

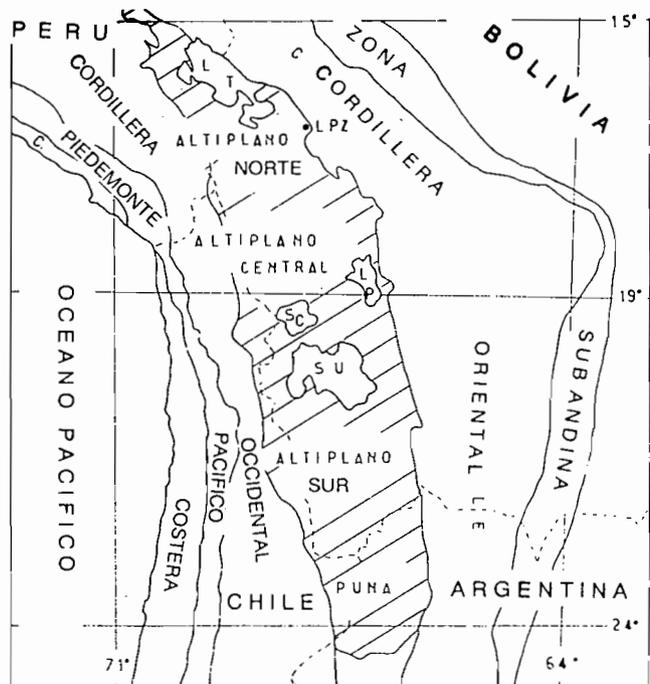
I.1 Formación geológica y evolución

ALAIN LAVENU

El Altiplano es una gran cuenca intramontañosa de los Andes centrales del Perú, de Bolivia y Argentina, situada entre las Cordilleras Occidental y Oriental (fig. 1). Se extiende sobre 2.000 km de largo y 200 km de ancho aproximadamente, a una altitud variando de 3.700 a 4.600 metros. Su drenaje es endorreico. El norte y el centro del Altiplano están ocupados por dos grandes lagos permanentes : los lagos Titicaca y Poopó. La parte sud es más árida ; es el dominio de los "salares"* : Coipasa, Uyuni.

Desde principios del Cuaternario, el Altiplano ha sido ocupado por lagos que no han tenido siempre la extensión de los lagos actuales. El estudio de los sedimentos lacustres antiguos permite reconstituir la historia de esta cuenca (MOON, 1939; NEWELL, 1949; AHLFELD y BRANISA, 1960).

Fig. 1. - Localización del Altiplano en la Cordillera de los Andes centrales (según LAVENU *et al.*, 1984). C : Cochabamba ; CR : Crucero ; LP : Lago Poopó ; LPZ : La Paz ; LT : Lago Titicaca ; SC : salar de Coipasa ; SU : salar de Uyuni.



Mientras que el Plioceno se caracteriza por depósitos fluviales y lacustres correspondiendo a un medio relativamente caliente, el paso al Cuaternario es marcado por un cambio climático importante. El clima sufre un brusco enfriamiento y aparecen glaciaciones hacia 3 millones de años (3 Ma). Se desarrollan durante el Cuaternario y este cambio climático ocasiona modificaciones profundas en el tipo de los depósitos. En efecto, los sedimentos del Cuaternario del Altiplano se presentan bajo facies particulares de altitud : glaciares e interglaciares en las cordilleras y en el piedemonte, fluviales hasta torrenciales en el piedemonte y en la altiplanicie, lacustres hasta evaporíticos en el centro de la cuenca.

El estudio de estos paleolagos y el que fue realizado sobre los estados glaciares principales de la Cordillera Oriental han permitido establecer relaciones entre las tres formaciones lacustres y los tres estados de recesión glaciaria más recientes (SERVANT, 1977 ; SERVANT y FONTES, 1978) (fig. 2). Más recientemente el descubrimiento en el norte del Altiplano de dos episodios lacustres antiguos ha permitido establecer las mismas relaciones entre estos niveles lacustres y las dos primeras glaciaciones cuaternarias (LAVENU *et al.*, 1984) (fig. 3).

* Extensas costras de sal más o menos espesas, ocupando el fondo de depresiones, pudiendo estar, localmente o episódicamente, cubiertas por una delgada capa de agua.

