

## PALEOHIDROLOGÍA DE LOS ÚLTIMOS 25 000 AÑOS EN LOS ANDES BOLIVIANOS

*Jaime Argollo \*, Philippe Mourguiart \*\**

### Resumen

En base a datos geomorfológicos, sedimentológicos, palinológicos y el análisis de fauna de ostrácodos, se ha determinado (1), de manera semicuantitativa, la temperatura así como (2) los cambios cuantificados de las variaciones de los niveles lacustres desde el final del Pleistoceno (25 000 años BP). Los principales resultados obtenidos son los siguientes: de 25 000 a 18 000 años BP, las temperaturas atmosféricas son bajas así como los niveles de los lagos; entre 18 000 y 15 000/14 000 años BP, una fase climática seca es definida por la presencia de una laguna de sedimentación; durante el Tardi-Glacial (15 000/14 000 a 10 500 años BP), los lagos (fase Tauca) y los glaciares se extendieron; de 10 500 a 8 000 años BP, los lagos y los glaciares retroceden muy rápidamente mientras que la temperatura global media aumenta; el Holoceno medio (8 000-3 900 años BP) corresponde generalmente a un clima seco; alrededor de 3 900 años BP, el nivel del lago Titicaca sube considerablemente; luego se instalan condiciones relativamente húmedas; durante la Pequeña Edad de Hielo (siglos XVI y XIX), prevalecen condiciones frías y húmedas.

**Palabras claves:** *Paleoclima, Lagos, Glaciares, edades <sup>14</sup>C, Cuaternario terminal.*

## PALÉOHYDROLOGIE DES DERNIÈRES 25 000 ANNÉES DANS LES ANDES BOLIVIENNES

### Résumé

Nous présentons une reconstruction climatique de haute résolution de l'Altiplano bolivien (Andes Centrales) basée sur des données géomorphologiques, sédimentologiques, palynologiques et provenant de l'analyse des faunes d'ostracodes. Nous avons déterminé (1), de manière semi-quantitative, la température ainsi que (2) de façon quantitative, les variations des niveaux lacustres depuis la fin du Pléistocène (25 000 ans BP). Les principaux résultats obtenus sont les suivants: de 25 000 à 18 000 ans BP, les températures atmosphériques sont basses ainsi que les niveaux des lacs; entre 18 000 et 15 000/14 000 ans BP, la présence d'une lacune de sédimentation est indicatrice d'une phase climatique sèche; pendant le Tardi-Glaciaire (15 000/14 000 - 10 500), les lacs (phase Tauca) et les glaciers se sont étendus; de 10 500 à 8 000 ans BP, les lacs et les glaciers reculent très rapidement pendant que la température globale moyenne augmente; à l'Holocène moyen (8 000-3 900 ans BP), le climat régional est globalement de type sec ; autour de 3 900 ans BP, le niveau du lac Titicaca monte fortement; des conditions relativement humides s'installent alors et se maintiennent par la suite; pendant le Petit Âge de la Glace (16<sup>ème</sup>-19<sup>ème</sup> siècles), des conditions froides et humides prévalent.

**Mots-clés :** *Paléoclimats, Lacs, Glaciers, Âges <sup>14</sup>C, Quaternaire terminal.*

\* Universidad Mayor de San Andrés, Instituto de Investigaciones Geológicas, CP 12198 La Paz, Bolivia.

\*\* UR12, Programme AIMPACT, Mission ORSTOM, CP 9214 La Paz, Bolivia.

## 25,000 YR BP PALEOHYDROLOGY OF THE BOLIVIAN ANDES

## Abstract

We report a high-resolution climate reconstruction for the Bolivian Altiplano (Central Andes) based on geomorphological, sedimentological, palynological, and analysis of lacustrine ostracod shells. We determine (1) semi-quantitative changes in temperature and (2) quantitative changes in lake-levels from the late Pleistocene (25,000 yr BP) to the present. The principal results are the following ones: from 25,000 to 18,000 yr BP, temperatures decreased as lake-levels lowered; between 18,000 and 15,000/14,000 yr BP, a sedimentary hiatus indicates very low Lake Titicaca levels; during the last deglaciation (15,000/14,000, 10,500 yr BP), lake levels (Tauca phase) and glaciers were consistently wide in the Altiplano and cordilleras; from 10,500 to 8000 yr BP, lake levels declined and glaciers receded as global temperature increased; during the mid-Holocene (8000-3900 yr BP) a dry climate generally prevailed; by 3900 yr BP, the lake level rose markedly and relatively moist conditions were established and persisted after; during the Little Ice Age (16th-19th centuries), moist and cold conditions prevailed.

**Key words:** *Paleoclimate, Lakes, Glaciers, <sup>14</sup>C Ages, Late Quaternary.*

## INTRODUCCIÓN

El Último Máximo Glaciar es, sin duda alguna, uno de los períodos más estudiados de la historia de la Tierra (ver por ejemplo Wright *et al.*, 1993). En cambio, en los Andes tropicales, muy pocos sondeos alcanzaron este lapso de tiempo (Markgraf, 1993). A nivel de los Andes Centrales, sólo un registro continuo ha proporcionado cierto número de informaciones (Hansen *et al.*, 1984). Pero existe una multitud de datos fragmentarios más o menos fechados y corresponden ya sea a depósitos glaciares o a secuencias lacustres (líneas de riberas, incrustaciones calcarias de origen biológico, etc.).

