

EVOLUCIÓN PALEOHIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL LAGO TITICACA DURANTE EL HOLOCENO

*Philippe Mourguiart **, *Jaime Argollo ***, *Denis Wirrmann ****

Resumen

La utilización de una función de transferencia ostrácodos/batimetría permitió, a partir de los resultados de 3 sondeos, reconstruir la paleohidrología del lago Titicaca desde hace 8 000 años BP. Los resultados obtenidos revelan una evolución compleja de las cuencas lacustres. De una manera general, el conjunto del Holoceno se caracteriza por niveles bajos, especialmente entre 8 000 y 3 900 años BP.

Palabras claves: *Paleohidrología, Lago Titicaca, Ostrácodos, Función de Transferencia, Holoceno.*

ÉVOLUTION PALÉOHYDROLOGIQUE DU BASSIN DU LAC TITICACA DURANT L'HOLOCÈNE

Résumé

L'utilisation d'une fonction de transfert ostracodes/bathymétrie a permis, à partir des résultats de 3 sondages, de reconstruire la paléohydrologie du lac Titicaca depuis 8 000 ans BP. Les résultats obtenus révèlent une évolution complexe des bassins lacustres. D'une manière générale, l'ensemble de l'Holocène est caractérisé par des bas niveaux, et plus particulièrement entre 8 000 et 3 900 ans BP.

Mots-clés : *Paléohydrologie, Lac Titicaca, Ostracodes, Fonction de Transfert, Holocène.*

LAKE TITICACA PALEOHYDROLOGICAL EVOLUTION DURING THE HOLOCENE

Abstract

A transfer function based on ostracod faunas was used to estimate past water depths of Lake Titicaca during the last 8 000 yrs BP. The results obtained on 3 cores revealed a complex evolution of the lacustrine basins. In general terms, the Holocene was characterized by low water levels, especially between ca. 8 000 and 3 900 yrs BP.

Key words: *Paleohydrology, Lake Titicaca, Ostracods, Transfer Function, Holocene.*

* UR12, programme AIMPACT, mission ORSTOM, CP 9214 La Paz, Bolivia.

** Universidad Mayor de San Andrés, Inst. Inv. Geológicas, CP 11152, La Paz, Bolivia.

*** ORSTOM, BP 1857, Yaoundé, República del Camerún.

INTRODUCCIÓN

Desde hace algunos años, los estudios que tratan sobre las reconstrucciones de los paleoniveles lacustres se han multiplicado en la zona intertropical. Clásicamente, estas reconstrucciones se apoyan ya sea en datos geomorfológicos relacionados con antiguas líneas de ribera, o en el estudio de los sedimentos lacustres. A nivel del Altiplano de Bolivia, las dos metodologías fueron utilizadas por diferentes autores desde comienzos del siglo. Así, las grandes tendencias evolutivas de los lagos del Altiplano fueron definidas para el Pleistoceno terminal (Steinmann *et al.*, 1904; Bowman, 1909; Servant & Fontes, 1978; Wirrmann *et al.*, 1992). Recientemente, se probó un nuevo eje de investigación sobre los entornos lacustres del lago Titicaca durante el Holoceno, que se refiere a las reconstrucciones cuantitativas realizadas a partir de una función de transferencia Ostrácodos / Bathymetría (Mourguiart & Roux, 1990; Mourguiart *et al.*, 1992; Mourguiart & Carbonel, 1994). En este artículo nos proponemos, a partir de datos antiguos y nuevos, dar una síntesis de la evolución del lago Titicaca (lagos Chucuito y Huiñaimarca) desde 8 000 años BP.

1. PRESENTACIÓN GENERAL

El Altiplano es un vasto conjunto endorreico (aproximadamente 190 000 km²) situado en el corazón de los Andes de Perú, de Bolivia y de Chile. Desde el punto de vista climático, es un sistema que presenta un fuerte gradiente Noreste/Suroeste tanto en lo que respecta a la temperatura media anual como a las precipitaciones (Roche *et al.*, 1992). La distribución de las precipitaciones (y de la evaporación) explica, en particular, el porqué se encuentra al norte un gran lago permanente, el lago Titicaca, al centro un lago semipermanente, el lago Poopó y, al sur, los salares de Coipasa y de Uyuni (Fig. 1). El hidrosistema en su globalidad parece ser sensible a las variaciones interanuales del clima: en 1983, el lago Poopó se secó mientras que en 1986, solamente 3 años más tarde, el mismo lago cubrió una superficie de aproximadamente 4 000 km².

