

## Premières données concernant le Carbone Organique transporté par le Rio Desaguadero (Altiplano Bolivien)

First estimation of Organic Carbon transport in the Rio Desaguadero (Altiplano, Bolivia)

J.G. WASSON<sup>1</sup>, J.L. GUYOT<sup>2</sup>, H. SANEJOUAND<sup>1</sup>

Reçu le 6 mars 1990, accepté pour publication le 18 février 1991\*.

### RÉSUMÉ

Le Rio Desaguadero relie le lac Titicaca (alt. 3 810 m) au lac Poopo (alt. 3 670 m) dans le bassin andoréique de l'Altiplano, en Bolivie, (fig. 1). Le bassin versant est constitué de terrains sédimentaires et volcaniques, avec une végétation stepplique et aucune source de pollution organique. Le climat très variable présente d'une alternance de saisons humide et sèche. Le Rio Mauri fournit 90 % du flux de MES estimé à  $6,6 \cdot 10^6$  t an<sup>-1</sup> (d'après GUYOT *et al.*, 1990).

Des analyses de COT et d'autres paramètres chimiques ont été réalisées sur 15 stations en 3 campagnes (fig. 2 et tableau 1). Une ACP (fig. 3) révèle une corrélation entre COT et MES, correspondant à deux épisodes de crues (déc. 87 et fév. 88) (tableau 2). Des hypothèses concernant l'origine du carbone organique et les flux sont avancées (tableau 3). Un flux de base, principalement du COD provenant du lac Titicaca, représenterait 18 000 t an<sup>-1</sup>. Mais le COP, quoique fortement corrélé aux MES, n'a pas la même origine que celles-ci (fig. 4) ; il proviendrait principalement des zones connexes au Rio Desaguadero riches en végétation aquatique.

La contribution de ces flux aux bilans du carbone organique paraît négligeable pour le lac Titicaca et peu importante pour le lac Poopo. Mais le maintien des interconnexions entre le Rio Desaguadero et ses zones humides doit être intégré dans les projets d'aménagement.

**Mots clés :** Andes, Bolivie, carbone organique, flux, matières en suspension, rivière.

1. CEMAGREF, 3, quai Chauveau, 69009 Lyon, France.

2. ORSTOM, Projet Phicab, CP 9214, La Paz, Bolivie.

\* Les commentaires seront reçus jusqu'au 30 mars 1992.

## SUMMARY

The Rio Desaguadero is the outlet of Lake Titicaca and flows into Lake Poopo in the endorheic watershed of the Altiplano in Bolivia (alt. 3 650 m) ; its main tributary is the Rio Mauri (*fig. 1*). The transport of dissolved and suspended solids has been recently evaluated by GUYOT *et al.* (1990). The data on Total Organic Carbon obtained for the first time in this hydrosystem allow to complement this investigation with an estimation of the organic carbon transport.

The Altiplano is a basin filled with tertiary and quaternary sediments. The Eastern cordillera is constituted of primary rocks ; the Rio Mauri flows from a tertiary volcanic watershed. The climate is rather cold, semi-arid ( $700$  to  $400$  mm  $\text{yr}^{-1}$ ) and the vegetation is steppe-like with extensive pastures (sheep, lamas). The rainy season lasts from December to March. No direct pollution source can affect the TOC. The hydrology is very variable (see GUYOT *et al.*, 1990). The base flow issues from Lake Titicaca and depends on the water level in the lake. The Total Suspended Solids (TSS) content is very high during floods. The annual flux of TSS is  $6.6 \cdot 10^6$  t  $\text{yr}^{-1}$  at Ulloma, 90 % of transported sediment coming from the Rio Mauri.

TOC was measured during 3 sampling series at 15 different stations (table 1). The 25 ml samples were acidified (pH 1) with H<sub>3</sub> PO<sub>4</sub> and sent to Lyon (France) to be analysed with a Dohrmann DC 80. In February 1988, Dissolved Organic Carbon was measured on filtered samples (Whatman GF/C decarbonated at 550°C). The major elements were analysed in La Paz (Bolivia).

Raw TOC data are presented (*fig. 2*), with a Principal Components Analysis (PCA) for 9 parameters on all the samples (*fig. 3*). The first axis (52 % of total variance) is a scale of mineralization ; it reveals a progressive concentration of dissolved elements in the Lake Poopo outlet (*fig. 3B* first cluster). The mineralization of these samples seems to be inversely correlated to the discharge flowing from Lake Titicaca for the corresponding series. The second axis (23 % of total variance) shows a correlation between the TOC and the TSS (*fig. 3B*, 4th cluster). This correlation is obvious for the samples of Dec. 87 and Feb. 88 (*table 2*), when TSS concentrations are high due to flash floods of some affluents. Equation (1) gives the best regression of TOC vs TSS.

The organic Carbon transported is constituted of dissolved (DOC) or Particulate Organic Carbon (POC). Estimation presented for DOC and POC transport at the three gauging stations (table 3) are based on the following hypotheses :

In the Rio Desaguadero, DOC concentrations seem relatively stable (*fig. 2D*). Upstream of the Rio Mauri, the TOC transported at an average concentration of 11 mg. l<sup>-1</sup> is assumed to be mainly DOC flowing out from Lake Titicaca. DOC transport may constitute a relatively constant base flow of organic carbon.

Estimation of POC transport is much more difficult. During floods from tributaries, the rise in TOC concentrations correlated with an increase of TSS seems to be essentially due to the POC. Following a classical method (MEYBECK, 1982), a non-linear regression of percentages of POC in TSS vs TSS was calculated (equation 2), using the samples with high TSS concentrations (*fig. 4A*). Then, the POC fluxes were estimated using daily data of TSS for the gauging stations CA and UL. As most of the TSS come from the Rio Mauri, it results from this estimation that the flow rate of TOC from this stream would reach 7 t  $\text{km}^{-2}\text{yr}^{-1}$ . But this value according to MEYBECK (1982) is close to the export of a tropical rainforest. Thus, this hypothesis of a POC transport directly linked to the TSS flux must be rejected.

POC and TSS, although correlated, have distinct origins. This is shown by the fact that the percentages of POC in TSS in the samples used to calculate equa-

tion (2) are much higher than those given by MEYBECK (1982) for world rivers (fig. 4B).