El Altiplano (altiplanicies enmarcadas por dos cordilleras montañosas de los Andes) forma parte de las zonas más antiguamente estudiadas (Steinmann *et al.*, 1904; Bowman, 1909; Servant & Fontes, 1978). Estos autores diferenciaron así 3 grandes extensiones lacustres (Ballivián, Minchin y Tauca) puestas en relación con 3 importantes avances glaciares (Sorata, Choqueyapu I y Choqueyapu II). Estas informaciones tienen por el momento el inconveniente de apoyarse en un control cronológico débil, incluso inexistente.

En este trabajo nos proponemos hacer el punto en el último evento mayor (fechado del Tardi-Glaciar) y en condiciones paleohidrológicas y paleoclimáticas que lo precedieron y siguieron, es decir los 25 últimos milenios. Esta reconstrucción se realiza en base a los últimos datos provenientes de tres medios de sedimentación: el lago Titicaca, los salares de las cuencas del sur, así como los valles de la Cordillera Oriental.

## 1. ZONA DE ESTUDIO

El Altiplano de Bolivia, situado a 3 650-3 900 m de altura aproximadamente, se encuentra en el corazón de los Andes (66-71° de longitud Oeste y 14-22° de latitud Sur) entre las Cordilleras oriental y occidental que culminan a más de 6 000 m (Fig. 1). Tres grandes cuencas lacustres caracterizan a esta vasta depresión en vías de terraplenamiento desde el Terciario (Lavenue, 1992):

- la cuenca del lago Titicaca, al norte
- la cuenca del lago Poopó, al centro, y,
- las cuencas de los salares de Coipasa y de Uyuni, al sur.

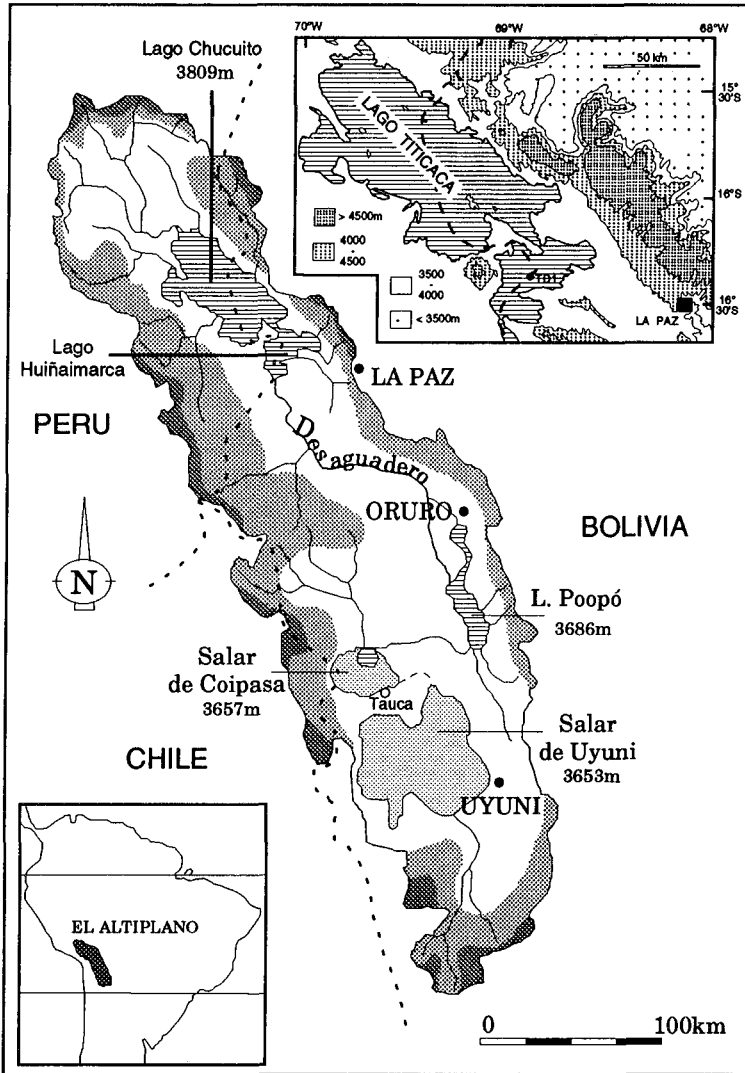


Fig. 1 - Situación de las principales cuencas lacustres del Altiplano. Localización de los sondeos y sitios estudiados.

Desde el final del Terciario hasta el actual, una alternancia de depósitos, generalmente imputables a cambios climáticos, rellenan las cuencas del Altiplano. Los sedimentos son variados y están constituidos por depósitos arcillosos, limosos a arenosos incluso pedregosos de origen lacustre, eólico o fluvial, de depósitos carbonatados de origen biogénico... Esta variedad prueba condiciones de sedimentación muy diferentes. En particular los cambios que intervinieron en el régimen pluvial ocasionaron precipitaciones de yeso hace aproximadamente 8 000 años BP en el lago Titicaca (Wirrmann & Oliveira Almeida, 1987) o, por el contrario, se señalan por líneas de paleoribera datadas de 13 790 años BP a alturas de

3 770-3 780 m, es decir alrededor de 120-130 m arriba el nivel actual de los salares de Coipasa y Uyuni (Bills *et al.*, 1994).