Durante el Cuaternario el clima de la Tierra sufrió una alternación de períodos glaciares e interglaciares. El Altiplano boliviano conservó, en estos depósitos sedimentarios, una memoria de estas oscilaciones de gran amplitud. Siguiendo los trabajos de Steinmann *et al.* (1904) y de Bowman (1909), Servant & Fontes (1978) propusieron un modelo de evolución de los grandes sistemas lacustres acoplado a las variaciones de extensión de los glaciares de la cordillera oriental de Bolivia. Esquemáticamente, el final del Cuaternario está marcado por 3 grandes oscilaciones positivas de los balances de agua de los lagos tanto en las cuencas Norte (lago Titicaca) como en las cuencas Sur (lagos Poopó, Coipasa y Uyuni). La fase "Ballivián", que es la más antigua, no está fechada pero las dos siguientes sí lo están con >27 000 años BP la fase "Minchin" y con 12,5-10,5 ka BP la fase "Tauca" (Servant & Fontes, 1978). Para estos autores, estas tres fases lacustres mayores fueron alimentadas por el deshielo de los glaciares y corresponden a las glaciaciones Sorata, Choqueyapu I y Choqueyapu II, desde la más antigua hasta la más reciente. Posteriormente, Hastenrath & Kutzbach (1985), Kessler (1988) y Seltzer (1992) volvieron a poner en tela de juicio esta hipótesis. En efecto, según estos autores, el deshielo de los glaciares no puede ser responsable de la creación de los inmensos lagos Minchin y Tauca (63 000 km² y 43 000 km², respectivamente, según Hastenrath & Kutzbach, 1985). Su afirmación está basada en un cálculo aproximado del volumen de hielos y, consecuentemente, de aguas, almacenado en los glaciares en el máximo

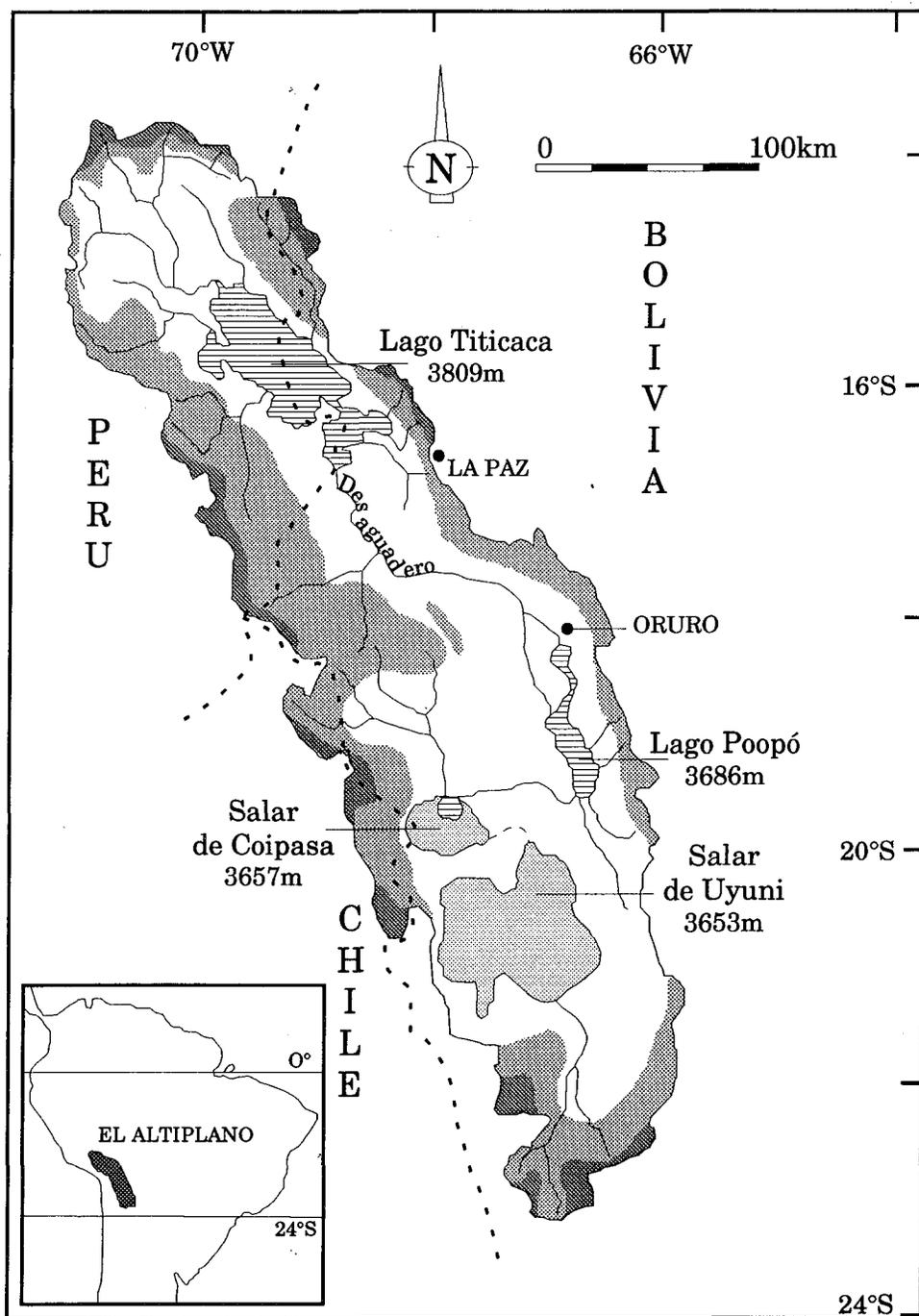


Fig. 1 - El Altiplano. Situación de las principales cuencas lacustres.

de su avance. El aporte mayor de agua correspondería a una fase climática húmeda que ocasionó un aumento de las precipitaciones del orden de 30% en relación a los valores actuales.