A possible explanation for this phenomenon is that the POC could come from Rio Desaguadero borders and wetlands, often rich in aquatic vegetation, and very extensive in some places (especially upstream of Nazacara and downstream of Eucaliptus). This particulate carbon might be flushed into the mainstream during rainy periods, while at the same time TSS flow down from tributaries. Hypotheses on POC transport (table 3) in the Rio Desaguadero are thus based on a POC/TSS correlation (equation (2)) valid only for the mainstream, the contribution of Rio Mauri to the total flux being estimated on the basis of a TOC export rate of  $0.5 \text{ t km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ .

Contribution of these fluxes to organic carbon budgets seems to be negligible for Lake Titicaca, whose phytoplanktonic primary production is estimated at  $4 \cdot 10^6 \text{ t C yr}^{-1}$  (RICHERSON *et al.*, 1977). When considering only the labile fraction of TOC (ITTEKOT, 1988), the readily metabolizable organic carbon input in Lake Poopo hydrosystem could be evaluated to  $36 \cdot 000 \text{ t yr}^{-1}$ , corresponding to about  $13 \text{ g C m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ; that might be unimportant for this presumably highly productive lake system.

In conclusion, these preliminary data lead to hypotheses which consider the Rio Desaguadero as a very particular hydrosystem in organic carbon transport. If most of the particulate carbon comes from margins, the necessity for maintaining interconnexions between the main channel and the wetlands in future regulation projects must be emphasized.

**Key-words :** *Andes, Bolivia, river, organic carbon, total suspended solids, transport.*

## 1 - INTRODUCTION

Le Rio Desaguadero est un cours d'eau très particulier de l'Altiplano Bolivien qui relie le lac Titicaca au lac Poopo. Or, si le lac Titicaca a fait l'objet depuis 50 ans de nombreuses études limnologiques (ILTIS et DEJOUX, 1986 ; DEJOUX, 1988), le Rio Desaguadero et le lac Poopo restent de ce point de vue assez peu connus. Il faut toutefois signaler, pour le lac Poopo, des tentatives de bilans hydrochimique (CARMOUZE *et al.*, 1978) et hydrique (MARIACA-CARRASCO, 1985), et une première approche hydrobiologique (ILTIS *et al.*, 1990). Récemment, le Rio Desaguadero a fait l'objet d'une évaluation précise des transports de matières dissoutes et en suspension, à partir de données détaillées recueillies entre 1976 et 1988 (GUYOT *et al.*, 1990).

Le Carbone Organique Total (COT) a été dosé pour la première fois dans ce bassin au cours de trois campagnes d'échantillonnage des paramètres physico-chimiques portant sur une quinzaine de stations. Nous présentons dans ce travail les données correspondantes, ainsi que des hypothèses concernant l'origine du carbone organique dans le Rio Desaguadero et l'estimation des flux. Outre leur contribution à la connaissance du fonctionnement d'un hydrosystème très particulier avec des implications importantes pour les

projets d'aménagements, ces résultats s'intègrent dans une étude plus globale des transports de matières et de l'érosion dans les Andes de Bolivie.

## 2 - LE MILIEU ÉTUDIÉ

Le lac Titicaca et le lac Poopo constituent les deux principales masses d'eau du bassin endoréique de l'Altiplano qui occupe une superficie de 191 000 km<sup>2</sup> entre les latitudes 14 °S et 23 °S, pour une altitude minimale de 3 650 m au niveau du Salar de Uyuni (*fig. 1*). Les cordillères Orientale et Occidentale qui enserrrent cette dépression longue de 1 000 km culminent à plus de 6 500 m.

Le Rio Desaguadero sort du lac Titicaca à 3 810 m d'altitude ; il se sépare en deux bras après un parcours d'environ 270 km pour finalement alimenter les lacs Uru Uru et Poopo, qui communiquent entre eux, à une altitude de 3 670 m.

Le bassin versant du Rio Desaguadero à la station de jaugeage de Ulloma (*tableau 1* et *fig. 1*) représente environ 80 000 km<sup>2</sup>, dont plus de 70 % sont constitués par le bassin du lac Titicaca. Le principal affluent du Rio Desaguadero est le Rio Mauri, qui draine un bassin versant de 9 400 km<sup>2</sup> dans la cordillère Occidentale.

Tableau 1 Points d'échantillonnage. Les codes sont utilisés dans les légendes (voir *fig. 1*).

Table 1 Sampling sites. Codes are used in legends (see *fig. 1*).

| Code Station | Milieu et Point d'échantillonnage | Remarques                      |
|--------------|-----------------------------------|--------------------------------|
| TK           | Lac Titicaca, Guaqui              |                                |
| BO           | Rio Desaguadero, Boca             | Exutoire du lac Titicaca       |
| AG           | Rio Desaguadero, Aguallamaya      |                                |
| NZ           | Rio Desaguadero, Nazacara         |                                |
| PC           | Rio Desaguadero, Calacoto         | Station de Jaugeage            |
| MA           | Rio Mauri, Calacoto               | Station de Jaugeage            |
| UL           | Rio Desaguadero, Ulloma           | Station de Jaugeage            |
| PJ           | Rio Desaguadero, Puente Japones   |                                |
| EU           | Rio Desaguadero, Eucaliptus       |                                |
| CH           | Rio Desaguadero, Chuquiña         |                                |
| PE           | Rio Desaguadero, Puente Español   | Bras Est (vers le lac Uru-Uru) |
| PA           | Rio Desaguadero, Puente Aroma     | Bras Ouest (vers le lac Poopo) |
| PO           | Lac Poopo, Poopo                  | Jonction Uru-Uru - Poopo       |
| JA           | Rio Laca Jahuira, Pampa Autlajas  | Exutoire du lac Poopo          |
| JK           | Rio Laca Jahuira, Khala Khala     |                                |