ORSTOM Fonds Documentaire

N° : 36604, ex 2

Cote : A

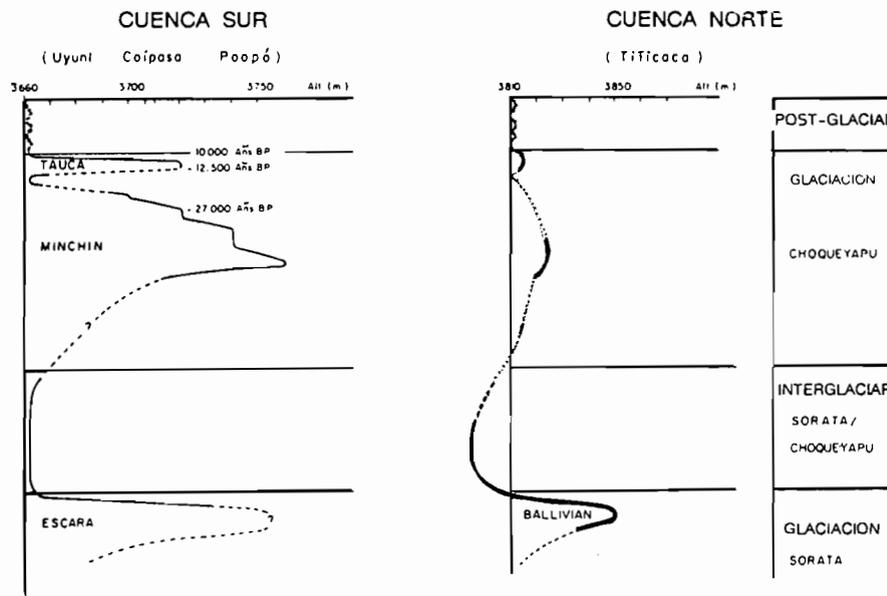


Fig. 2. - Correlaciones entre las formaciones glaciares y lacustres del Pleistoceno del norte del Altiplano (según SERVANT y FONTES, 1978).

| EDAD (Ma)* | EPOCA | SUPERFICIES | EVENTOS LACUSTRES | EVENTOS GLACIAR E INTERGLACIAR | EVENTOS TECTONICOS |
|------------|----------------------|-------------|---|------------------------------------|----------------------------------|
| 0.01 | ACTUAL | 10 | TITICACA | Morenas | |
| | HOLOCENO | 11 | TAUCA | CHOQUEYAPU II | |
| | PLEISTOCENO SUPERIOR | 12 | MINCHIN | CHOQUEYAPU I | |
| 0.5 | | 13 | BALLIVIAN (ULLOMAF.) | SORATA | EXTENSION N S |
| 1.6 | PLEISTOCENO INFERIOR | 54 | CABANA | KALUYO | |
| | | 55 | MATARO | Purapurani F. (1.6 Ma) CALVARIO | |
| | PLIOCENO | 56 | FORMACION tuff Chijini (2.8 Ma) LA PAZ | PATAPATANI | COMPRESION N S COMPRESION E W |

* según Berggren et al., 1985

Fig. 3. - Relaciones estratigráficas, morfológicas y tectónicas durante el Pleistoceno.

Así, las extensiones lacustres máximas corresponden al final de una glaciación o de un estado glaciario y se deben al deshielo de los glaciares (SERVANT y FONTES, 1978). Las discontinuidades entre los diferentes estados están marcadas por superficies de ablación que corresponden al final de la evolución morfológica de cada estado interglaciario.

El Cuaternario es posterior a una superficie de ablación poligénica S6 cuya evolución es compleja. En el piedemonte de la Cordillera Oriental, es posterior a un nivel volcánico (tuf Chijini) datado en 2.8 Ma (LAVENU et al., 1989).

La extensión y los límites de estas capas de agua están directamente ligadas a las modificaciones climáticas y a la tectónica. Por estas razones, se constata que los diferentes depósitos lacustres no están superpuestos sino encajonados unos dentro de los otros. El estudio de los niveles lacustres se hará según el orden cronológico, del más antiguo al más reciente.

El Pleistoceno antiguo

La existencia de los dos niveles lacustres más antiguos está claramente demostrada al noroeste del lago Titicaca, tanto en el Perú como en Bolivia (LAVENU *et al.*, 1984). Los afloramientos están marcados por depósitos gruesos (torrenciales y fluviales) al pie de los márgenes de la cuenca y por depósitos finos (lacustres) hacia el centro de la cuenca.