En cambio, los autores anteriormente citados no abordaron las reconstituciones paleohidrológicas durante el Holoceno. Algunos estudios sedimentológicos realizados sobre testigos sacados en el lago Titicaca mostraron que el Holoceno se caracterizaba por niveles lacustres inferiores al nivel del plano de agua actual (Wirrmann & Oliveira Almeida, 1987; Wirrmann *et al.*, 1988; 1992). En el norte chileno también se descubrió esta larga fase seca (Messerli *et al.*, 1993; Grosjean, 1994).

En el presente artículo, nos proponemos hacer el balance de los últimos resultados paleohidrológicos obtenidos en el lago Titicaca. Las reconstituciones propuestas se apoyan en datos establecidos a partir de una función de transferencia Ostrácodos / Batimetría, y conciernen 3 testigos extraídos en las 3 grandes unidades morfológicas del lago Titicaca: el lago Chucuito al norte, el lago Huíñaimarca al sur con sus dos cuencas, la fosa de Chúa al noreste y la depresión de Guaqui-Taraco al suroeste (Fig. 2).

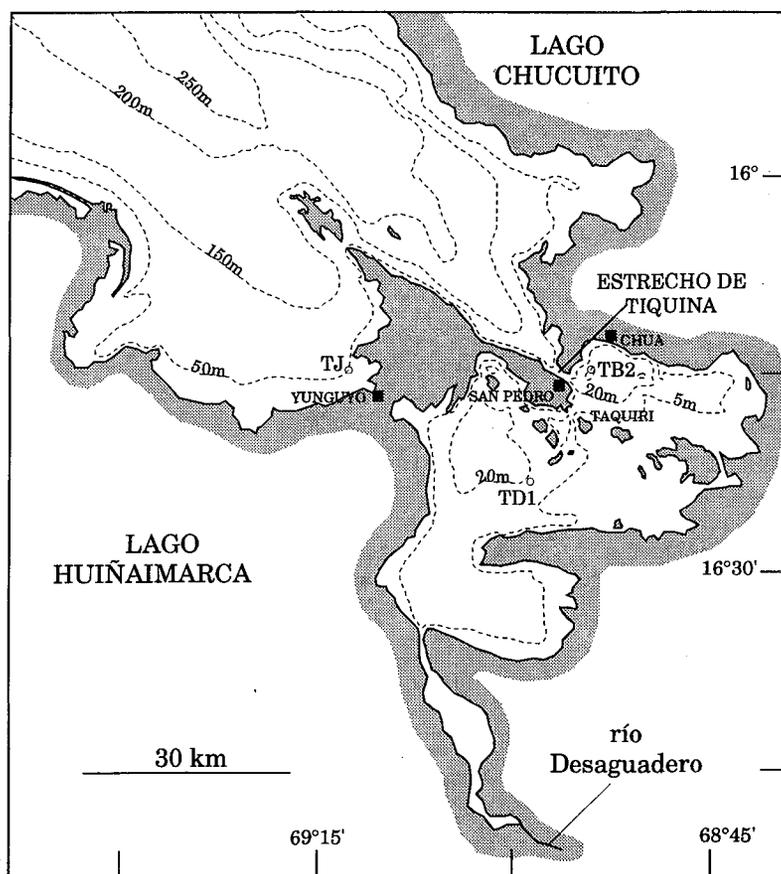


Fig. 2 - Posición de los 3 testigos (TD1, TB2 y TJ) en el lago Titicaca.

2. LA FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA OSTRÁCODOS/BATIMETRÍA

En el lago Titicaca, los ostrácodos bénticos y epifitos tienen una repartición muy estrechamente correlacionada a la profundidad de agua (Mourguiart & Carbonel, 1994). Esto no solamente se explica por una cobertura macrofital dependiente de la altura de agua (Collot *et al.*, 1983), sino también por niveles de energía (por lo tanto por naturalezas variables de sustrato), de índices de oxigenación en la interfase agua-sedimento y de recursos alimenticios vinculados con este mismo parámetro batimétrico (Fig. 3).