Hoy en día, las extensiones lacustres s. l. (Titicaca, Poopó, Coipasa y Uyuni) son el reflejo del gradiente pluviométrico muy marcado que existe entre el noreste (Cordillera oriental, cuenca del lago Titicaca) y el suroeste del Altiplano (Cordillera occidental, cuenca del salar de Uyuni); las precipitaciones pasan de más de 800 mm por año a menos de 200 mm por año, mientras que la evaporación estimada pasaría de valores cercanos a 1 500 mm por año en el norte, a 2 000 mm por año en el sur (Roche *et al.*, 1992; Grosjean, 1994). Así, el nivel del lago Poopó está íntimamente ligado al del lago Titicaca vía el caudal del río Desaguadero. Estos gradientes climáticos son la consecuencia del desplazamiento en latitud, en dirección del sur, de la Zona de Convergencia Intertropical o ZCIT que alcanza los Andes durante los meses de verano austral de diciembre a marzo. Los vientos del sector Este y la anomalía térmica caliente que constituye el Altiplano en esta estación favorecen las penetraciones frecuentes del aire húmedo proveniente de la Amazonía. Esto ocasiona precipitaciones de carácter tempestuoso, cada vez más episódicas a medida que se aleja hacia el sur de la cuenca. Opuestamente, durante la estación seca (invierno austral), la ZCIT se desplaza hacia el norte. Las fluctuaciones de los vientos del oeste permiten solamente penetraciones esporádicas del aire húmedo amazónico, que provoca precipitaciones aisladas y de baja intensidad (Taljaard, 1972).

## 2. MÉTODOS

Con el objeto de reconstruir escenarios paleohidrológicos de un pasado relativamente reciente (< 25 000 años BP), hemos analizado varios tipos de registros provenientes de grandes unidades geomorfológicas del Altiplano: el lago Titicaca, las cuencas sur y los valles de la Cordillera de los Andes.

El lago Titicaca ha proporcionado el registro más completo sobre los últimos 25 000 años BP. El sondeo TD1, de 5,40 m de longitud, fue extraído por debajo de 19 m de altura de agua en el lago Huiñaimarca (Fig. 1). La sedimentología (Wirrmann & Oliveira Almeida, 1987), la palinología (Ybert, 1992) así como el estudio de los ostrácodos (Mourguiart & Roux, 1990; Mourguiart *et al.*, 1992) permitieron la reconstrucción de la paleohidrología de esta cuenca lacustre. De una manera sintética, las distintas facies sedimentarias se reparten en el lago Titicaca en función de la dinámica litoral, de la actividad biológica y de la altura de agua (Boulangé *et al.*, 1981; Wirrmann & Rodrigo, 1992). Los pólenes y las esporas tienen una distribución que depende de la batimetría pero también de la temperatura atmosférica o, más exactamente, de la altura (Ybert, 1992). La repartición de los ostrácodos, organismos esencialmente bénticos, dependen en el lago Titicaca, de la naturaleza del sustrato, de la repartición de las macrófitas, de la energía, del tenor en oxígeno disuelto de la interfase agua-sedimento, etc., términos estrechamente relacionados a la profundidad de agua (Mourguiart & Carbonel, 1994). Si bien los estudios sedimentológicos y palinológicos permitieron reconstruir cualitativamente (incluso semicuantitativamente), las variaciones de los niveles del lago Titicaca y de la temperatura atmosférica desde hace 25 000 años BP (Wirrmann *et al.*, 1992; Ybert, 1992), los ostrácodos sirvieron de trama para un enfoque cuantificado del problema planteado por las reconstrucciones paleohidrológicas (Mourguiart & Roux, 1990; Mourguiart *et al.*, 1992; Mourguiart & Carbonel, 1994).

Las cuencas del Sur proporcionan registros sedimentarios radicalmente diferentes, tal vez por su carácter discontinuo. Los depósitos estudiados que se reparten en el perímetro de las 3 cuencas principales (Poopó, Coipasa y Uyuni), más que todo en el sur del salar de Coipasa y norte del salar de Uyuni (región de Tauca, Fig. 1), se presentan esencialmente en forma de sedimentos carbonatados (costras microcristalinas induradas, biohermas vegetales impropriadamente llamados "estromatolitos", horizontes ricos en Characeae, en moluscos, etc.), arcillosos o limosos (diatomitas, niveles limosos a arenosos) (Fig. 2).

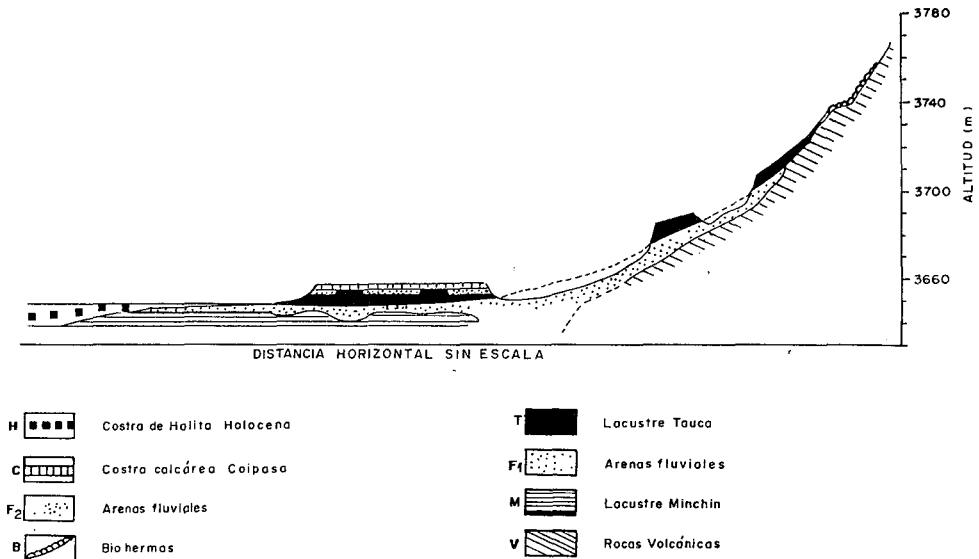


Fig. 2 - Corte esquemático de los depósitos sedimentarios del fin del Pleistoceno y del Holoceno al borde del salar de Coipasa.