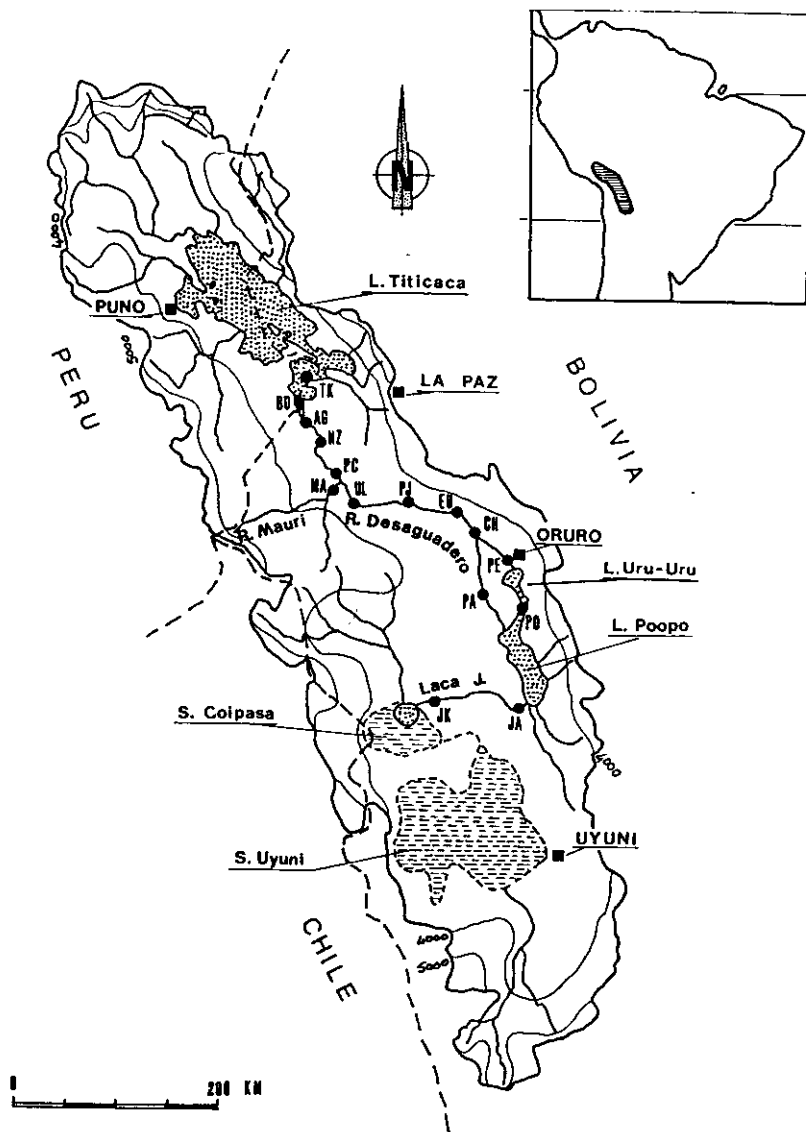


Figure 1 Carte de situation générale des points d'échantillonnage (voir tableau 1).

General map of sampling points (see table 1).

Si certaines agglomérations Péruviennes engendrent localement des phénomènes de pollution organique dans le lac Titicaca, notamment dans la baie de Puno (NORTHCOTE *et al.*, 1989), il n'y a par contre dans le sous-bassin du Rio Desaguadero aucun rejet direct, industriel ou urbain, susceptible d'influencer de manière significative les teneurs en carbone organique.

## 2.1 Géologie, climat et végétation du bassin versant

Le Rio Desaguadero coule sur les sédiments d'âge tertiaire et quaternaire qui constituent l'Altiplano, de même que ses petits affluents ne provenant pas des cordillères. Les cours d'eaux originaires de la cordillère Orientale (Rio Suches) drainent des terrains d'âge primaire ; ceux qui descendent de la cordillère Occidentale (bassin du Rio Mauri) traversent des séries volcano-sédimentaires du tertiaire.

Les précipitations diminuent du nord au sud de l'Altiplano (ROCHE et ROCHA, 1985), avec une moyenne de 710 mm an<sup>-1</sup> pour le bassin du lac Titicaca (LOZADA, 1985), et 390 mm an<sup>-1</sup> pour celui du lac Poopo (MARIACA-CARRASCO, 1985). Le régime pluviométrique se caractérise par une saison des pluies bien marquée de décembre à mars sur tout l'Altiplano.

Du fait de l'altitude, les températures moyennes annuelles sont assez basses (10°5 à Oruro, 7°3 à Uyuni), mais avec de très forts écarts journaliers, bien marqués dans les régimes thermiques des rivières (WASSON *et al.*, 1989).

La végétation est constituée par une steppe semi-humide à aride, la Puna (BROCKMAN, 1986) ; la densité de la population est faible, environ 5 hab. km<sup>-2</sup> (IGM, 1985), et les cultures n'occupent qu'une petite partie de la superficie du bassin versant propre au Rio Desaguadero qui est plutôt le domaine d'un élevage extensif à ovidés et camélidés.

## 2.2 Hydrologie et flux de matières minérales

Ces deux aspects ont été développés par GUYOT *et al.* (1990) ; nous résumons ci-après les points essentiels.

Bien que seul exutoire du lac Titicaca, le Rio Desaguadero ne participe que pour moins de 5 % au bilan total des pertes hydriques de ce lac, le reste étant le fait de l'évaporation (CARMOUZE *et al.*, 1978, CARMOUZE et AQUIZE, 1981 ; LOZADA, 1985). Son débit est directement lié au niveau de l'eau dans le lac Titicaca. De ce fait, le module annuel du Rio Desaguadero à la station de Calacoto, à l'amont de la confluence du Rio Mauri, est très variable ; il était de 52 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> pour la période 1976-1982, mais a atteint 94 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> pendant la période 1983-1988 durant laquelle eurent lieu de graves inondations autour du lac. Sur une plus longue période (1964-1988), le module annuel est de 46 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>.

Le Rio Mauri, dont le module annuel atteint 42 % de celui du Rio Desaguadero à Calacoto (période 1976-1982), présente en revanche un régime hydrologique comparable à celui des précipitations. De ce fait, le Rio Desaguadero à Ulloma offre un régime mixte avec des cures de décembre à

mars, puis une décroissance lente des débits et une absence d'étiage prononcé.

Le flux de MES à Ulloma est estimé à  $6,6 \cdot 10^6$  t an<sup>-1</sup> (1976-1982), dont 90 % proviennent du Rio Mauri. Près de 80 % de ce flux transitent pendant les trois mois de plus hautes eaux (janvier à mars).

