

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 ¹⁴C, 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^{ème}-19^{ème} siècles), des conditions froides et humides prévalent.

Mots-clés : *Paléoclimats, Lacs, Glaciers, Âges ¹⁴C, 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, ¹⁴C 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.).

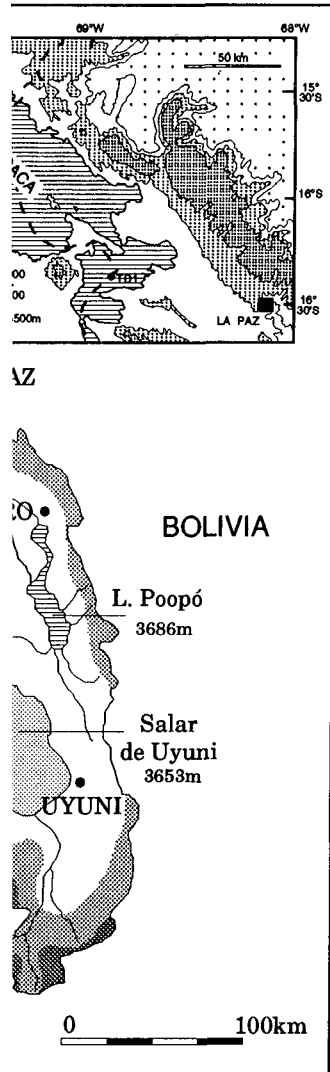
El Altiplano (altiplanicies enmarcadas por dos cordilleras montañosas de los Andes) forma parte de las zonas más antiguamente estudiadas (Steinmann *et al.*, 1904; Bowman, 1909; Servant & Fontes, 1978). Estos autores diferenciaron así 3 grandes extensiones lacustres (Ballivián, Minchin y Tauca) puestas 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.



el Altiplano. Localización de los sondeos y os.

a alternancia de depósitos, generalmente ncas del Altiplano. Los sedimentos son s, limosos a arenosos incluso pedregosos arbonatados de origen biogénico... Esta uy diferentes. En particular los cambios onaron precipitaciones de yeso hace (Wirrmann & Oliveira Almeida, 1987) o, a 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

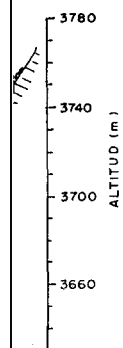
meses de verano austral de diciembre a marzo. Los vientos del sector Este y la anomalía térmica caliente que constituye el Altiplano en esta estación favorecen las penetraciones frecuentes del aire húmedo proveniente de la Amazonía. Esto ocasiona precipitaciones de carácter tempestuoso, cada vez más 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).

ferentes,
perímetro
l salar de
mente en
vegetales
noluscos,

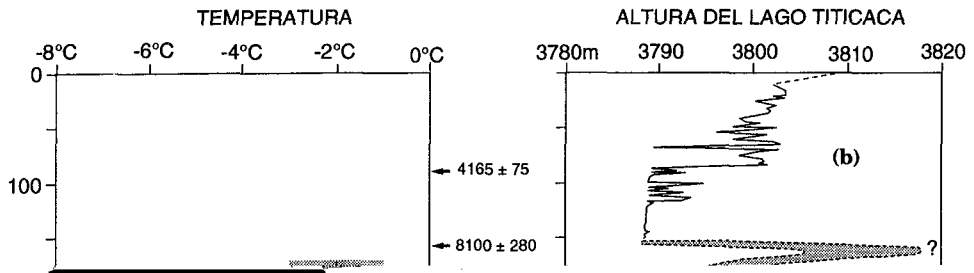


Holoceno

iferentes
mitieron
áximas y
diente al
osterior.

Dos tipos
peratura
olutivas
atorio de
mann &

istres. El
ores que
nosférica



unción de
85 cm, los
ecozona.
ñaimarca;
lios secos,
tiart *et al.*,

reconstruir
strácodos
a muestra
vel actual

es fueron
moluscos,
eservorio;
timas. No
rden de 4
al., 1993).



16 000

latos de
tmo
exto para

ir la evolución de los
n mínimo, ya que los
en alturas de agua
era (Bills *et al.*, 1994;
(Servant *et al.*, 1995;
C fueron obtenidas en
hidrológico actual del
e de la transparencia
lago Chucuito, hasta
et al., 1983; Iltis &
a para la evolución de
ndidad de 15-17 m

que habían supuesto
es por los paleolagos
mbién más elevados.
años BP (no tomamos
or Servant *et al.*, 1995,
e este acontecimiento
e balance hídrico.

en conservados en la
pos de morrenas. La
n material orgánico
5).

ente a 20 km de los
o es imprecisa pero

damente 2-3 km río
os valles, el avance
depósitos anteriores
ste acontecimiento.
Centrales como el
, 1987; Clapperton,