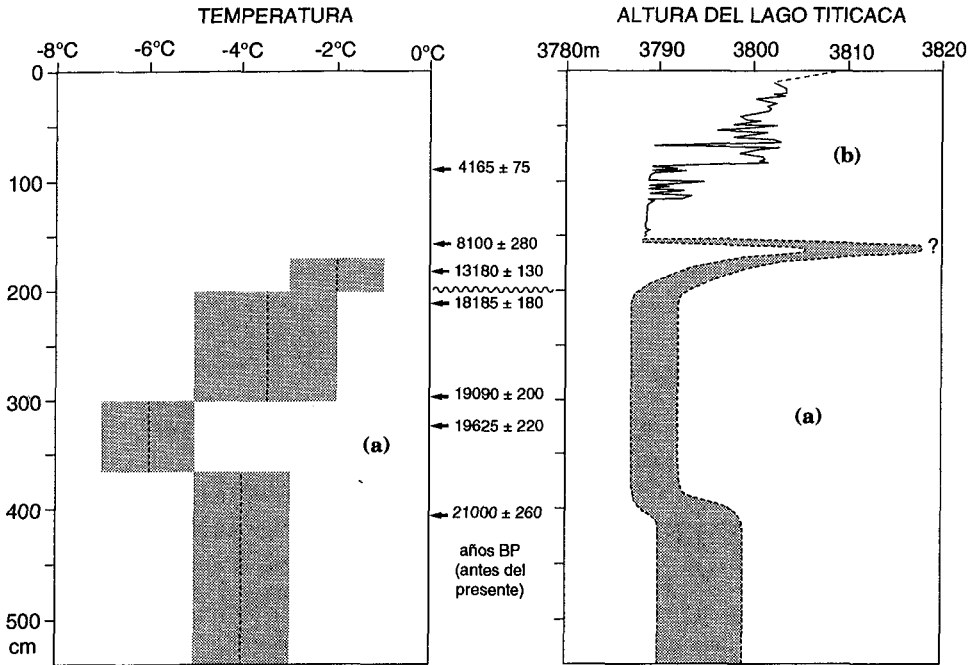
Los valles andinos conservan la huella de las glaciaciones antiguas y de los diferentes tipos de escurrimientos que se sucedieron a través del tiempo. Dataciones  $^{14}\text{C}$  permitieron precisar la edad de los acontecimientos. Así, en los casos más favorables, edades máximas y mínimas permiten estimar la edad en que apareció una morrena frontal correspondiente al máximo avance de un glaciar o el de un episodio de sedimentación detrítica espesa posterior.

### 3. RESULTADOS

#### 3. 1. El Lago Titicaca

Los resultados del estudio del sondeo TD1 se encuentran en la figura 3. Dos tipos de información fueron obtenidos y corresponden a las estimaciones relativas a la temperatura y a la altura del agua en el momento del depósito del sedimento. Las tendencias evolutivas mayores fueron fechadas con la ayuda de 7 dataciones  $^{14}\text{C}$  (una convencional, laboratorio de Orsay, Francia, y 6 AMS, laboratorio Beta Analytic, Miami, Estados Unidos; Wirmann & Mourguiart, 1995).

La parte inferior del testigo (540-200 cm) se caracteriza por bajos niveles lacustres. El lago Huiñaimarca tiene un nivel que oscila entre 3 790 y 3 795 m de altura (Fig. 3), valores que deben compararse con el nivel actual de 3 809 m. La temperatura media atmosférica



**Fig. 3 - Paleotemperaturas y paleoniveles lacustres reconstruidos a partir de datos a) palinológicos (Ybert, 1992) y b) ostracodológicos (según Mourguiart *et al.*, 1992) del testigo TD1. La edad de la base de la columna sedimentaria (nivel 537,5 cm) está estimado en *ca.* 25 000 años BP.**

reconstruida también a partir de los datos palinológicos es en promedio 3,5 a 4 °C inferior a la temperatura actual con un período de enfriamiento intenso (- 6 °C) entre 20 000 y 19 000 años BP (Ybert, 1992; niveles 360-330 cm de la figura 3).

A 200 cm de la muestra, existe un importante hiato de sedimentación, poco visible a la observación de la litología pero evidente tomando en cuenta las edades obtenidas para ambas partes. Aproximadamente 3 ó 4 milenios parecen faltar, entre 18 000 y 15 000/14 000 años BP. Esta laguna sedimentaria es indicativo de una sequía muy marcada.

De 200 a 155 cm (15 000/14 000 - 8000 años BP), el nivel medio del lago Huiñaimarca se eleva. La palinología así como el bajo índice de sedimentación no permiten precisar el nivel máximo alcanzado por el lago durante esta fase húmeda ni delimitar su edad radiométrica, que se sitúa alrededor de 13 180 ± 130 años BP. Este acontecimiento es aparentemente sincrónico de la fase llamada "Tauca" bien caracterizada en el sur del Altiplano (Servant & Fontes, 1978; *cf. infra*). El inicio de este episodio lacustre está marcado por temperaturas más bajas que actualmente (-2 °C). Más allá, la palinología proporciona poca información respecto a las temperaturas medias atmosféricas porque, probablemente, las variaciones fueron tan débiles que no ocasionaron más cambios significativos en la vegetación local. El fin del episodio está marcado por el desecamiento del lago Huiñaimarca, desecamiento que se tradujo a nivel sedimentológico en un depósito de yeso (Wirrmann & Oliveira Almeida, 1987; Wirrmann *et al.*, 1988).