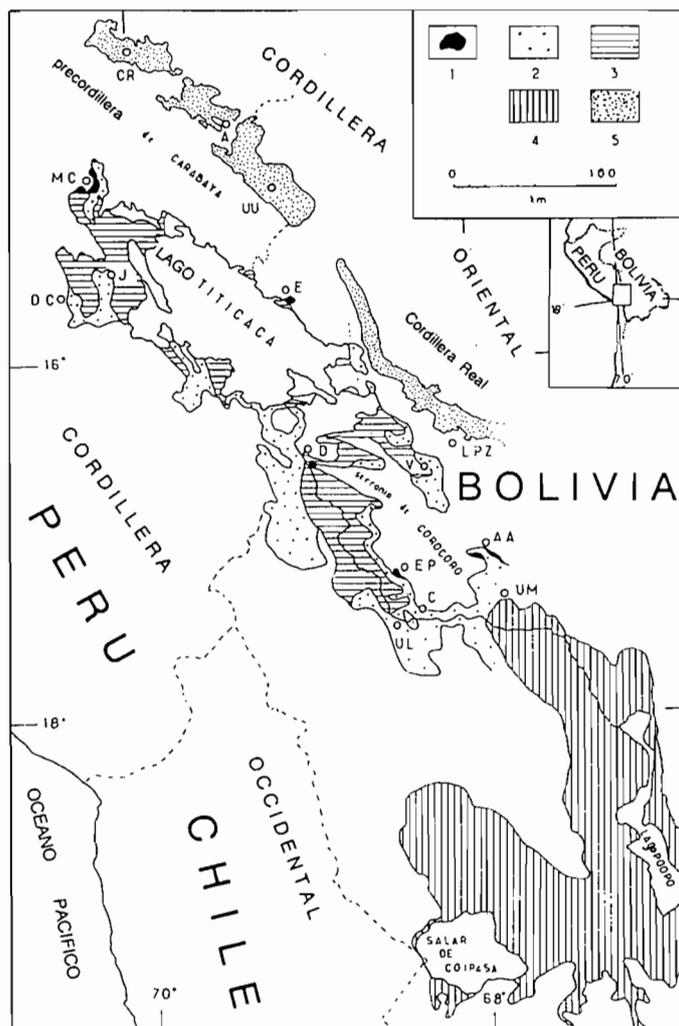


Fig. 4. - Las extensiones lacustres en el norte y el centro del Altiplano (según LAVENU *et al.*, 1984).
 1 : lago Mataro; 2 : lago Cabana; 3 : lago Ballivián (formaciones Ulloma y Azángaro); 4 : lago Minchín; 5 : Formaciones glaciares y fluvio-glaciares del piedemonte de la Cordillera Oriental. A : Ananea; AA : Ayo Ayo; C : Callapa; CR : Crucero; D : Desaguadero; DC : Deustua-Cabana; E : Escoma; EP : Estación Pando; J : Juliaca; LPZ : La Paz; MC : Mataro Chico; UL : Ulloma; UM : Umala; UU : Ulla Ulla; V : Viacha. Los lagos Escara y Tauca no fueron representados. En las regiones del lago Poopó y del salar de Coipasa, los límites del lago Tauca están incluidos en los límites del lago Minchín. En el norte, los límites de los lagos Minchín y Tauca son sensiblemente los mismos que los del lago Titicaca actual.

El depósito más antiguo, llamado Mataro (fig. 4), se presenta bajo la forma de una serie detrítica fluvial mostrando una alternancia de bancos arcillo-arenosos de color ocre y de arenas y gravas. La serie, incompleta, aflora sobre aproximadamente 50 metros de espesor. Un asta de cérvido fósil indica una edad cuaternaria indiferenciada. La cima del nivel Mataro corresponde a una superficie de ablación que se desarrolla a una altitud actual de 3.950 metros alrededor de la paleo-cuenca (superficie S5) (fig. 5). Este lago posee su máximo de extensión después de la glaciación Calvario (DOBROVOLNY, 1962) posterior a 2.8 Ma (LAVENU *et al.*, 1989). Es el equivalente de la Formación Purapurani de la cuenca de La Paz, datada del Pleistoceno inferior a 1.6 Ma (LAVENU *et al.*; 1989) y el equivalente de los sedimentos del Pleistoceno inferior de Ayo Ayo, más al sur (HOFFSTETTER *et al.*, 1971).

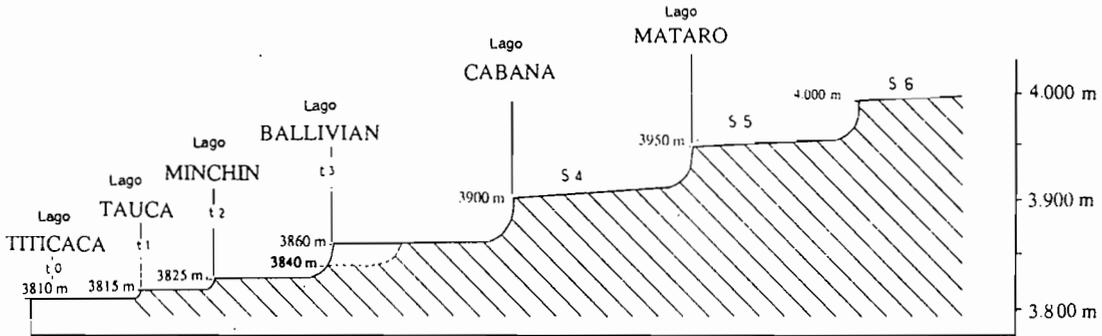


Fig. 5. - Encajonamiento de los diferentes niveles lacustres en el norte del Altiplano (según LAVENU *et al.*, 1984).

La unidad Cabana, que se forma después de la glaciación Kaluyo (SERVANT, 1977) se encajona en la serie precedente. Este encajonamiento muestra que la capa de agua Cabana tiene una superficie y un volumen reducidos con relación a lo anterior. Los depósitos lacustres, que aún poseen indicios, fluviales, afloran sobre unos cincuenta metros de espesor.

Esta unidad está recortada por la superficie S4 que se encuentra a una altitud de 3.900 metros.

Generalmente, en el piedemonte y en la Cordillera, las superficies S5 y S4 dominan de varias decenas de metros el fondo de los valles de los ríos actuales. La existencia de estas dos superficies, en el norte y el centro del Altiplano, permite pensar que el paso Ulloma-Callapa, gollizo entallado por el río Desaguadero, no debía existir en el Pleistoceno inferior : los dos lagos Mataro, luego Cabana, solamente formaban un solo plano de agua en el Altiplano (fig. 6).