yoría de los valles,
10 km río abajo de
rena no es conocida

teriores (2-3 km río
BP. Existen fuertes
alizado en Perú, es

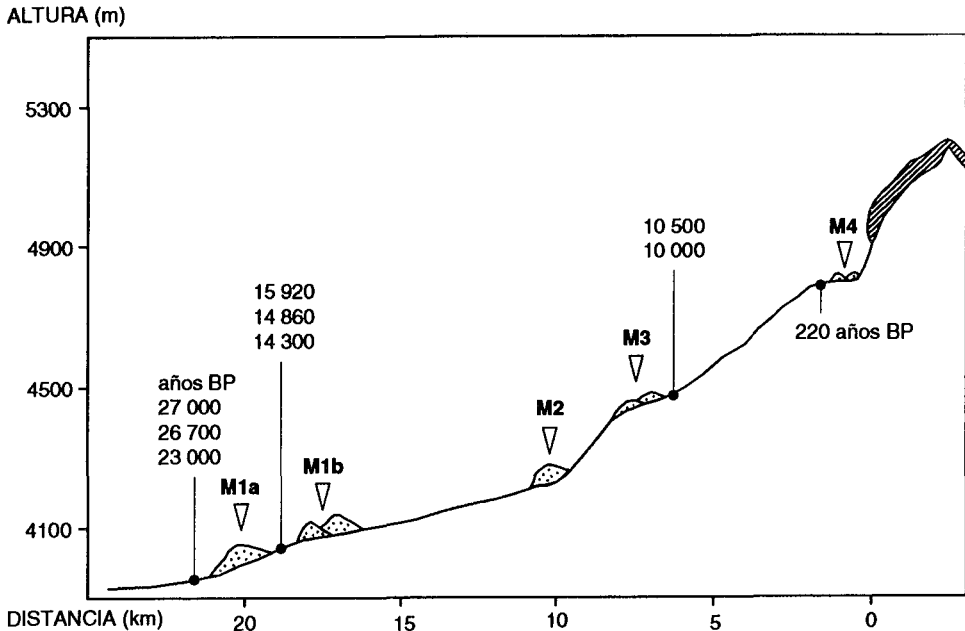


Fig. 5 - Diagrama sintético indicando la posición de morrenas en relación con el frente del glaciar actual y su edad estimada (según datos publicados por Gouze *et al.*, 1986 e inéditos). Las distancias sólo son dadas a modo indicativo.

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}C fueron obtenidas en material carbonatado y en materia orgánica de diversos orígenes; las edades deducidas no son forzosamente compatibles entre ellas;

ARGUIART

id de los
e "Tauca"
os Poopó,
a del lago
legítimo
y 10 500
uesta por
cimientos
Oriental
historias
ntado por
ilaciones
urante la
daban de
s del sur)
datos no
partir de
o (año El
nte.

y 5), del
compleja

aimarca;
izada en
; avance

le, ni al

avances

aimarca

en agua

aimarca,

o actual
aciares.

ndencias
onsiderar

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

Referencias citadas

- COHEN, J., GOUZE, P., SALIEGE, J. F. & SERVANT, M., 1987 - Fluctuations des glaciers de Bolivie au Quaternaire récent. *Géodynamique*, 2(2): 103-104.
- COHEN, J., de SILVA, S.L., CURREY, D.R., EMERGER, R.S., LILLQUIST, K.D., DONNELLAN, A. & FLORES, J., 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.
- COHEN, J., GÉ, B., VARGAS, C. & RODRIGO, L.A., 1981 - La sédimentation actuelle dans le lac Titicaca. *Revue d'Hydrobiologie tropicale*, 14(4): 299-309.
- COHEN, J., 1909 - The Physiography of the central Andes. *American Journal of Sciences*, 4(28): 373-402.
- COHEN, J., 1993a - *The Quaternary Geology and Geomorphology of South America*, 779p., Amsterdam: Elsevier.
- COHEN, J., 1993b - Glacier readvance in the Andes at 12,500-10,000 yr BP: implications for the mechanism of late glacial climatic change. *Journal of Quaternary Science*, 8(3): 197-215.
- COHEN, J., KORIYAMA, F. & GARCÍA, E., 1983 - Repartitions, biomasses et productions des acrophytes du lac Titicaca. *Revue d'Hydrobiologie tropicale*, 16(3): 241-261.
- COHEN, J., 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.
- COHEN, J., 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.
- COHEN, J., 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.
- COHEN, J., 1994 - Paleohydrology of the laguna Lejía (north Chilean Altiplano) and climatic implication for late glacial times. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 109: 89-100.
- COHEN, J., 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.
- COHEN, J., RATH, S. & KUTZBACH, J., 1985 - Late Pleistocene climate and water budget at the South American altiplano. *Quaternary Research*, 24: 249-256.
- COHEN, J. & MOURGUIART, P., 1992 - Higher plants: Distribution and biomass. *in: Lake Titicaca. A synthesis of Limnological Knowledge* (C. Dejoux & A. Iltis eds): 241-252, Monogr. Biol., 68, Kluwer Academic Publishers.
- COHEN, J., 1988 - Die Schwankungen des Wasserhaushaltes de südamerikanischen Altiplano and das eltklima. *Jahrbuch der Geographischen gesellschaft zu Hannover*: 139-159
- COHEN, J., 1992 - Formation and geological evolution. *in: Lake Titicaca. A synthesis of limnological knowledge* (C. Dejoux & A. Iltis eds): 3-15, Monogr. Biol., 68, Kluwer Academic Publishers.
- COHEN, J., AF, V., 1993 - Climatic History of Central and South America since 18,000 yr B.P.: Comparison of Pollen Records and Model Simulations. *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.): 7-385, Minneapolis, London: University of Minnesota Press.
- COHEN, J., FIART, P. & CARBONEL, P., 1994 - A quantitative method of palaeolake-level reconstructions using ostracod assemblages: an example from the Bolivian Altiplano. *Hydrobiologia*, 288: 183-193.
- COHEN, J., FIART, 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 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}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.