De 155 a 10 cm, las paleoprofundidades son reconstruidas a partir de una función de transferencia ostrácodos/batimetría (Mourguiart *et al.*, 1992; Fig. 3). De 155 a 85 cm, los niveles lacustres permanecen muy bajos con oscilaciones en la cima de esta ecozona. Alrededor de los 85 cm (3 900 años BP) aumenta enormemente el nivel del lago Huiñaimarca; luego, el nivel va a mantenerse relativamente alto con, no obstante, breves episodios secos, uno de los cuales muy marcado, que ha sido fechado de 2 300 años BP (Mourguiart *et al.*, 1992).

De 10 cm al tope del testigo TD1, la ausencia de ostrácodos no permite reconstruir cuantitativamente la evolución de los niveles del lago Huiñaimarca. La ausencia de ostrácodos caracteriza hoy en día las zonas profundas del lago, como el sitio de extracción de la muestra TD1. No obstante, podemos concluir que el lago apenas ha alcanzado su nivel actual recientemente.

### 3. 2. Las cuencas del sur

En la figura 4 aparecen las relaciones edades/altura de muestreo. Las edades fueron establecidas a partir de organismos fosilizados y de depósitos carbonatados (moluscos, biohermas vegetales y costras microcristalinas). No tomamos en cuenta el efecto de reservorio; es decir que además las edades dadas deben ser consideradas como edades máximas. No obstante, debe observarse que al nivel del lago Titicaca existe una diferencia del orden de 4 siglos entre las edades obtenidas en carbonatos y las de materia orgánica (Curtis *et al.*, 1993).

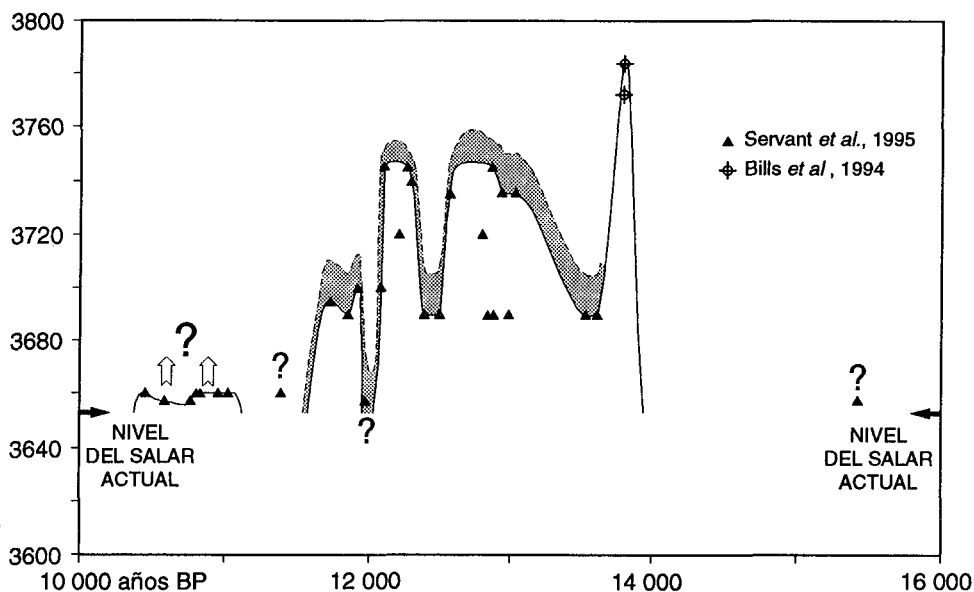


Fig. 4 - Proyección de las edades  $^{14}\text{C}$  en función de su altura de recolección (según los datos de Servant *et al.*, 1995 y de Bills *et al.*, 1994). El trazo entero corresponde a un nivel mínimo alcanzado por el paleolago en el tiempo  $t$ ; el trazo discontinuo a su nivel máximo (ver texto para mayores detalles).

A partir de numerosas edades obtenidas, es posible reconstruir la evolución de los niveles del lago Tauca. Sin embargo, la curva deducida representa un mínimo, ya que los depósitos y organismos carbonatados se depositaron forzosamente en alturas de agua variables. Con excepción de las edades que datan de una línea de ribera (Bills *et al.*, 1994; Fig. 4) y las obtenidas a partir de costras microcristalinas induradas (Servant *et al.*, 1995; edades < 11 500 años BP de la figura 4), la mayoría de las dataciones  $^{14}\text{C}$  fueron obtenidas en macrófitas (Characeae o biohermas indiferenciados). En el sistema hidrológico actual del Altiplano, la extensión de la zona eufótica, que evidentemente depende de la transparencia de las aguas, varía del norte al sur como sigue: hasta 15-17 m en el lago Chucuito, hasta 7,5-8 m en el lago Huiñaimarca y 3-3,5 m en el lago Poopó (Collot *et al.*, 1983; Iltis & Mourguiart, 1992). Por consiguiente, es posible proporcionar una curva para la evolución de ciertos niveles del lago Tauca considerando como máximo la profundidad de 15-17 m susceptible de ser colonizada por vegetales fijados (Fig. 4).

La fase lacustre Tauca parece más compleja en su evolución de lo que habían supuesto los primeros autores (Servant & Fontes, 1978). Los niveles alcanzados por los paleolagos Poopó, Coipasa y Uyuni en el máximo acontecimiento húmedo eran también más elevados.