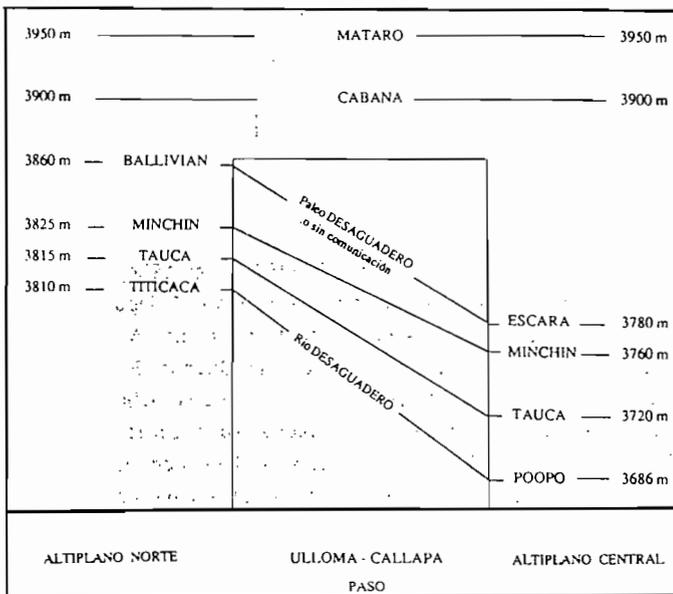


Fig. 6. - Comunicaciones entre las cuencas norte y centro-sur a nivel del paso Ulloma (según LAVENU *et al.*, 1984).

El Pleistoceno superior

Posteriormente a la glaciación Sorata, los niveles lacustres del lago Ballivián (Formación Ulloma en Bolivia, Formación Azángaro en el Perú) (BOWMAN, 1909) se encajonan en los depósitos Cabana.

Estos depósitos son muy fosilíferos y recientes trabajos permiten atribuirles una edad Pleistocena antigua, Ensenadense o Lujanense inferior en la cronología sudamericana (HOFFSTETTER, 1986 ; MARSHALL *et al.*, 1991 ; MARSHALL y SALINAS, 1991). Una fauna comparable existe en la cuenca de Tarija, en el sud de Bolivia, donde un nivel volcánico dió una edad Ensenadense de 0.7 Ma (McFADDEN *et al.*, 1983). Los sedimentos del lago Ballivián corresponden a un plano de agua situado a 3.860 metros de altitud actual. Al pie de los relieves y en las cordilleras, las superficies de ablación que le corresponden, pasan a terrazas aluviales (t3) donde están ampliamente desarrolladas. Estas terrazas se encuentran generalmente a 5 ó 6 metros por encima de los ríos actuales.

Alrededor del lago Titicaca, algunos índices de terrazas lacustres a una altitud de 3.840 metros podrían corresponder a un episodio postglaciar de un primer estado Choqueyapu.

En el sud del Altiplano, los niveles lacustres de la Formación Escara pueden corresponder a los del lago Ballivián (SERVANT, 1977). Estos niveles están a una altitud actual más baja (3.780 metros) y demuestran la existencia del paso Ulloma-Callapa.

La cima del Pleistoceno está marcada por los depósitos del lago Minchín que se encajonan en los sedimentos del lago Ballivián. Este plano de agua se caracteriza por una superficie de ablación y por terrazas (t2) situadas a 3.825 metros de altitud, entre 10 y 15 metros por encima del nivel actual del lago Titicaca. Estas terrazas del Altiplano corresponden, río arriba, a terrazas aluviales, situadas 3 a 4 metros por encima de los ríos actuales.

Este lago, dividido en dos capas de agua por el paso Ulloma-Callapa, es muy reducido en el norte del Altiplano, mientras que su extensión es aún grande en el sur. Fósiles incompletos, permiten asignarle una edad Lujanense indiferenciada (LAVENU, 1984 ; MARSHALL y SEMPERE, 1991 ; MARSHALL *et al.*, 1991). En el sur, una terraza lacustre intermediaria ha sido datada a 27.000 años BP (SERVANT y FONTES, 1978).

El Holoceno

El Holoceno del Altiplano está caracterizado por el lago Tauca (SERVANT, 1977). Está también dividido en dos capas de agua por el paso Ulloma-Callapa. Su superficie ha sido reducida con relación al lago Minchín (STEINMANN, 1929). En los alrededores de este paleolago, se nota la presencia de terrazas aluviales bajas, turbosas, sobre el conjunto del Altiplano y en las cordilleras. Es el sistema t1 ; se sitúa a un metro por encima de los talwegs. En el centro del Altiplano, SERVANT y FONTES (1978) le asignan una edad comprendida entre 12.500 y 10.000 años B.P.

Los lagos Minchín y Tauca están ligados a los deshielos de los glaciares de la glaciación Choqueyapu que consta de dos estados principales (TROLL, 1927; TROLL y FINSTERWALDER), Choqueyapu I antes de Minchín y Choqueyapu II antes de Tauca.