La pente moyenne du Rio Desaguadero est de l'ordre de  $0,4$  m km<sup>-1</sup>. Nous avons pu observer que sa morphologie est fortement influencée par les apports en sédiments du Rio Mauri. Alors qu'à l'amont de ce cours d'eau le Rio Desaguadero coule dans un chenal unique sinueux sur un fond argilo-limoneux, il passe brusquement à l'aval de cette confluence à un modèle fortement tressé sur un substrat sablo-graveleux.

A l'inverse du transport solide, le flux de matières dissoutes, estimé à  $2,6 \cdot 10^6$  t an<sup>-1</sup> à Ulloma (1983-1988), provient à 70 % des eaux du lac Titicaca, et reste assez constant au cours de l'année. La minéralisation à l'amont de Calacoto se maintient, en dehors des épisodes de crues, à un niveau stable de l'ordre de  $0,5$  g l<sup>-1</sup> correspondant à la salinité du lac Titicaca. A l'aval du système, au cours de la traversée du lac Poopo, la minéralisation augmente très fortement (plus de  $5$  g l<sup>-1</sup>), corrélativement à une réduction des débits due à une évaporation intense.

### 3 - MÉTHODES

#### Echantillonnage

Trois campagnes d'échantillonnage ont été réalisées en septembre 1987, décembre 1987, et février 1988, sur un total de 15 stations échelonnées entre le lac Titicaca et le Salar de Coipasa (fig. 1 et tableau 1) ; ces campagnes se sont déroulées sur plusieurs jours à cause des difficultés d'accès. Les débits correspondants mesurés sur le Rio Desaguadero à Calacoto étaient les suivants :

- 17 septembre 1978 :  $96$  m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>
- 15 décembre 1987 :  $60$  m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>
- 24 février 1988 :  $75$  m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>

Les prélèvements d'eau pour le dosage du COT ont été effectués au milieu du cours d'eau et en surface, dans des tubes de verre de 25 ml, puis acidifiés à pH 1 avec de l'acide phosphorique et conservés à l'obscurité. Lors de la troisième campagne, des échantillons supplémentaires ont pu être filtrés sur le terrain (filtres Whatman GF/C préalablement passés au four à  $550$  °C) dans le but de déterminer le carbone organique dissous (COD).

#### Dosages

Les analyses de carbone organique ont été effectuées à Lyon (France), à l'aide d'un appareil Dohrmann DC 80. Après décarbonatation par barbotage

d'oxygène pendant 10 mn, les eaux chargées en MES sont oxydées par combustion à 800 °C sur une colonne d'oxyde de cuivre en présence d'oxygène ; les eaux faiblement chargées sont oxydées sous U.V. par une solution de persulfate de potassium ( $K_2S_2O_8$  à 20 g l<sup>-1</sup>) acidifiée par 0,1 %  $H_3PO_4$ . Le  $CO_2$  produit est mesuré par un détecteur infra-rouge non dispersif (NDIR) ; l'analyseur est étalonné avec une solution d'hydrogènoptalate de potassium ( $C_8H_5KO_4$ ) respectivement à 200 mg l<sup>-1</sup> et 10 mg l<sup>-1</sup>. Chaque valeur est la moyenne de 3 déterminations (CV < 3 %).

Les éléments suivants ont par ailleurs été dosés à La Paz (Bolivie) :

- pH, conductivité, MES (filtration sur filtres GF/C),
- Cations  $Ca^{++}$ ,  $Mg^{++}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$  (absorption atomique et émission de flamme),
- Anions  $HCO_3^-$ ,  $CO_3^{--}$  (volumétrie),  $Cl^-$ ,  $SO_4^{--}$  (colorimétrie),
- Fer total (abs. atomique), silice (colorimétrie).

#### 4 - RÉSULTATS

Les résultats des analyses de carbone organique sont visualisés par la figure 2. Les données concernant les ions majeurs ont été partiellement interprétées par GUYOT *et al.*, (1980).

En septembre 1987, les teneurs du COT sur tout le parcours du Rio Desaguadero sont comprises entre 6,2 et 10 mg l<sup>-1</sup>. En décembre 1987 et février 1988, les concentrations à l'amont du Rio Mauri varient entre 8,1 et 16,5 mg l<sup>-1</sup>, mais entre cette confluence et le lac Poopo s'observent des teneurs beaucoup plus élevées (jusqu'à 67,5 mg l<sup>-1</sup>).

Le Rio Mauri se distingue par des concentrations sensiblement plus faibles (entre 3,3 et 6,3 mg l<sup>-1</sup>). Au niveau du lac Poopo et de son émissaire, les teneurs ont tendance à augmenter légèrement par rapport à l'amont du système.

##### Analyse multivariée

Une analyse en composantes principales (ACP normée) a été effectuée pour définir des types hydrochimiques, et rechercher les corrélations du COT avec d'autres éléments. Cette analyse a porté sur les 9 paramètres suivants : le COT et les MES ; la conductivité et les cations (Ca, Mg, K, Na) ; le fer et la silice.