En resumen, la fase lacustre Tauca se extendió de 14 000 a 10 500 años BP (no tomamos en cuenta aquí la única edad obtenida alrededor de 15 000 años BP por Servant *et al.*, 1995, edad que según nosotros requiere ser confirmada). En el transcurso de este acontecimiento húmedo, se produjeron oscilaciones de gran magnitud, en términos de balance hídrico.

### 3. 3. Los valles de la Cordillera Oriental

Los acontecimientos glaciares de fines del Cuaternario están bien conservados en la morfología de los valles andinos por la presencia de numerosos grupos de morrenas. La cronología de estos depósitos fue establecida por dataciones  $^{14}\text{C}$  en material orgánico (turbas). Fue posible identificar 4, incluso 5, grupos de morrenas (Fig. 5).

- Un primer grupo de morrenas M1a se sitúa aproximadamente a 20 km de los glaciares actuales. La posición cronológica de este conjunto es imprecisa pero parece posterior a 23 000 años BP.
- Un segundo complejo llamado M1b, situado a aproximadamente 2-3 km río arriba de la M1a, está datado de 14 300 años BP. En algunos valles, el avance glaciar que corresponde a esta fase re trabajó de nuevo los depósitos anteriores (morrena M1a), lo que demuestra la gran amplitud de este acontecimiento. Actualmente, este episodio es considerado en los Andes Centrales como el Último Máximo Glaciar (Gouze *et al.*, 1986; Argollo *et al.*, 1987; Clapperton, 1993a; Seltzer, 1994).
- Otro grupo de morrenas llamada M2, presente en la mayoría de los valles, se sitúa a 7-8 km del anterior es decir a aproximadamente 10 km río abajo de los glaciares actuales. La posición cronológica de esta morrena no es conocida con precisión.
- Las morrenas llamadas M3 están situadas cerca de los anteriores (2-3 km río arriba) y están datadas anteriores a 10 500 - 10 000 años BP. Existen fuertes conjeturas respecto a si este acontecimiento, también localizado en Perú, es



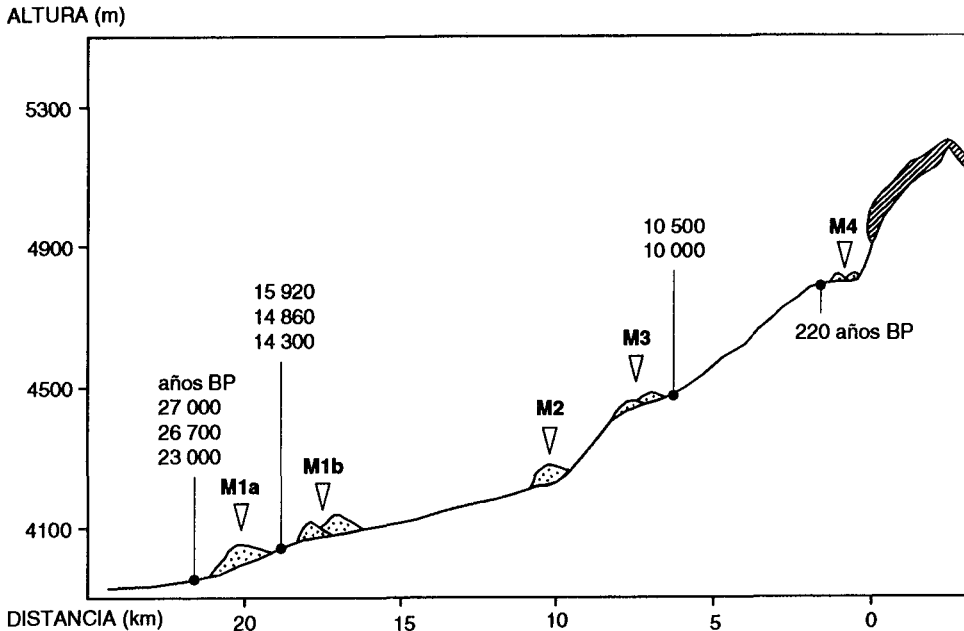


Fig. 5 - Diagrama sintético indicando la posición de morrenas en relación con el frente del glaciar actual y su edad estimada (según datos publicados por Gouze *et al.*, 1986 e inéditos). Las distancias sólo son dadas a modo indicativo.

sincrónico del Dryas reciente o *Younger Dryas* (Clapperton, 1993b; Francou *et al.*, 1995).

- Un último paquete de morrenas está presente a solamente 0,5-1 km de los glaciares actuales. Corresponde al período llamado Pequeña Edad de Hielo o *Little Ice Age*, período que data de los siglos XVI y XIX (Thompson *et al.*, 1986).

Por otro lado, el estudio de los depósitos fluviales que se sitúan río abajo de las secuencias morrénicas, muestra que las precipitaciones evolucionaron durante los últimos 30 milenios, entre un régimen torrencial favorable a la erosión y un régimen más regular favorable a la acumulación de sedimentos finos en las partes profundas. Así, fueron identificadas 3 fases de erosión generalizada y fechadas cerca de 17 000-13 500 años BP, de 7 500-6 000 años BP y posteriormente a 1 500 ó 500 años BP (Servant & Fontes, 1984).

#### 4. DISCUSIÓN

Los datos obtenidos son difícilmente comparables entre ellos, y esto por diferentes razones:

- la sedimentación es muy diferente de un sitio a otro; a nivel del lago Titicaca, tenemos un registro casi completo mientras que los otros datos tienen un carácter eminentemente fragmentario;

- las dataciones  $^{14}\text{C}$  fueron obtenidas en material carbonatado y en materia orgánica de diversos orígenes; las edades deducidas no son forzosamente compatibles entre ellas;

- la complejidad de las situaciones hidrológicas así como la magnitud de los fenómenos climáticos.