Hay diferencias a nivel de la zonificación batimétrica de las poblaciones de ostrácodos entre el lago Huiñaimarca y el lago Chucuito. Esto explica las diferencias a nivel de la transparencia de las aguas entre las dos cuencas. Las aguas del lago Chucuito, más claras, permiten una colonización más profunda de los macrofitos y en particular de las *Characeae* (Iltis & Mourguiart, 1992). Por esta razón, las asociaciones de ostrácodos están desplazadas hacia abajo en relación a las encontradas en el lago Huiñaimarca (Mourguiart, 1992). Los análisis estadísticos efectuados sobre las faunas de ostrácodos toman en cuenta estas diferencias entre cuencas.

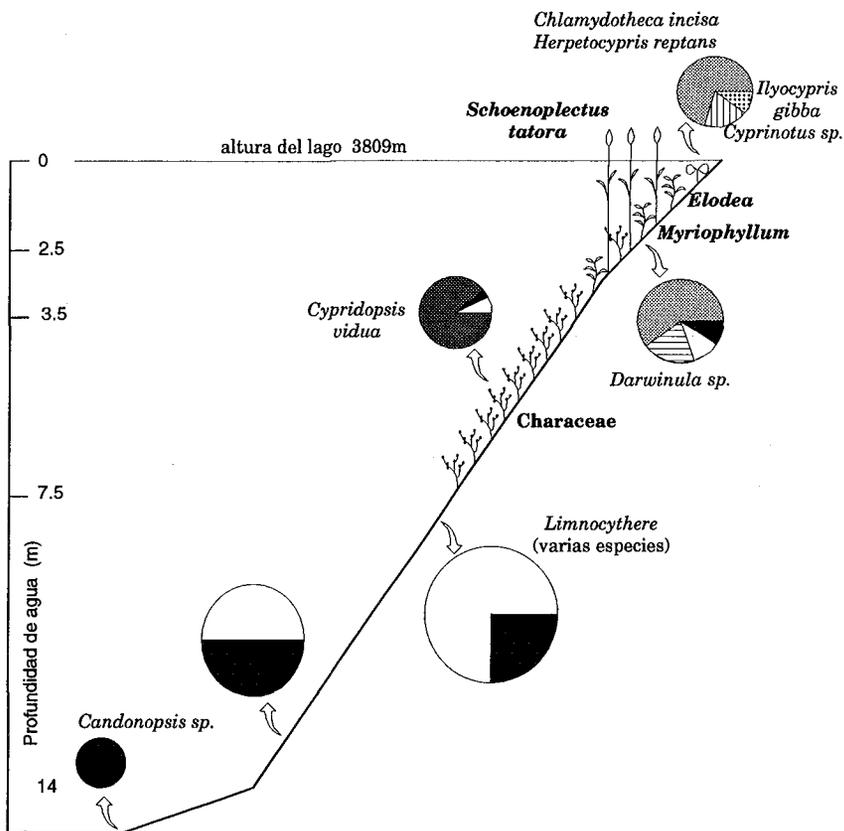


Fig. 3 - Repartición batimétrica de las faunas de ostrácodos en el lago Huiñaimarca (según Mourguiart & Carbonel, 1994).

Se efectuó un análisis factorial de correspondencias (AFC) en base a 115 muestras actuales que incluyen por lo menos una especie de ostrácodos. La repartición espacial de esta referencia fue dada en otra fuente (Mourguiart & Roux, 1990; Mourguiart & Carbonel, 1994). Esta base de datos constituye un cuadro de 28 líneas o especies y 17 columnas o clases medioambientales. Este fichero es sometido a un AFC después de añadir dos cuadros adicionales tratados en elementos pasivos (*sensu* Benzécri, 1973) que contenían el conjunto de las listas faunísticas actuales (115 muestras) y fósiles (número variable, que corresponde al de las muestras extraídas en cada testigo y que comprende por lo menos una especie de ostrácodo). Este tratamiento estadístico permite obtener no solamente las coordenadas factoriales de las clases medioambientales en un sistema de ejes en *n* dimensiones sino también las de muestras actuales y fósiles en el mismo espacio vectorial. Este sistema de representación es particularmente cómodo. En efecto, permite visualizar instantáneamente la posición de las muestras fósiles en relación con las listas actuales o, en otros términos, verificar la existencia, en cada asociación faunística fosilizada, de por lo menos un análogo actual. A manera de discusión, en la figura 4 damos una proyección en el plano de los dos primeros ejes de los montajes actuales (Fig. 4a) y fósiles del testigo TD1 (Fig. 4b).