El lago Tauca se ha estabilizado a 5 metros por encima del nivel del lago Titicaca actual. En el norte del Altiplano, se encontraba a una altitud de 3.815 metros, y a una altitud de 3.720 metros en el sur. La superficie del lago puede estimarse a aproximadamente 52.000 km² mínimo. SERVANT y FONTES (1978) le atribuyen 43.000 km² en el sud del Altiplano y en el norte, al emplazamiento del Titicaca, la capa de agua Tauca debía ocupar 9.000 km² aproximadamente. Estas capas de agua se redujeron y, actualmente, sólo queda el lago Titicaca (8.560 km²) a 3.810 metros de altitud en el norte del Altiplano, el lago Poopó (3.686 m) en el centro y los "salares" (3.650 m) en el sur. Al mismo tiempo, los glaciares disminuyeron también de volumen y de superficie.

La Neotectónica

En el Plioceno, la Cordillera de los Andes adquirió prácticamente su altitud actual. Entre 2 y 3 Ma, los depósitos de edad pliocena superior fueron afectados por una tectónica en compresión. Este acortamiento, de dirección NE-SW a E-W, es responsable de pliegues y de fallas inversas (LAVENU, 1988 ; LAVENU y MERCIER, 1991). En el Cuaternario antiguo, una segunda deformación

compresiva, menor, afecta los depósitos de edad pliocena superior a cuaternaria antigua. Corresponde a fallas inversas resultando de un acortamiento N-S.

Posteriormente a estos eventos compresivos, el Altiplano y sobre todo los piedemontes de las Cordilleras Occidental y Oriental, son afectados por una tectónica en extensión de dirección N-S a N20°E. Esta deformación, que interesa a todo el Cuaternario hasta el período actual, se debe a un efecto de alta topografía. Este estado de tensión particular está descrito en los Andes centrales del Perú por SEBRIER *et al.* (1985).