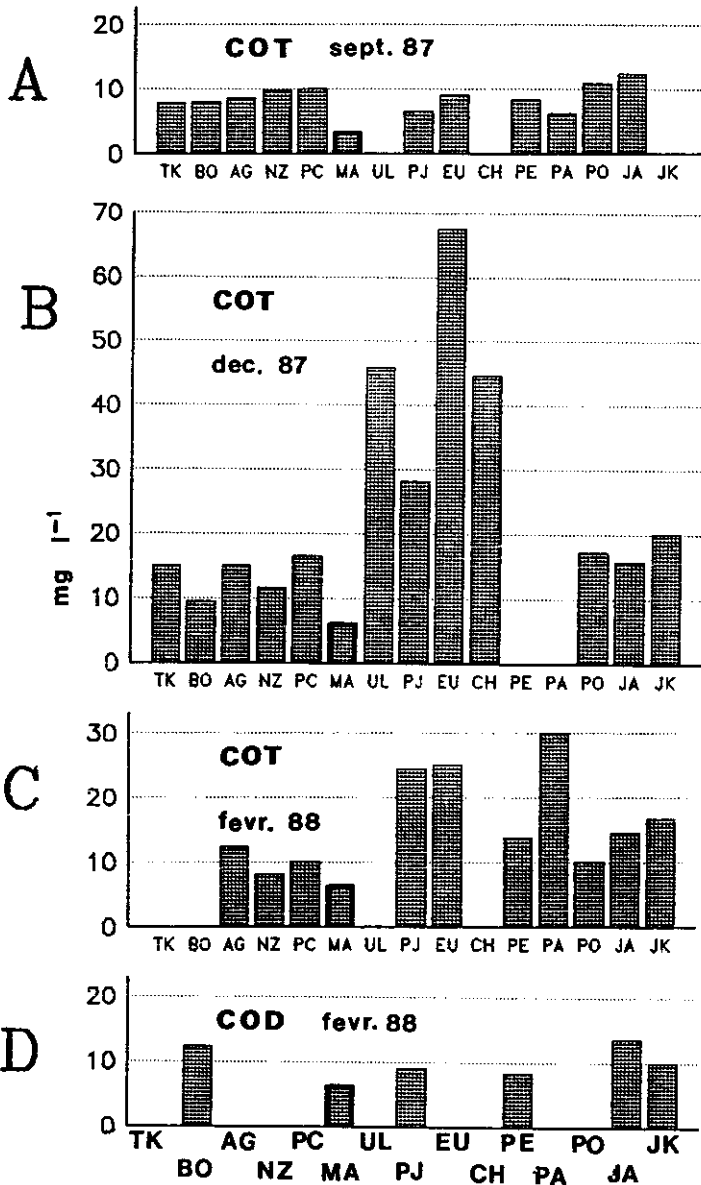


Figure 2 Résultats des dosages de COT (A, B, C) et COD (D) (Voir tableau 1).  
 Results of Total Organic Carbon as COT (A, B, C), and Dissolved Organic Carbon as COD (D) analysis. (See table 1).

Les deux premières composantes expliquent respectivement 52 % et 23 % de la variance totale (fig. 3A). La composante 1 est constituée à égalité par la conductivité et les quatre cations, et représente donc une échelle de minéralisation. La composante 2 est formée par le COT et les MES sur l'axe positif, et dans une moindre mesure par la silice sur l'axe négatif. Les composantes 3 et 4, qui expliquent 11 % et 9 % de la variance totale, sont constituées respectivement par le fer et la silice.

A ce stade de l'analyse, il apparaît d'une part que les quatre principaux cations ont la même origine et évoluent en parfaite corrélation dans le système étudié, et d'autre part que le COT et les MES sont également corrélés entre eux.

La distribution des échantillons dans le plan des deux premières composantes fait apparaître quatre nuages (fig. 3B).

Le premier nuage s'allonge sur l'axe de la minéralisation, et regroupe les échantillons du lac Poopo et de son émissaire le Rio Laca Jahuirá. La position des points le long de cet axe illustre clairement deux phénomènes. Le premier est la concentration progressive des éléments minéraux, du fait de l'évaporation, entre l'amont du lac Poopo et l'entrée du Salar de Coipasa ; les stations PO, JA, JK apparaissent dans cet ordre amont-aval à l'intérieur du nuage. Le second est l'influence déterminante du débit sortant du lac Titicaca sur la minéralisation des eaux à l'aval du système. En effet pour chacune de ces trois stations, les concentrations se trouvent inversement corrélées au débit mesuré à Calacoto lors de la campagne correspondante ; les plus fortes minéralisations apparaissant lors de la deuxième campagne (déc. 87) et les plus faibles lors de la première (sept.87).

Un deuxième nuage, qui correspond à un axe formé par la silice, regroupe des échantillons où cet élément présente des teneurs élevées et une conductivité moyenne. Dans le Rio Mauri, les fortes concentrations permanentes de silice (de 30 à 50 mg l<sup>-1</sup>) s'expliquent par la présence des séries éruptives à l'amont du bassin versant. Pour les autres stations du Rio Desaguadero où des teneurs élevées ont été observées lors de la 1<sup>ère</sup> campagne, l'origine de la silice reste à déterminer.

Le troisième nuage, central, regroupe les échantillons où aucun élément n'est caractéristique.

Enfin, le quatrième nuage, qui s'étire le long de l'axe COT-MES, regroupe des stations situées entre le Rio Mauri et le lac Poopo (UL, PJ, EU, CH, PA) et qui ont présenté des valeurs élevées pour ces deux paramètres lors des 2<sup>e</sup> et 3<sup>e</sup> campagnes. Dans les deux cas, l'augmentation des MES correspond au passage d'une crue, phénomène transitoire mais fréquent en saison des pluies. Donc, les fortes valeurs du COT apparaissent liées à celles des MES, mais indépendantes de l'augmentation de la minéralisation qui s'observe à l'aval de l'hydrosystème.

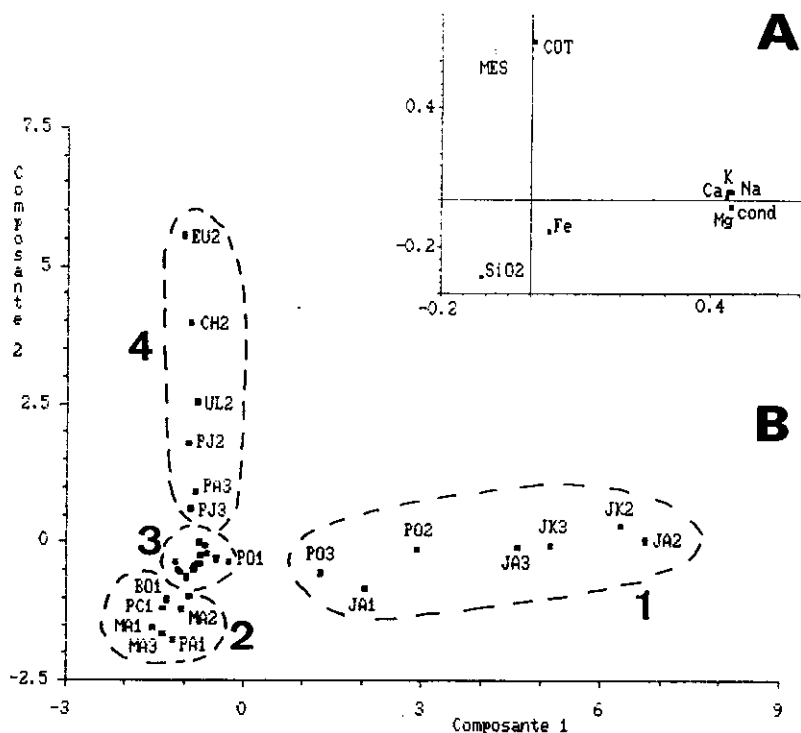


Figure 3 Analyse en Composantes Principales (ACP normée) des 3 campagnes d'échantillonnage.