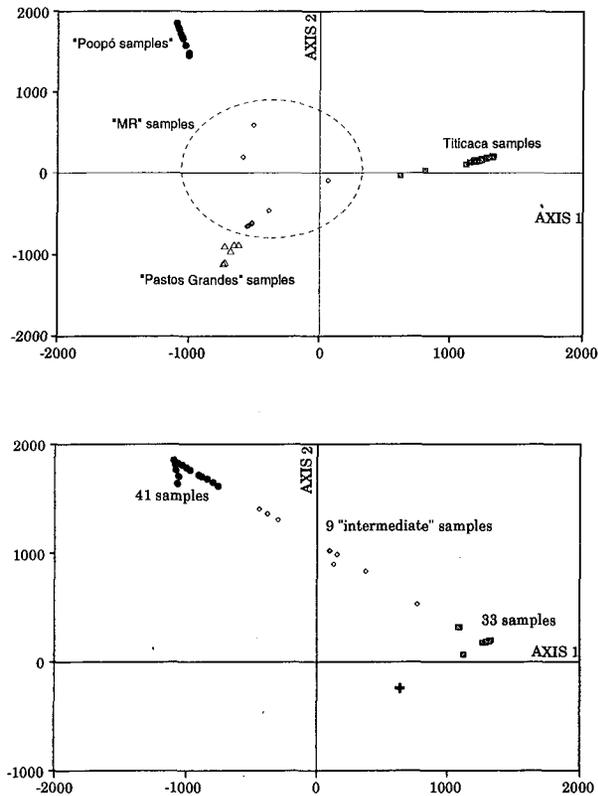


Fig. 4 - El análisis factorial de correspondencias (según Mourguiart & Carbonel, 1994): 4a - proyección sobre los dos primeros ejes de las muestras actuales (115 en total); 4b - proyección sobre los dos primeros ejes de las muestras fósiles del testigo TD1 (84 en total).

Al final de este AFC, se efectúa una regresión múltiple sobre el parámetro medioambiental tomado en cuenta, aquí la altura de agua (Fig. 5).

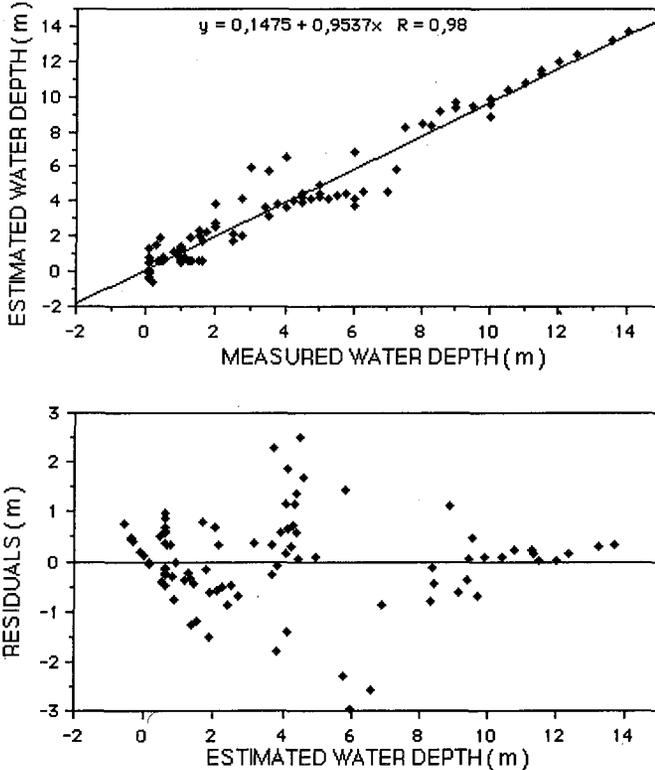


Fig. 5 - La regresión lineal múltiple obtenida en el parámetro "altura de agua" (según Mourguiart & Carbonel, 1994).

3. LOS TESTIGOS

Se extrajeron 14 testigos en el lago Titicaca con ayuda de un sacatestigo Mackereth; la mayor parte de éstos estaban constituidos de sedimentos de edad holocena. Tres testigos (TD1, TB2 y TJ, en particular), fueron objeto de un tratamiento estadístico. Fueron recolectados en 1983 en los lagos Huiñaimarca y Chucuito, en la parte boliviana. Dos sondeos (TD1 y TB2) alcanzaron el Pleistoceno superior. Lamentablemente, los sedimentos más antiguos no contienen ostrácodos. La mayoría de las especies fósiles encontradas viven actualmente en el lago Titicaca o en otros entornos lacustres como el lago Poopó o en las innumerables lagunas que jalonan el Altiplano boliviano (Mourguiart, 1987; Mourguiart & Roux, 1990; Mourguiart & Carbonel, 1994). El testigo TD1, de 5,50 m de longitud, fue extraído a 19 m de profundidad al centro de la depresión oeste ($16^{\circ}20'00''S$ y $68^{\circ}57'45''O$) del Pequeño Lago Titicaca (Fig. 2). Únicamente los 155 cm superiores contienen ostrácodos (Mourguiart *et al.*, 1992). El testigo TB2 es de 481 cm de longitud pero solamente los 266 cm superiores contienen ostrácodos. Dicho testigo fue extraído en el centro de la fosa de Chua ($16^{\circ}12'18''S$ y

68°46'36"O) por 39 m de altura de agua (Fig. 2). El testigo TJ, de 4,06 m de longitud, fue extraído por 50 m de altura de agua en la bahía de Yunguyo (16°12'30"S y 69°07'00"O) al suroeste del Gran Lago Titicaca (Fig. 2). El sedimento, de tipo organo-carbonatado ligeramente detrítico, encierra una ostracofauna rica y diversificada (Mourguiart, 1987) a excepción de 12 cm más profundos (niveles 406-394 cm) constituidos de un depósito de yeso luego de un nivel arenoso y finalmente de un lecho de espículas de esponjas.