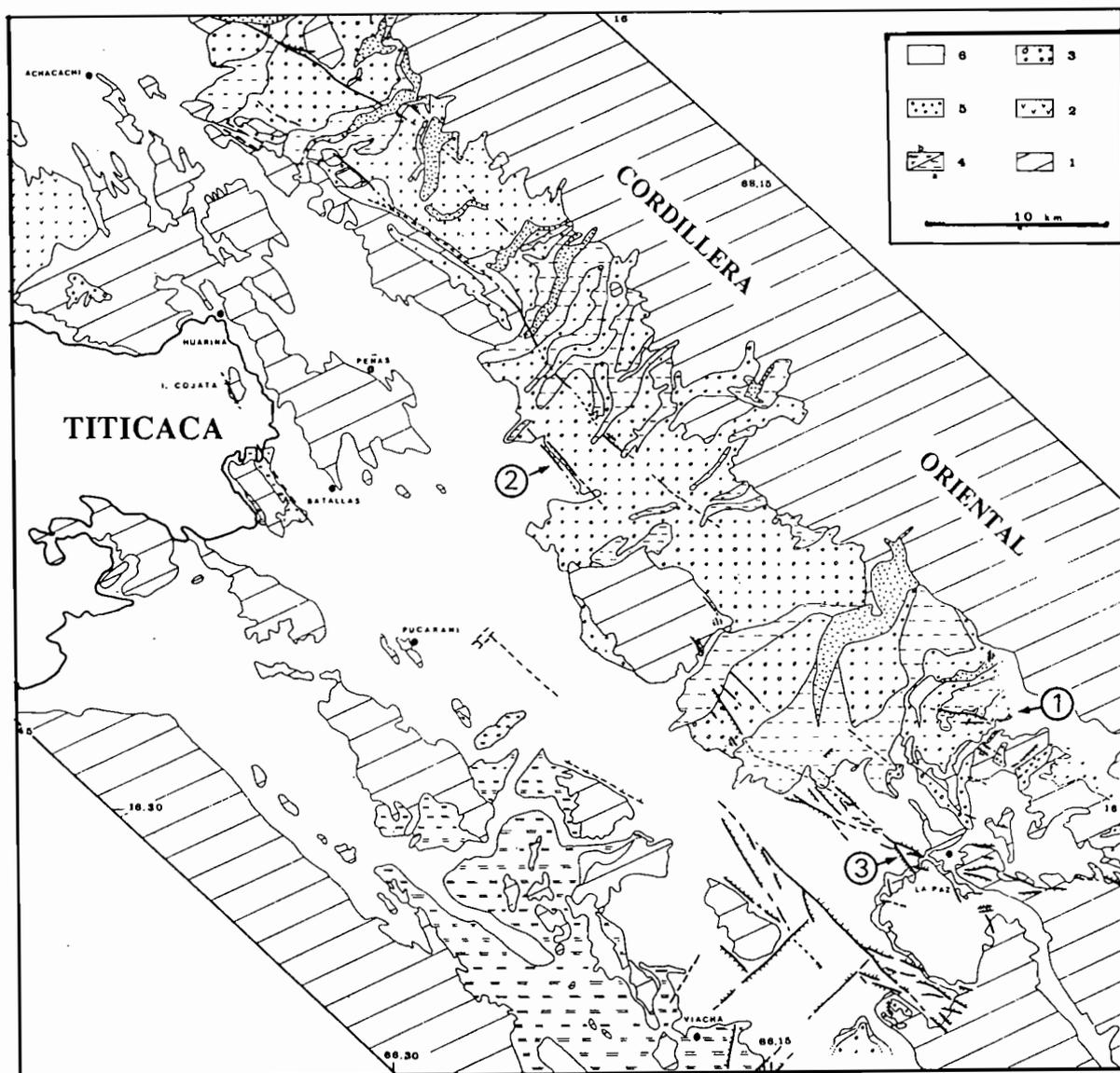


Fig. 7. - Esquema estructural del piedemonte de la Cordillera Oriental entre La Paz y el lago Titicaca (según LAVENU, 1981). 1 : formaciones indiferenciadas ante-Pleistoceno; 2 : volcanismo cuaternario; 3 : formaciones glaciares ante Sorata; 4 : (a) morenas Sorata, (b) Formación Ulloma; 5 : morenas Choqueyapu; 6 : Cuaternario reciente.

Estas deformaciones frágiles son la causa de una importante fracturación de la cuenca plio-cuaternaria entre el lago Titicaca y La Paz. Las fallas normales tienen una dirección WNW-ESE a NW-SE (fig. 7).

Después de la elaboración de las superficies S6 y S5 y la acumulación de los depósitos interglaciares Purapurani datados a 1.6 Ma (LAVENU *et al.*, 1989), la deformación en extensión de dirección N-S afecta los depósitos pleistocenos antiguos (fig. 8). En la región de La Paz, observaciones de campo permiten evidenciar un primer período de extensión pleistoceno (ante S6 o S5). En La Paz, el rechazo vertical de algunas fallas normales, de dirección N125°E, alcanza 400 metros (fig. 9 ; puntos 1 y 2 en la fig. 7). Sucede lo mismo en la orilla del lago, al oeste de Huarina, al pie de la Cordillera Oriental, donde los depósitos de edad pliocena son llevados a altitudes anormalmente elevadas. En la orilla nordeste del lago, en Escoma, la superficie S4 está situada a altitudes comprendidas entre 3.900 y 3.960 metros (fig. 10). Los desniveles, respectivamente de 200 metros entre S5 y S4 y de 100 metros entre S5 y S6 son, aquí también, anormalmente fuertes comparados a los del centro del Altiplano donde sólo alcanzan 50 metros.

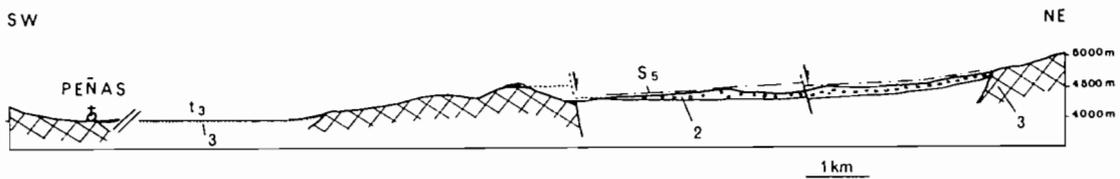


Fig. 8. - Corte del piedemonte de la Cordillera Oriental al nordeste de Peñas. Fallas cuaternarias con rechazo hectométrico (según LAVENU, 1981). 1 : formaciones indiferenciadas ante-Pleistoceno; 2 : formaciones del Pleistoceno antiguo; 3 : Cuaternario reciente.

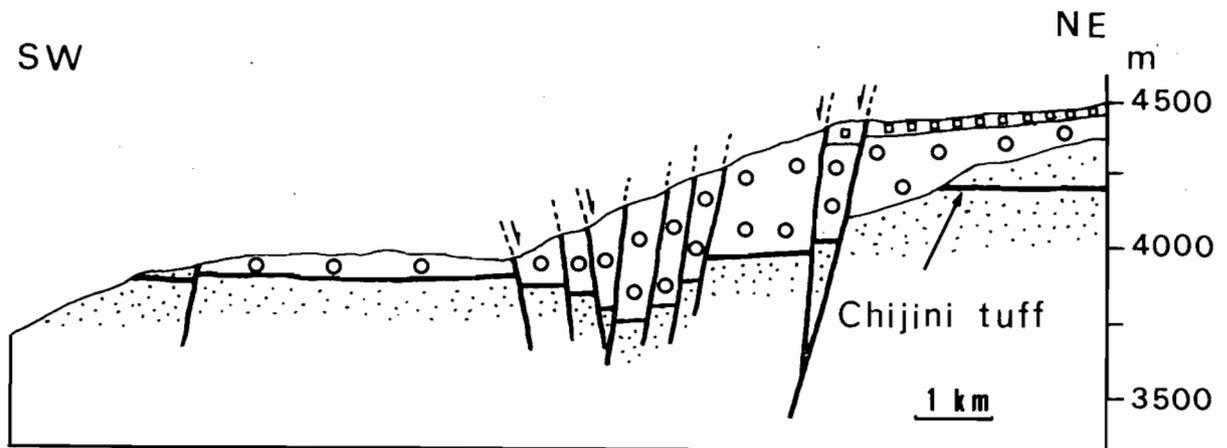


Fig. 9. - Corte de la Quebrada Minasa (punto 1, fig. 7) (según LAVENU, 1988).