*Principal Component Analysis on results from all 3 sampling periods.*

A – Projection des 9 variables physico-chimiques dans le plan des deux premières composantes principales.

B – Projection des échantillons dans le même plan ; chaque échantillon est désigné par le code de la station (tableau 1) et le N° de campagne (1 : sept. 87 ; 2 : déc. 87 ; 3 : fév. 88). interprétation des nuages 1, 2, 3, 4 : voir texte.

A – Projection of the 9 variables on the first two principal components plane.

B – Projection of the samples into the same plane ; each sample is identified by the station code (two letters, see table 1) and the sampling season number (1 : sept. 87 ; 2 : dec. 87 ; 3 : feb. 88). Interpretation of clusters 1, 2, 3, 4 : see text.

### Corrélation COT-MES

Le calcul des corrélations partielles entre le COT, les MES et la conductivité, pour chacune des trois campagnes (tableau 2), montre une très nette cor-

relation entre le COT et les MES en décembre 1987 et en février 1988, lorsque les plus fortes valeurs ont été observées. Par contre, en l'absence d'un épisode de crue comme en septembre 1987, le COT apparaît indépendant des MES, mais faiblement lié à la conductivité du fait d'une légère augmentation des teneurs dans les stations les plus en aval.

Une régression linéaire effectuée sur l'ensemble des données entre le COT et les MES révèle une bonne corrélation ( $r = 0,89$  ;  $n = 35$ ) selon l'équation suivante :

$$\text{COT} = 0,034 \text{ MES} + 11,1 \text{ (en mg l}^{-1}\text{)} \quad (1)$$

**Tableau 2** Corrélations partielles entre COT, MES et Conductivité.

**Table 2** *Partial correlations between COT (Total Organic Carbon), MES (Total Suspended Solids) and Conductivity.*

|              | COT<br>(sept. 1987) | COT<br>(déc. 1987) | COT<br>(fév. 1988) |
|--------------|---------------------|--------------------|--------------------|
| MES          | -0,14               | +0,92              | +0,83              |
| Conductivité | +0,40               | +0,26              | -0,01              |

## 5 - DISCUSSION

### Origine et flux de carbone organique dans le Rio Desaguadero

Le COT comprend du carbone organique dissous (COD) ou particulaire (COP), ce dernier pouvant être d'origine allochtone (détritique) ou autochtone (algal) (MEYBECK, 1985).

Une corrélation positive entre le COT et les MES est assez fréquemment observée, mais le carbone responsable de ce phénomène peut se trouver aussi bien sous forme dissoute que particulaire. Le carbone dissous provient alors du lessivage des sols durant les épisodes pluvieux, notamment dans les régions tropicales humides (cf. NEMETH *et al.*, 1982).

Dans le Rio Desaguadero, la relative stabilité des concentrations de COD (*fig. 2D*) laisse supposer que le carbone organique lié aux MES est constitué essentiellement de COP.

Il existerait donc un « niveau de base » de COT, principalement sous forme dissoute, provenant des eaux du lac Titicaca. Ce niveau de base se situerait aux environs de  $11 \text{ mg l}^{-1}$ , valeur moyenne des 14 mesures de COT effectuées à l'amont du Rio Mauri. Le fait que cette valeur corresponde à l'ordonnée à l'origine de la droite de régression (équation 1) du COT sur les MES confirme une forte prédominance du carbone dissous.

Aussi, avons nous évalué les flux de COD aux stations de jaugeage (tableau 3) à partir de l'hypothèse de concentrations relativement stables du COD, estimées respectivement à 10, 4,5 et 8,5 mg l<sup>-1</sup> pour les 3 stations CA, MA, UL.

A ce flux de base se rajouterait lors des épisodes de crues un carbone particulaire corrélé aux MES. Suivant l'approche classique de MEYBECK (1982), nous avons calculé le pourcentage de COP contenu dans les MES à partir des sept échantillons de la 2<sup>e</sup> et de la 3<sup>e</sup> campagne prélevés entre le Rio Mauri et le lac Poopo, et pour lesquels les teneurs en MES dépassaient 100 mg l<sup>-1</sup>. Six de ces sept échantillons constituent le 4<sup>e</sup> nuage de l'ACP (fig. 3B). Le COP a été estimé en retranchant aux mesures de COT la valeur de 8,7 mg l<sup>-1</sup>, moyenne des deux mesures de COD effectuées à l'aval du Rio Mauri en février 1988. Une régression non linéaire sur ces données (fig. 4A) aboutit à l'équation suivante ( $r = -0,90$ ) :

$$\text{COP (\%)} = 219 * \text{MES}^{-0,59} \text{ (mg l}^{-1}\text{)} \quad (2)$$

Avec ces éléments, nous avons estimé un flux théorique de COP dans le Rio Desaguadero pour la période 1976-1982 pour laquelle des mesures détaillées de MES sont disponibles (GUYOT *et al.*, 1990). Un calcul, au pas de temps journalier, à partir des flux de MES des stations CA et UL et de l'équation (2), aboutit à 45 000 t an<sup>-1</sup> et 110 000 t an<sup>-1</sup> de COP respectivement pour ces deux stations. Par différence, le flux de COP provenant du Rio Mauri serait alors de 65 000 t an<sup>-1</sup>.