La cronología de estos tres sondeos se realizó a partir de dataciones ^{14}C : 2 en TD1, 8 en TJ y 3 en TB2 (Cuadro 1).

Cuadro 1 - Recapitulativo de las edades en carbonatos o en Carbono Orgánico Total (C.O.T.) para los sondeos TD1, TJ y TB2.

edad ^{14}C	material fechado	muestra	sondeo	n° laboratorio
4165 ± 75	C.O.T.	88-89 cm	TD1	Beta-32216
8100 ± 280	carbonatos	157-158	(-19 m)	Orsay
3870 ± 80	carbonatos	20-21	TJ	Beta-32221
3930 ± 490	carbonatos	32-39	(-50 m)	OB DY-560
5300 ± 50	carbonatos	77-83		OB DY-835
5350 ± 40	carbonatos	83-90		OB DY-826
5970 ± 70	carbonatos	152-157		OB DY-822
5890 ± 45	carbonatos	195-200		OB DY-821
6360 ± 70	carbonatos	295-300		OB DY-559
7710 ± 180	carbonatos	390-393		OB DY-104
1240 ± 150	C.O.T.	107-112	TB2	OB DY-830
3330 ± 550	C.O.T.	172-175	(-39 m)	OB DY-828
3840 ± 80	C.O.T.	244-250		OB DY-829

3. RESULTADOS-DISCUSSION

Para verificar la validez de una función de transferencia y su grado de fiabilidad, son muchos los instrumentos estadísticos pero tienen el inconveniente que sólo hacen intervenir las muestras actuales introducidas en el AFC como tales (Fig. 5). Además, hemos integrado once muestras actuales como elementos pasivos. La regresión dio en diez de éstas un valor inferior al error standard en el parámetro profundidad. Sin embargo, estos tests no dan cuenta de la aplicabilidad de la función de transferencia a faunas fósiles.

Un medio de verificación indirecto se da comparando los resultados de varios testigos. Es lo que hemos realizado introduciendo en el AFC las faunas fósiles de los 3 testigos, TD1, TB2 y TJ.

La comparación de las evoluciones paleobatimétricas establecidas para los 3 testigos (Fig. 6a) indica claramente que las 3 grandes cuencas del lago Titicaca funcionaron de manera independiente durante la casi totalidad del Holoceno (Mourguiart & Roux, 1990). En efecto, la fase seca del inicio del Holoceno terminó con el desecamiento completo (o casi completo) del lago Huiñaimarca (Wirrmann & Mourguiart, 1995). El mejoramiento climático que sigue a esta fase de aridez permite el llenado de las cuencas. Sin embargo, algunas diferencias de