Así, al pie de la Cordillera Oriental, antes del desarrollo de S4, se produce una deformación tectónica en extensión que provoca el levantamiento relativo de la Cordillera con relación al Altiplano. Esta deformación en extensión facilita, por hundimiento, la instalación de los lagos Mataro y Cabana. Es ciertamente en esta época que se crea realmente la fosa donde se encontrará el lago Titicaca, el punto más bajo del Altiplano. La profundidad del lago actual alcanza 284 metros cerca de la isla Soto en el Perú (BOULANGE y AQUIZE, 1981).

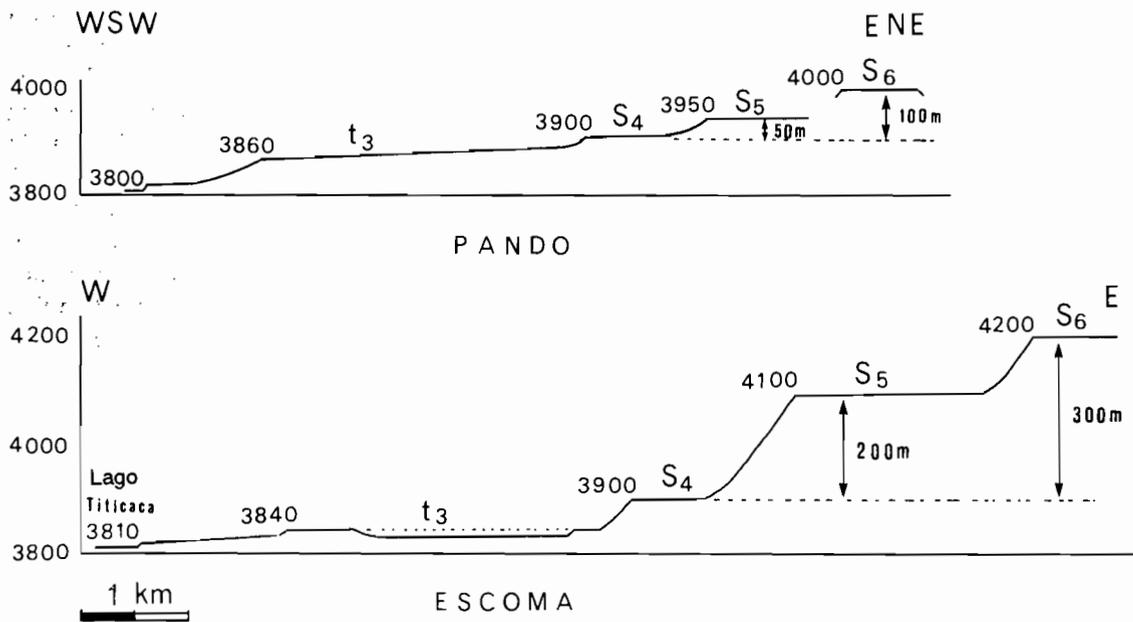


Fig. 10. - Encajonamiento de las superficies de ablación en el centro del Altiplano (Pando) y en la orilla oriental del lago Titicaca (Escoma) (según LAVENU *et al.*, 1984).

Una nueva deformación tectónica en extensión afecta la superficie S4. En la Cordillera Oriental, las morenas de la glaciación Sorata entallan profundamente los valles, otro indicio del levantamiento relativo de la Cordillera con relación al Altiplano.

Las deformaciones en extensión del Pleistoceno superior y del Holoceno son más débiles y los rechazos morfológicos menos importantes. Sin embargo, numerosos indicios muestran que esta extensión N-S es continua: en Llojeta (punto 3 en la fig. 7) la superficie S3 que representa la superficie topográfica del Altiplano está decalada verticalmente de cerca de un metro; al este de Peñas, las morenas Choqueyapu están recortadas por fallas normales; en la isla Cojata, el lacustre Minchín llega, por falla, a más de 17 metros por encima del nivel actual del lago.

Conclusión

El sistema lacustre actual del Altiplano es el resultado de la evolución de un sistema más antiguo que comienza desde el Pleistoceno inferior con la transición, al fin del Plioceno, de un clima relativamente caliente a un clima frío y húmedo.

La existencia y el tamaño de los lagos están directamente ligados a la recesión de los glaciares a principio de los períodos interglaciares. Como para los glaciares, la superficie de las capas lacustres sucesivas disminuye considerablemente en el transcurso del Cuaternario.

Deformaciones tectónicas plio-cuaternarias fracturan el piedemonte de la Cordillera. Una actividad neotectónica en extensión, de dirección N-S, caracteriza todo el Cuaternario. Es en el Pleistoceno inferior, posteriormente al lago Cabana y antes del lago Ballivián, que se crea la fosa tectónica que va a ser ocupada por el lago Titicaca actual.

