes, ligados a la naturaleza geológica de su cuenca vertiente. El río Suchez drena en efecto la cordillera de Apolobamba constituido de series detríticas del Primario, mientras que el río Mauri atraviesa 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 Calacoto y de Ulloma por el Phicab desde 1983, muestran distribuciones mensuales cercanas de la distribución de los caudales de las mismas estaciones, con un máximo en Abril y Mayo para el río Desaguadero en Calacoto, y 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 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 Nº 3).

La evolución de las mineralizaciones del río Desaguadero en Calacoto, durante los ciclos hidrológicos de 1983/1984/1985, 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 muestreos han sido

TABLA Nº 3

Transporte de materias en solución (1983 - 1988)

CODIGO	CAUDAL (m ³ /g.)	MINERALIZ (mg/l)	CAUDAL DISUELTO (10 Ton/año)	EROSION (Ton./Km ² . año)
SU	15	60	0,03*	9*
CA	94	670	1,80	-
MA	36	540	0,80*	87*
UL	130	660	2,60*	-

* Valores estimados.

realizadas sobre el conjunto de la cuenca vertiente endorréica del altiplano boliviano, acompañadas de aforamientos sobre los principales cursos de agua y de análisis físico químicos efectuados en el I. I. Q. 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, 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 de Uyuni (Ballivián et al., 1981). Los tributarios de éste sistema provenientes de la cordillera Occidental o aún del Altiplano presentan generalmente la misma facies cloruro sódica, alguna vez sulfato sódico. Al contrario, los cursos de agua nacidos de la cordillera Occidental que son débilmente mineralizados, son esencialmente de tipo bicarbonato cálcico, a veces de magnesio con facies localmente de sulfato de calcio ligados 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. 2), 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 de sedimentos (TSS) 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 éste medio lacustre para no presentar a la salida del lago Poopó que contenidos despreciables. La carga de materias en solución (TDS) 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 endorréica del Altiplano boliviano han permitido caracterizar desde un punto de vista hidroquímico los diferentes tributarios andinos de este sistema. Las aguas nacientes de tipo bicarbonato cálcico y presentando contenidos de MES muy débiles. Los cursos de agua del Altiplano y aquellas 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 han sido ejecutados. Las tasas de erosión mecánica observados van de 21 t/km² año para la cuenca del Río Suhez que drena un pequeño macizo de la cordillera Oriental, a 640 t/km² año para la cuenca del río Mauri formado de 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 Suhez y Mauri son respectivamente de 9 y 87 t/km², o sea 2 y 7 veces menos que la erosión mecánica.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Ballivián G. y Ricsacher F. (1981).-

Los salares del Altiplano boliviano. Orstom Publ., 264 p. p.

Carmouze J. P., Arze 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 Jaen E. (1981).-

La régulation hidrique 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. p.

Mariaca Carrasco J. (1985).-

Balance hídrico de la cuenca del lago Poopó y los salares Uyuni y Coipasa. PHICAB Publ. 203 p. p.

Servant M. et Fontes J. Ch. (1978).-

Les lacs quaternaires del haut plateaux des Andes boliviennes. Premieres interprétations paleoclimatiques. Cah.

ORSTON, Ser Geologie.
Vol X, Nº 1. 9-23 p. p.

Roche M. A. (1985).-
Mapa pluviométrico de
Bolivia y regiones veci-

nas PHICAB. 1 hoja
offset - color.

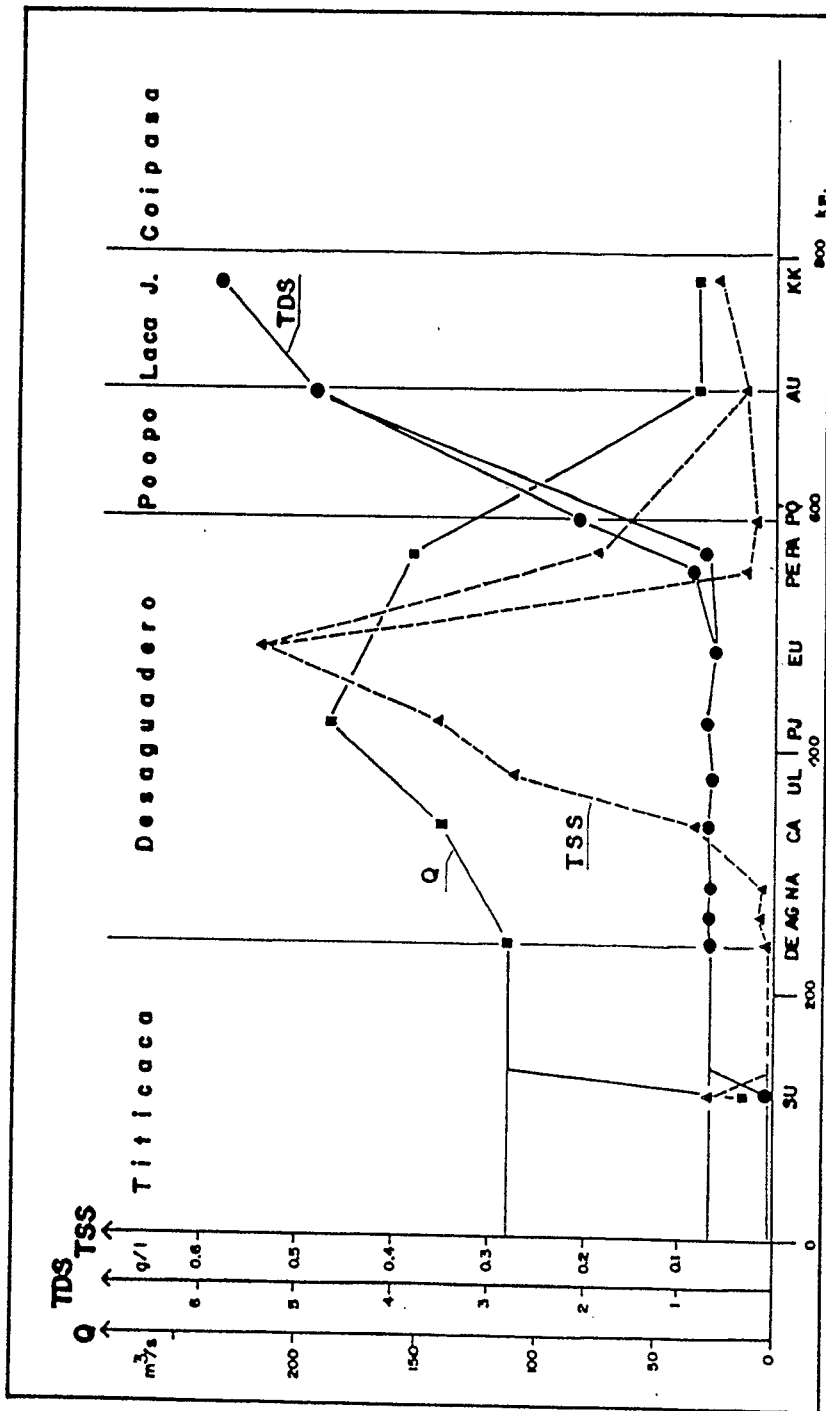


Fig 2.- EVOLUCION DEL RIO ARRIBA HACIA ABAJO, DE LOS CONTENIDOS MEDIOS EN MATERIAS EN SUSPENSION Y EN SOLUCION, A LO LARGO DEL SISTEMA LAGO TITICACA - RIO DESAGUADERO - LAGO POOPO - RIO LACA JAHUIRA (Septiembre 1987 - Abril 1988)