No obstante, es posible sacar ciertas conclusiones. Parece que la fase lacustre "Tauca" (Servant & Fontes, 1978), bien documentada a nivel de las cuencas del sur (paleolagos Poopó, Coipasa y Uyuni), es sincrónica de una oscilación positiva de los balances en agua del lago Titicaca (Fig. 3). Con referencia al esquema hidroclimático actual, es totalmente legítimo pensar que el lago Titicaca ha fluctuado de manera importante entre 15 000/14 000 y 10 500 años BP a semejanza de las cuencas del sur (Fig. 4). Por otra parte, la limitación impuesta por la precisión relativa de las edades radiométricas no permite correlacionar los acontecimientos lacustres de la fase Tauca (Fig. 4) a las pulsaciones de los glaciares de la Cordillera Oriental de los Andes de Bolivia (Fig. 5). Sin embargo, los 2 tipos de registros revelan historias complejas; asimismo, es razonable pensar, contrariamente a lo que había sido adelantado por Servant & Fontes (1978), una simultaneidad entre avance de los glaciares y oscilaciones positivas de los lagos. En todo caso, es el esquema que parece haber prevalecido durante la Pequeña edad de Hielo (Thompson *et al.*, 1986). Mientras que los glaciares progradaban de 0,5 a 1 km, el lago Titicaca (y probablemente los niveles de los lagos de las cuencas del sur) se elevaban algunos metros (Wirmann & Oliveira Almeida, 1987; Mourguiart, datos no publicados). Es lo que confirman también las informaciones recientes obtenidas a partir de los balances hidrológicos de los glaciares (Ribstein *et al.*, 1995): durante un año seco (año El Niño), los glaciares retroceden fuertemente así como el lago Titicaca, e inversamente.

## 5. CONCLUSIÓN

La evolución paleoclimática, deducida de la paleohidrología (Fig. 3, 4 y 5), del Altiplano boliviano desde aproximadamente 25 000 años BP, parece ser mucho más compleja de lo que supusieron los primeros autores. Puede ser resumida como sigue:

- de 25 000 a 18 000 años BP, desecamiento progresivo del lago Huiñaimarca; este acontecimiento correspondería al final de la fase Minchin localizada en las cuencas del sur (Steinmann *et al.*, 1904; Servant & Fontes, 1978); avance glaciario hacia los 19 000 años BP? (morrena M1a?);
- de 18 000 a 15 000/14 000 años BP, ninguna información disponible, ni al norte, ni al sur del Altiplano; fase climática seca;
- de 15 000/14 000 (o 14 500) a 10 500 años BP, fase lacustre Tauca y avances glaciares (morrenas M1b, M2 y M3);
- de 10 500 a 8 000 años BP, nuevo desecamiento del lago Huiñaimarca acompañado de un retroceso rápido de los glaciares;
- de 8 000 a 3 900 años BP, mejoramiento muy ligero de los balances en agua del Lago Huiñaimarca;
- de 3 900 años BP a ?, ascenso sensible de los niveles del Lago Huiñaimarca, sin embargo, con fases secas breves pero importantes;
- de ? a 0 años BP, la pequeña Edad de Hielo (morrena M4) y el período actual están marcados por una evolución conjunta de los lagos y de los glaciares.

Por regla general, parece que, en el conjunto del período pasado, las tendencias evolutivas de los lagos y de los glaciares han sido paralelas. Asimismo, habrá que considerar

las cuantificaciones de los paleobalances hidrológicos y climáticos (Hastenrath & Kutzbach, 1985; Kessler, 1988) ya que los niveles lacustres alcanzados durante el paroxismo de la fase Tauca fueron más importantes que los dados anteriormente (Servant & Fontes, 1978). Las nuevas evaluaciones deberán aproximarse a las estimaciones dadas por Grosjean (1994) para el extremo sur del Altiplano (salar de Atacama).