Referencias

- AHLFELD (F.), BRANISA (L.), 1960. – Geología de Bolivia. Instituto Boliviano del Petróleo. Ed. Don Bosco, La Paz, 245 p.
- BERGGREN (W.A.), KENT (D.V.), FLYNN (J.J.), 1985. – Cenozoic geochronology. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 96 : 1407–1418.
- BOWMAN (I.), 1909. – Physiography of the Central Andes. *Amer. Journ. Sci.*, ser. 4–28, 197–217 : 373–402.
- DOBROVOLNY (E.), 1962. – Geología del valle de La Paz. Departamento Nacional de Geología, Bolivia, 3 : 153 p.
- HOFFSTETTER (R.), 1986. – High Andean mammalian faunas during the Plio–Pleistocene. In : High altitude tropical biogeography, Vuilleumier and Monasterio eds., Oxford Univ. Press : 278–345.
- HOFFSTETTER (R.), MARTINEZ (C.), MUÑOZ-REYES (J.), TOMASI (P.), 1971. – Le gisement d'Ayo-Ayo (Bolivie), une succession stratigraphique Pliocène–Pléistocène datée par des mammifères. *C. R. Acad. Sciences, Paris*, 273 : 2472–2475.
- LAVENU (A.), 1984. – Age pliocène de la Formation Remedios dans l'Altiplano bolivien. Caractères de la tectonique Pliocène. *C. R. Acad. Sciences, Paris*, 299 : 1051–1054.
- LAVENU (A.), 1988. – Etude tectonique et néotectonique de l'Altiplano et de la Cordillère Orientale des Andes boliviennes. *Travaux et Documents Microfichés, ORSTOM, Paris*, 28 : 420 p.
- LAVENU (A.), BONHOMME (M.G.), VATIN-PERIGON (N.), DEPACHTERE (P.), 1989. – Neogene magmatism in the Bolivian Andes between 16°S and 18°S : Stratigraphy and K/Ar geochronology. *Journal of South American Earth Sciences*, 2 (1) : 35–47.
- LAVENU (A.), FORNARI (M.), SEBRIER (M.), 1984. – Existence de deux nouveaux épisodes lacustres quaternaires dans l'Altiplano péruvo-bolivien. *Cah. ORSTOM, sér. Géol.*, 14 (1) : 103–114.
- McFADDEN (B.J.), SILES (O.), ZEITLER (P.), JOHNSON (N.M.), CAMPBELL (K.E. Jr.), 1983. – Magnetic polarity stratigraphy of the Middle Pleistocene (Ensenadan) Tarija Formation of Southern Bolivia. *Quat. Res.*, 19 : 172–187.
- MARSHALL (L.G.), SALINAS (P.), 1991. – The Lorenzo Sundt collection of Pleistocene mammals from Ulloma, Bolivia in the Museo Nacional de Historia Natural, Santiago, Chile (in press).
- MARSHALL (L.G.), SEMPERE (T.), 1991. – The Eocene to Pleistocene vertebrates of Bolivia and their stratigraphic context : a review (in press).
- MARSHALL (L.G.), SWISHER (C.), LAVENU (A.), HOFFSTETTER (R.), CURTIS (G.), 1991. – Geochronology of the mammal-bearing Late Cenozoic on the northern Altiplano, Bolivia. *Journal of Geology* (in press).
- MOON (H.P.), 1939. – 3. The geology and physiography at the Altiplano of Peru and Bolivia. In : The Percy Sladen Trust Expedition to Lake Titicaca in 1937. *Trans. Linn. Soc. London*, ser. 3, 1 (1) : 27–43.
- NEWELL (N.D.), 1945. – Geology of the Lake Titicaca region. Geological Society of America, Mem. 36, 111 p.
- SEBRIER (M.), MERCIER (J.L.), MEGARD (F.), LAUBACHER (G.), CAREY-GAILHARDIS (E.), 1985. – Quaternary normal and reverse faulting and the state of stress in the Central Peru. *Tectonics*, 4 (7) : 739–780.
- SERVANT (M.), 1977. – Le cadre stratigraphique du Plio–Quaternaire de l'Altiplano des Andes tropicales en Bolivie. *Bulletin AFEQ, Recherches françaises sur le Quaternaire, INQUA*, 1, 50 : 323–327.
- SERVANT (M.), FONTES (J.C.), 1978. – Les lacs quaternaires des hauts plateaux des Andes boliviennes. Premières interprétations paléoclimatiques. *Cah. ORSTOM, sér. Géol.*, 10 (1) : 9–23.
- STEINMANN (G.), 1929. – Geologie von Peru. Karl Winter, Heidelberg, 448 p.
- TROLL (C.), 1927. – Forschungsreisen in den zentralen Anden von Bolivia und Peru. *Peterm. Mitt.*, 73 : 41–43 ; 218–222.
- TROLL (C.), FINSTERWALDER (R.), 1935. – Die Karten der Cordillera Real und des Talkessels von La Paz. *Peterm. Mitt.*, 81 : 393–399 ; 454–455.