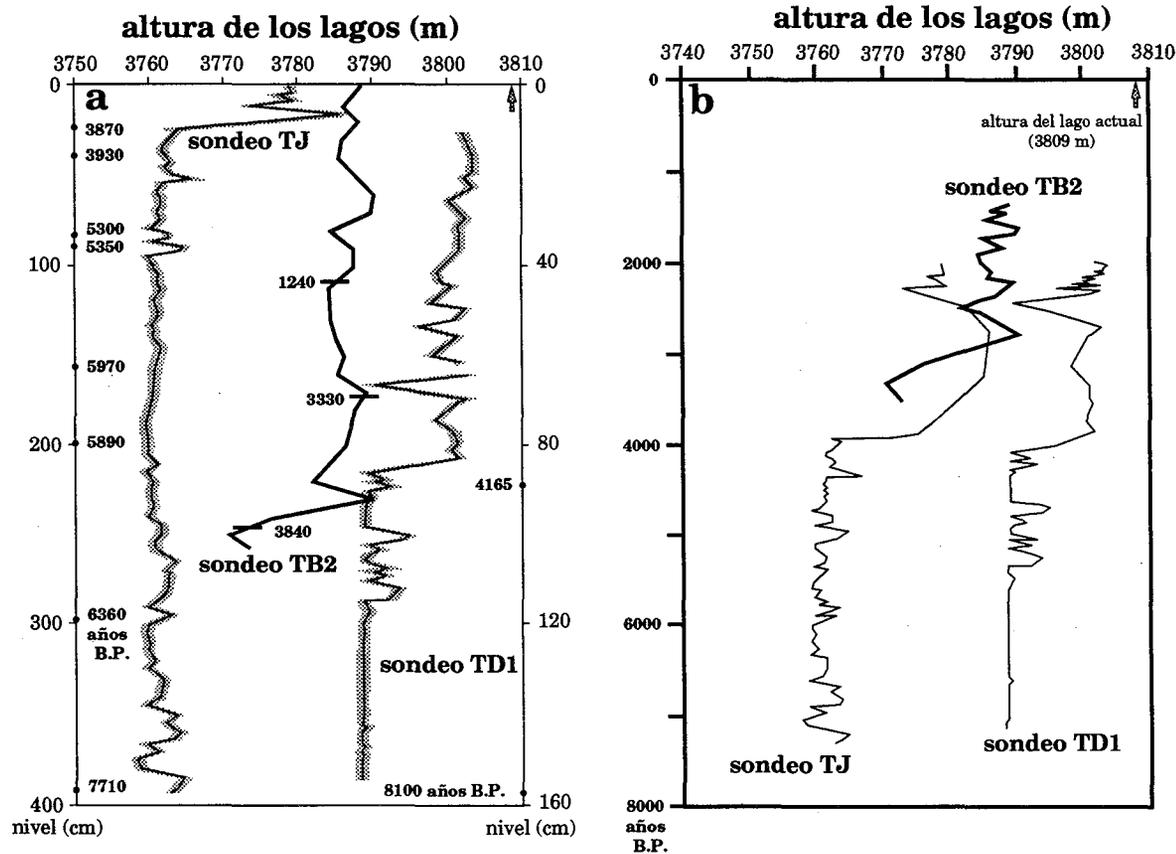


Fig. 6 - Evoluciones paleobatimétricas de los testigos TJ, TB2 y TD1 reconstruidas a partir de la función de transferencia ostrácodos / batimetría: 6a - resultados niveles/altura de agua obtenidos directamente luego de la regresión; 6b - resultados edades ^{14}C /altura de agua obtenidos por interpolación lineal entre dos fechas; estos valores no toman en cuenta un posible efecto reservorio.

niveles de agua se explican por diferencias de altitud y de morfología entre las dos cuencas. La cuenca de Guaqui-Taraco es muy plana (poco profunda y con una gran superficie evaporítica); ésta reacciona inmediatamente al mínimo cambio hidrológico. La fosa de Chúa es de pequeña dimensión pero relativamente profunda con una superficie evaporítica reducida. En cuanto al lago Chucuito, este sigue siendo un gran lago con profundidades importantes. A pesar de estas dificultades, es posible poner en paralelo las grandes tendencias propias de cada registro (Fig. 6). Se observa enseguida que hay convergencia de varios puntos y que la función de transferencia permite correlaciones. Así, los testigos TJ y TD1 registraron una sensible mejoría del balance paleohidrológico alrededor de los 8 000 años BP (entre $8\ 100 \pm 280$ y $7\ 710 \pm 180$ años BP), mejoría que sigue a una importante fase climática seca que caracterizó el comienzo del Holoceno y se concretó por medio de depósitos de yeso localizables en las columnas sedimentarias de los dos testigos (Wirrmann *et al.*, 1988, 1992).

Más tarde, y hasta alrededor de 3 900 años BP, los dos planos de agua que corresponden a los dos testigos (lago Chucuito y bahía de Guaqui-Taraco) evolucionaron alrededor de un nivel bajo relativamente estable. Enseguida, la brusca crecida de los planos de agua, cuya edad está estimada en alrededor de 3 900 años BP, es particularmente localizable a nivel de las 3 series (testigos TJ, TB2 y TD1) pero también en otros registros como el testigo TE (Mourguiart *et al.*, 1992). A partir de 3 900 años BP y hasta una fecha reciente no delimitada con precisión ($< 1\ 000$ años BP), los 3 planos de agua (lago Chucuito, fosa de Chua y bahía de Guaqui-Taraco) van a permanecer a alturas inferiores al nivel actual de 3 809 m. Los niveles son relativamente estables a excepción de eventos excepcionales como la fase seca fechada alrededor de 2 300 años BP. Esta situación climática particular se marca en términos de paleohidrología por un gran retroceso de los niveles de agua (*cf.* testigos TJ y TD1, Fig. 6).

5. CONCLUSIÓN

Se desarrolló una función de transferencia a partir de faunas de ostrácodos encontradas en el Altiplano boliviano. Es posible reconstruir con precisión la evolución paleobatimétrica de un sistema lacustre como el lago Titicaca durante el Holoceno. La introducción en el análisis factorial de correspondencias de varios testigos extraídos en este último medio, nos permitió evidenciar una evolución compleja, marcada principalmente por niveles de planos de agua inferiores al actual. Nuestros datos confirman la circunstancia de una fase climática seca durante el Holoceno.