## Referencias citadas

- ARGOLLO, J., GOUZE, P., SALIEGE, J. F. & SERVANT, M., 1987 - Fluctuations des glaciers de Bolivie au Quaternaire récent. *Géodynamique*, 2(2): 103-104.
- BILLS, B.G., de SILVA, S.L., CURREY, D.R., EMERGER, R.S., LILLQUIST, K.D., DONNELLAN, A. & WORDEN, B., 1994 - Hydro-isostatic deflection and tectonic tilting in the central Andes: Initial results of a GPS survey of Lake Minchin shorelines. *Geophysical Research letters*, 21(4): 293-296.
- BOULANGÉ, B., VARGAS, C. & RODRIGO, L.A., 1981 - La sédimentation actuelle dans le lac Titicaca. *Revue d'Hydrobiologie tropicale*, 14(4): 299-309.
- BOWMAN, I., 1909 - The Physiography of the central Andes. *American Journal of Sciences*, 4(28): 373-402.
- CLAPPERTON, C.M., 1993a - *The Quaternary Geology and Geomorphology of South America*, 779p., Amsterdam: Elsevier.
- CLAPPERTON, C.M., 1993b - Glacier readvance in the Andes at 12,500-10,000 yr BP: implications for mechanism of late glacial climatic change. *Journal of Quaternary Science*, 8(3): 197-215.
- COLLOT, D., KORIYAMA, F. & GARCÍA, E., 1983 - Repartitions, biomasses et productions des macrophytes du lac Titicaca. *Revue d'Hydrobiologie tropicale*, 16(3): 241-261.
- CURTIS, J.H., HODELL, D. A., BRENNER, M. & BINFORD, M.W., 1993 - Little Ice Age Recorded in sediments from Lake Titicaca, Bolivia. in: *Eos, Fall meeting*: 118-119.
- FRANCOU, B., MOURGUIART, P. & FOURNIER, M., 1995 - Phase d'avancée des glaciers au Dryas récent dans les Andes du Pérou. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Paris*, 320, série IIa: 593-599.
- GOUZE, Ph., ARGOLLO, J., SALIEGE, J.F. & SERVANT, M., 1986 - Interprétation paléoclimatique des oscillations des glaciers au cours des 20 derniers millénaires dans les régions tropicales; exemple des Andes boliviennes. *Compte Rendu de l'Académie des Sciences Paris, série II*, 303(3): 219-224.
- GROSJEAN, M., 1994 - Paleohydrology of the laguna Lejía (north Chilean Altiplano) and climatic implication for late glacial times. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 109: 89-100.
- HANSEN, B.C.S., WRIGHT, H.E., Jr. & BRADBURY, J.P., 1984 - Pollen studies in the Junin area, central Peruvian Andes. *Bulletin of the Geological Society of America*, 95: 1454-1465.
- HASTENRATH, S. & KUTZBACH, J., 1985 - Late Pleistocene climate and water budget at 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 & A. Ilitis eds): 241-252, Monogr. Biol., 68, Kluwer Academic Publishers.
- KESSLER, A., 1988 - Die Schwankungen des Wasserhaushaltes de südamerikanischen Altiplano and las Weltklima. *Jahrbuch der Geographischen gesellschaft zu Hannover*: 139-159
- LAVENU, A., 1992 - Formation and geological evolution. in: *Lake Titicaca. A syntesis of limnological Knowledge* (C. Dejoux & A. Ilitis eds): 3-15, Monogr. Biol., 68, Kluwer Academic Publishers.
- MARKGRAF, V., 1993 - Climatic History of Central and South America since 18,000 yr B.P.: Comparison of Pollen Records and Model Simulaitons. in: *Global Climates since the Last Glacial Maximum* (H.E. Wright, Jr., J.E. Kutzbach, T. Webb III, W.F. Ruddiman, F.A. Street-Perrott & P.J. Bartlein eds.): 357-385, Minneapolis, London: University of Minnesota Press.
- 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, série II*, 315: 875-880.
- RIBSTEIN, P., TIRIAU, E., FRANCOU, B. & SARAVIA, R., 1995 - Tropical climate and glacier hydrology: a case study in Bolivia. *Journal of Hydrology*, 165: 221-234.
- 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. Iltis eds.): 63-68, Monogr. Biol., 68, Kluwer Academic Publishers.
- RODRIGO, L.A. & WIRRMANN, D., 1992 - General aspects of present day sedimentation. in: *Lake Titicaca. A synthesis of Limnological Knowledge* (C. Dejoux & A. Iltis eds): 23-28, Monogr. Biol., 68, Kluwer Academic Publishers.
- SELTZER, G.O., 1994 - A lacustrine record of late Pleistocene climatic change in the subtropical Andes. *Boreas*, 23: 105-111.
- 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.
- SERVANT, M. & FONTES, J.C., 1984 - Les basses terrasses fluviales du quaternaire récent des Andes boliviennes. Datations par le  $^{14}\text{C}$ . Interprétation paléoclimatique. *Cahiers ORSTOM, série Géologie*, 1(1): 15-28.
- SERVANT, M., FOURNIER, M., ARGOLLO, J., SERVANT-VILDARY, S., SILVESTRE, F., WIRRMANN, D. & YBERT, J.P., 1995 - La dernière transition glaciaire / interglaciaire des Andes tropicales sud (Bolivie) d'après l'étude des variations des niveaux lacustres et des fluctuations glaciaires. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences Paris, série IIa*, 320: 729-739.
- STEINMANN, G., HOK, H. & BISTRAM, A., 1904 - Zür Geologie des Suedestland Bolivien. *Zentralblatt für Mineralogie*, 5: 1-4.
- TALJAARD, J.J., 1972 - Synoptic meteorology of the southern hemisphere. in: *Meteorology of the Southern Hemisphere*, (Newton, C.W. ed.): 139-213, Meteorol. Monogr., 13.
- THOMPSON, L.G., MOSLEY-THOMPSON, E.P., DANSGAARD, W. & GROOTES, P.M., 1986 - The Little Ice Age as recorded in the stratigraphy of the Quelcaya ice cap. *Science*, 234: 361-364.
- 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* (Rabassa, J. ed.): 89-127, 6, Rotterdam: Balkema.
- WIRRMANN, D. & de OLIVEIRA ALMEIDA, L.F., 1987 - Low Holocene level (7 700 to 3 650 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. Iltis eds.): 40-48, Monogr. Bio., 68, Kluwer Academic Publishers.
- WRIGHT, H.E., Jr., KUTZBACH, J.E., WEBB III, T., RUDDIMAN, W.F., STREET-PERROTT, F.A. & BARTLEIN, P.J., (eds.), 1993 - *Global Climates since the Last Glacial Maximum*, 569p., Minneapolis, London: University of Minnesota Press.
- YBERT, J.P., 1992 - Ancient lake environments as deduced from pollen analysis. in: *Lake Titicaca. A Synthesis of Limnological Knowledge* (C. Dejoux & A. Iltis eds.): 49-60, Monogr. Biol., 86, Kluwer Academic Publishers.