Mais cette hypothèse n'est pas satisfaisante. En effet, ce flux équivaldrait pour le bassin du Rio Mauri à un taux d'exportation de COT de 7 t km<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup>, ce qui le placerait au niveau des forêts tropicales humides, alors que les milieux semi-arides ou les toundras ont des taux de l'ordre de 0,3 à 0,6 t km<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup> (MEYBECK, 1982). De plus, le pourcentage de COP dans les MES des sept échantillons utilisés pour calculer la relation COP/MES (fig. 4A) apparaît beaucoup plus élevé que ceux rapportés par MEYBECK (1982) ou ITTEKOT (1988). Ces échantillons apparaissent nettement individualisés par rapport à l'enveloppe des points du graphique de MEYBECK (1982) regroupant l'ensemble des données disponibles à l'échelle du globe (fig. 4B). Il ne s'agit pas d'un artefact méthodologique, car d'autres échantillons provenant du bassin amazonien, prélevés et analysés dans les mêmes conditions ne présentent pas cette particularité.

Ceci nous amène à conclure que malgré leur évidente corrélation, le COP et les MES du Rio Desaguadero n'ont pas la même origine.

Le COP aurait pour origine une matière organique endogène, provenant des végétaux aquatiques localisés dans le cours d'eau lui-même ou en bordure, mais surtout dans des zones connexes. Ces zones plus ou moins marécageuses sont localement très étendues, notamment à l'amont de Nazacara, et à l'aval vers Eucaliptus et Chuquiña.

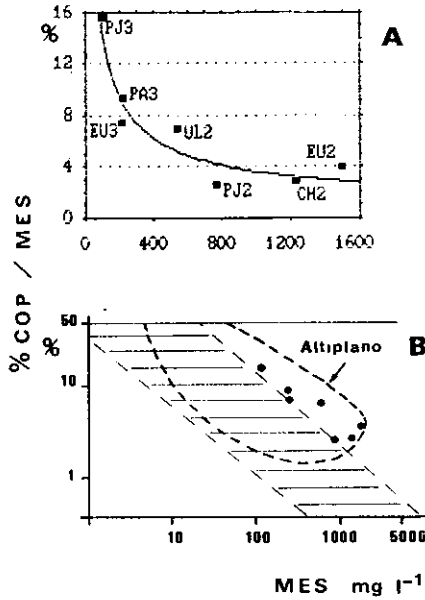


Figure 4 Pourcentage de COP dans les MES.

A – Régression non linéaire du % de COP dans les MES par rapport aux MES pour 7 échantillons ; équation (2) dans le texte ; légende des échantillons : voir fig. 3 et texte.

B – Position de l'ensemble des données de cette étude (nuage) et des 7 échantillons utilisés dans la fig. 4A (points) par rapport aux données de MEYBECK (1982) concernant les rivières du globe (hachures).

*Percentage of COP (Particulate Organic Carbon) in MES (Total Suspended Solids) vs MES.*

*A – Non-linear regression of COP as % of MES vs MES for 7 samples ; equation (2) in text ; legend of samples : see fig. 3B and text.*

*B – Position of data from this study (cloud) and samples used in Fig. 4A (dots) vs data of MEYBECK (1982) from world rivers (lines).*

La corrélation observée entre COT et MES s'expliquerait alors par la conjonction, à l'occasion d'une pluie dans le bassin versant, de deux phénomènes distincts : l'arrivée de MES minérales en provenance des affluents et l'entraînement dans le cours principal de la matière organique particulaire provenant des zones de bordure, par suite d'une augmentation même peu importante du débit. Cette hypothèse semble la seule cohérente avec les données dont nous disposons.

Dans ces conditions, il est plus difficile d'estimer un flux de COP dans le Rio Desaguadero, car rien ne prouve que l'équation (2) puisse être extrapolée aux fortes teneurs de MES (jusqu'à 15 g l<sup>-1</sup>) provenant des crues du Rio Mauri.

Toutefois, une estimation plausible de l'ordre de grandeur du flux de COP à Ulloma pourrait être de 47 000 t an<sup>-1</sup> en s'appuyant sur l'estimation précédente pour le Rio Desaguadero à Calacoto, et sur un taux d'exportation de COT voisin de 0,5 t km<sup>2</sup> an<sup>-1</sup> pour le Rio Mauri (tableau 3).

**Tableau 3** Estimations des flux de carbone organique pour la période 1976-1982. Stations de jaugeage : voir tableau 1 et figure 1 ; Q : module annuel d'après GUYOT *et al.*, (1990).

**Table 3** Estimates of organic carbon transport (1976-1982). Gauging Stations : see table 1 and fig. 1 ; Q = mean annual discharge according to GUYOT *et al.*, (1990) ; COD = Dissolved Organic Carbon ; COP = Particulate Organic Carbon ; COT = Total Organic Carbon ; transport in t yr<sup>-1</sup>.

| Stations | Q<br>m <sup>3</sup> s <sup>-1</sup> | COD<br>t an <sup>-1</sup> | COP<br>t an <sup>-1</sup> | COT<br>t an <sup>-1</sup> |
|----------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| CA       | 52                                  | 17.10 <sup>3</sup>        | 45.10 <sup>3</sup>        | 62.10 <sup>3</sup>        |
| MA       | 22                                  | 3.10 <sup>3</sup>         | 2.10 <sup>3</sup>         | 5.10 <sup>3</sup>         |
| UL       | 73                                  | 20.10 <sup>3</sup>        | 47.10 <sup>3</sup>        | 67.10 <sup>3</sup>        |

### Contribution aux bilans de Carbone des lacs Titicaca et Poopo

La quantité de COT provenant du lac Titicaca et exportée par le Rio Desaguadero (de l'ordre de 18 000 t an<sup>-1</sup>) apparaît relativement négligeable au regard des 4 10<sup>6</sup> t an<sup>-1</sup> de carbone produites par le seul phytoplancton de l'ensemble du lac (RICHERSON *et al.*, 1977).

A l'aval, il n'y a pas d'évidence d'une diminution de la charge solide entre les stations d'Ulloma et de Puente Aroma ; on peut donc supposer que la quasi-totalité du flux de COT entre dans l'hydrosystème des lacs Uru-Uru et Poopo. Toutefois, seuls le COD et la fraction labile du COP, qui représente en moyenne 35 % de celui-ci (ITTEKOT, 1988), sont susceptibles d'être recyclés par des processus biologiques. Par conséquent, le flux entrant de carbone organique métabolisable serait de l'ordre de 36 000 t an<sup>-1</sup>, ce qui en 1979 (la superficie du lac Poopo étant extrêmement variable) représentait environ 13 g m<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup> pour ce système lacustre. Cet apport n'apparaît pas essentiel dans le fonctionnement d'un milieu qui présente l'apparence d'une productivité assez élevée (ILTIS *et al.*, 1990), mais il n'est probablement pas négligeable pour les zones proches de l'embouchure du rio Desaguadero.