Referencias citadas

- BENZECRI, J.P., 1973 - *L'analyse des données*, tome 2: l'analyse des correspondances, 1248p., Paris: Dunod.
- BOWMAN, I., 1909 - The physiography of the Central Andes. *American Journal of Sciences*, 4(28): 373-402.
- COLLOT, D., KORIYAMA, F. & GARCÍA, E., 1983 - Répartitions, biomasses et productions des macrophytes du lac Titicaca. *Revue d'Hydrobiologie tropicale*, 16(3): 241-261.
- GROSJEAN, M., 1994 - Paleohydrology of the Laguna Lejía (north Chilean Altiplano) and climatic implications for late-glacial times. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 109: 89-100.

- HASTENRATH, S. & KUTZBACH, J., 1985 - Late Pleistocene climate and water budget of the South American altiplano. *Quaternary Research*, 24: 249-256.
- ILTIS, A. & MOURGUIART, P., 1992 - Higher plants: Distribution and biomass. in: *Lake Titicaca. A synthesis of Limnological Knowledge* (C. Dejoux & Ilitis eds.): 241-252, Monographiae Biologicae 68, Kluwer Academic Publishers.
- KESSLER, A., 1988 - Die Schwankungen des Wasserhaushaltes de südamerikanischen Altiplano and Welklima. *Jahrbuch der Geographischen Gesellschaft zu Hannover*: 139-159.
- MESSERLI, B., GROSJEAN, M., BONANI, G., BÜRGI, A., GEYH, M.A., GRAF, K., RAMREYER, K., ROMERO, H., SCHOHERER, U., SCHREIR, H. & VUILLE, M., 1993 - Climate change and dynamics of natural resources in the Altiplano of northern Chile during Late Glacial and Holocene time. First Synthesis. *Mountain Research and Development*, 13(2): 117-127.
- MOURGUIART, P., 1987 - Les ostracodes lacustres de l'Altiplano bolivien - Le polymorphisme, son intérêt dans les reconstructions paléohydrologiques et paléoclimatiques de l'Holocène. Thèse Université de Bordeaux I, inédit, 263p.
- MOURGUIART, P., 1992 - The Ostracoda. in: *Lake Titicaca. A synthesis of Limnological Knowledge* (C. Dejoux & A. Ilitis eds.): 337-345, Monographiae Biologicae 68, Kluwer Academic Publishers.
- MOURGUIART, P. & CARBONEL, P., 1994 - A quantitative method of palaeolake-level reconstructions using ostracod assemblages: an example from the Bolivian Altiplano. *Hydrobiologia*, 288: 183-193.
- MOURGUIART, P. & ROUX, M., 1990 - Une approche nouvelle du problème posé par les reconstructions des paléoniveaux lacustres: utilisation d'une fonction de transfert basée sur les faunes d'ostracodes. *Géodynamique*, 5(2): 151-165.
- MOURGUIART, P., WIRRMANN, D., FOURNIER, M. & SERVANT, M., 1992 - Reconstruction quantitative des niveaux du petit lac Titicaca au cours de l'Holocène. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Paris*, 315, Série II: 875-880.
- ROCHE, M.A., BOURGES, J., CORTES, J. & MATTOS, R., 1992 - Climatology and hydrology of the Lake Titicaca basin. in: *Lake Titicaca. A synthesis of Limnological Knowledge* (C. Dejoux & A. Ilitis eds.): 63-88, Monographiae Biologicae 68, Kluwer Academic Publishers.
- SELTZER, G.O., 1992 - Late Quaternary glaciation of the Cordillera Real, Bolivia. *Journal of Quaternary Science*, 7: 87-98.
- SERVANT, M. & FONTES, J.C., 1978 - Les lacs quaternaires des hauts plateaux des Andes boliviennes. Premières interprétations paléoclimatiques. *Cahiers ORSTOM, Série Géologie*, 10(1): 9-23.
- STEINMANN, G., HOK, H. & BISTRAM, A., 1904 - Zür Geologie des suedestland Bolivien. *Zentralblatt für Mineralogie*, 5: 1-4.
- WIRRMANN, D. & MOURGUIART, P., 1995 - Late Quaternary spatio-temporal limnological variations in the Altiplano of Bolivia and Peru. *Quaternary Research*, 43: 344-354.
- WIRRMANN, D., MOURGUIART, P. & de OLIVEIRA ALMEIDA, L.F., 1988 - Holocene sedimentology and ostracodes repartition in Lake Titicaca. Paleohydrological interpretations. in: *Quaternary of South America and Antartic Peninsula*, 6 (Rabassa, J. ed.): 89-127, Balkema, Rotterdam.
- WIRRMANN, D. & OLIVEIRA ALMEIDA, L.F., 1987 - Low Holocene level (7700 to 3650 years ago) of Lake Titicaca (Bolivia). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 59: 315-323.
- WIRRMANN, D., YBERT, J.P. & MOURGUIART, P., 1992 - A 20,000 years paleohydrological record from Lake Titicaca. in: *Lake Titicaca. A synthesis of Limnological Knowledge* (C. Dejoux & A. Ilitis eds.): 40-48, Monographiae Biologicae 68, Kluwer Academic Publishers.