## CONCLUSION

Ces premières données concernant le carbone organique du Rio Desaguadero, malgré leur aspect fragmentaire, ont permis de dégager la particularité de ce système quant à l'origine différente du COP et des MES, malgré une bonne corrélation entre ces deux paramètres. L'hypothèse proposée concernant l'origine de ce carbone particulaire demande évidemment à être vérifiée, et les estimations avancées pour les flux (*tableau 3*) doivent être considérées comme des hypothèses sur les ordres de grandeur. Ce travail pourra servir à définir une nouvelle stratégie d'échantillonnage pour préciser ces phénomènes.

Toutefois, si le principal apport de carbone organique pour le Rio Desaguadero provient des zones humides de bordure, cela signifie que ces biotopes jouent un rôle essentiel dans le fonctionnement écologique et la productivité du milieu. Par conséquent, il est impératif de conserver les relations entre le cours d'eau et ces zones connexes pour préserver ce fonctionnement. Cette contrainte devra absolument être prise en compte dans les projets d'aménagement du Rio Desaguadero visant à réguler le niveau du lac Titicaca, notamment en prévoyant un endiguement suffisamment distant des berges pour inclure les zones humides existantes dans le périmètre d'inondation.

## REMERCIEMENTS

Nous exprimons notre reconnaissance à tous ceux qui nous ont aidé dans la réalisation de cette étude, notamment à La Paz les membres de l'Institut de Chimie de l'Université (IIQ-UMSA) et du Service National de Météorologie et d'Hydrologie (SENAMHI) qui ont réalisé les analyses, ainsi que CESAR SALINAS et OLIVIER MARCANTONI pour leur collaboration sur le terrain.

Nous remercions également PH. NAMOUR pour sa contribution aux analyses du COT, ainsi que C. DEJOUX, G. HERAIL, A. ILTIS, M.A. ROCHE, le Dr CAUWET et un réviseur anonyme, pour leurs critiques constructives du manuscrit.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BROCKMANN C.E. Ed., 1986. *Perfil ambiental de Bolivia*. USAID publ. La Paz, Bolivia, 166 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., ARCE C., QUINTANILLA J., 1978. Circulación de materia (agua-sales disueltas) através del sistema fluvio-lacustre



- del Altiplano : la regulación hídrica e hidroquímica de los lagos Titicaca y Poopo. *Cah. ORSTOM, ser. Geol.*, 10 (1), 49-68.
- DEJOUX C., 1988. Panorama de la fauna bentónica de las aguas del Altiplano boliviano. *Actas del Mer. Congr. Iberoamer. y Caribe sobre Pesca y Acuicultura*. Margarita, Venezuela. 8-14 Mayo 1988. *In Press*.
- GUYOT J.L., ROCHE M.A., NORIEGA L., CALLE H., QUINTANILLA J., 1990. Salinities and Sediment Transport in the Bolivian Highlands. *J Hydrology*, 113, 147-162.
- IGM ed., 1985. *Atlas de Bolivia*. Public. Inst. Geogr. Militar de Bolivia. Ediciones Geomundo, Barcelona. 228 p.
- ITLIS A., DEJOUX C., WASSON J.G., 1990. Datos hidrobiológicos referentes al lago Poopo (Bolivia). Convenio UMSA-ORSTOM, informe N° 21, ORSTOM publ., La Paz, 19 p. multigr.
- ITLIS A., DEJOUX C., 1986. Investigaciones efectuadas en el Altiplano Boliviano en el campo de la hidrobiología dentro del convenio UMSA-ORSTOM. Primer simposio de la Investigación Francesa in Bolivia, La Paz, sept. 1986. Publ. ORSTOM, p. 75-80.
- ITTEKOT V., 1988. Global trends in the nature of organic matter in river suspensions. *Nature*, 332, 436-438.
- LOZADA G., 1985. Balance hídrico superficial de la cuenca del Lago Titicaca. Tesis de grado, UMSA, La Paz. Publ. PHICAB, 158 p.
- MARIACA CARRASCO J., 1985. Balance hídrico superficial de la cuenca del lago Poopo y los salares de Uyuni y Coipasa, Bolivia. Proyecto PHICAB – Tesis de grado, Univ. Mayor San Andres, La Paz, 203 p.
- MEYBECK M., 1982. Carbon, Nitrogen and Phosphorus transport by world rivers. *Am. J. Sci.*, 282, 401-450.
- MEYBECK M., 1985. Variabilité dans le temps de la composition chimique des rivières et de leurs transports en solution et en suspension. *Rev. Fr. Sciences de l'eau*, 4 (1), 93-121.
- NEMETH A., PAOLINI J., HERRERA R., 1982. Carbon transport in the Orinoco river : preliminary results. *Mitt. Geol.-Paläont. Inst., Univ. Hamburg*, SCOPE/UNEP Sonderband, Heft 52, 357-364.
- NORTHCOTE T.G., MORALES S., LEVY D.A., GREAVEN eds., 1989. Pollution in lake Titicaca, Perú : Training, Research and Management. Westwater Res. Center, Univ. British Columbia, Vancouver, Canada & Inst. de Aguas Alto Andinas, Univ. Nac. del Altiplano, Puno, Perú.
- RICHERSON P.J., WIDMER C., KITTEL T., 1977. The limnology of Lake Titicaca (Perú-Bolivia). A large High Altitude Tropical Lake. *Inst. Ecol. Publ. n° 4*, Univ. of California, Davis.
- ROCHE M.A., ROCHA N., 1985. Mapa pluviométrico de Bolivia y regiones vecinas, 1/4000000e. Publ. PHICAB., La Paz, Bolivia.
- WASSON J.G., GUYOT J.L., DEJOUX C., ROCHE M.A., 1989. Regimen termico de los rios de Bolivia. Publ. ORSTOM – PHICAB, La Paz, 35 p. multigr.