

ORSTOM BOLIVIA

INFORME N° 47

Noviembre 1995

## CONVENIO ORSTOM - UMSA



ACTIVIDADES REALIZADAS EN EL MARCO DEL  
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES GEOLOGICAS

compilación por  
Michel Fornari  
Co-Director

*Es verdaderamente satisfactorio hacer referencia a los múltiples convenios de cooperación que ha recibido Bolivia de países amigos; sin embargo Francia a través de ORSTOM (L'Institut de recherche scientifique pour le développement en coopération) merece sin duda, gran relevancia.*

*Fueron más de dos décadas, desde el arribo del Doctor Michel Servant, primer Coordinador del Convenio, durante las cuales pasaron por nuestro país connotados Científicos Franceses, que en comunión y equipo con profesionales bolivianos, realizaron una prolífica labor técnico-científica, en campos poco desarrollados como Geología del Cuaternario, Limnología de lagos, Geoquímica de Evaporitas, Estudios Climáticos y Glaciología, cuyos valiosos resultados fueron presentados en numerosos libros, revistas y publicaciones para servicio y aplicación de otros profesionales que utilizaron los datos para coadyuvar al desarrollo nacional.*

*También no podemos olvidar que esta cooperación fue extensiva a otras unidades de la U.M.S.A. como, por ejemplo, en el área de la salud.*

*Mención aparte merece la transferencia tecnológica y científica que ORSTOM ofreció a Bolivia a través del trabajo íntimo y fraterno en equipo de profesionales mixtos bolivianos y franceses.*

*Sin embargo, esto no fue todo, puesto que innumerables becas de perfeccionamiento profesional fueron otorgadas por el Gobierno Francés a jóvenes científicos bolivianos para su capacitación en aulas de Universidades e Institutos de gran prestigio en Francia.*

*El resultado de esta valiosa cooperación la tenemos demostrada en la gran cantidad de profesionales que estuvieron vinculados al convenio y que ahora trabajan y dirigen con éxito Instituciones e Empresas de Servicio y Productivas en el país.*

*Como sabemos, en la vida hasta las mejores cosas tienen su epílogo; por eso ahora con mucho pesar y nostalgia cerramos una etapa de bello y productivo trabajo científico entre dos países amigos, augurando con esperanza que en un futuro próximo encontramos otra vez caminos que renueven fortalecida nuestra amistad y relación.*

*Ing. José Ponce Villagomez  
Decano de la Facultad de Ciencias Geológicas  
U.M.S.A.*

## advertencia

Este informe presenta una compilación en forma resumida de las actividades y los principales resultados logrados en el marco del convenio de Cooperación ORSTOM-UMSA en Geología.

En vista de la duración del período (1974-1995) es decir más de 20 años, esta compilación no pretende ser completa; por esta razón pido disculpas para los errores y omisiones a los colegas concernidos, más que todo a aquellos que colaboraron en ciertas épocas, para luego elegir a otro campo de actividad y dejar la UMSA. Me refiero también a los participantes ocasionales (VSN franceses, becados y tesistas) quienes muchas veces fueron los proveedores de la información básica de campo.

Creo que la lista bibliográfica de los trabajos publicados constituye en sí misma una parte importante de este informe y refleja más objetivamente las actividades desarrolladas y los resultados obtenidos. Gracias a ella las personas interesadas podrán encontrar el detalle de la información que necesitan.

## avertissement

Ce rapport présente un résumé des principaux résultats obtenus dans le cadre de la convention de coopération ORSTOM - UMSA en géologie.

Vu de la durée de la période (1974-1995), cette compilation ne prétend pas être complète et je présente mes excuses aux collègues pour les erreurs et les oublis. Je pense en particulier à ceux qui ont collaboré à certains moments, avant de choisir d'autres domaines d'activité et de quitter le centre de recherche de géologie de l'université. Je pense aussi à tous les collaborateurs occasionnels (VSN, allocataires, thésards) qui bien souvent ont été responsables de la collecte de l'information de base sur le terrain.

Je voudrais souligner que la liste bibliographique des publications forme, à mon avis, la partie importante de ce rapport car elle reflète plus objectivement les travaux réalisés et les résultats obtenus. Grâce à elle, les personnes intéressées pourront retrouver les informations complètes et détaillées sur les thèmes de recherches développés.

1. Introducción.....	p. 1
2. Reseña de los principales objetivos logrados.....	p. 5
2.1. Programa Plio-Cuaternario de Bolivia. ....	p. 5
2.1.1. Los lagos cuaternarios del Altiplano boliviano. ....	p. 5
2.1.2. Las investigaciones limnológicas sobre el lago Titicaca y Poopó. ....	p. 8
2.1.3. El Plio-Cuaternario de la región de la Paz. ....	p. 11
2.2. Los estudios neotectónicos.....	p. 13
2.3. Estudio de los salares del Altiplano boliviano.....	p. 18
2.4. Los yacimientos detríticos de oro y sus fuentes primarias.....	p. 23
2.4.1. El placer de Tipuani-Mapiri.....	p. 23
2.4.2. Trazado del "Cauce Antiguo" entre Unutuluni y el valle del río Capitán. ....	p. 30
2.4.3. Exploración del "Cauce Antiguo" en la región de Cangallí ....	p. 32
2.4.4. El oro aguas abajo de la cuenca de Tipuani: río Kaka, Alto Beni, Beni.....	p. 38
2.4.5. Los placeres de la región de Soledad (Oruro). ....	p. 40
2.4.6. Los placeres de la región de Guadalupe y de Sur Lipez.....	p. 41
2.4.7. El placer de Vilader. ....	p. 42
2.4.6. Composición del oro en depósitos primarios de la provincia metalogénica andina y su significado genético. ....	p. 44
2.5. El magmatismo de tras-arco del oroclino boliviano; implicaciones geodinámicas y metalogénicas. ....	p. 46
2.5.1. Las rocas magmáticas ácidas. ....	p. 46
2.5.2. Las rocas shoshoníticas.....	p. 48
2.5.2. El magmatismo alcalino. ....	p. 50
3. Contribución al proyecto Plio-Cuaternario de Bolivia.....	p. 56
Escenarios paleoclimáticos de los últimos 25 000 años en los Andes bolivianos ....	p. 70
Génesis de los lagos salados. ....	p. 84
4. Lista de los participantes. ....	p. 91
5. Lista bibliográfica de los trabajos realizados en el marco del convenio. ....	p. 93

## 1. Introducción.

La Geología fue la primera disciplina científica a través de la cual el ORSTOM inició sus actividades de Cooperación en Bolivia en la década de los años 1970.

En 1974 se firmó un convenio con la Facultad de Ciencias Geológicas de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA) para desarrollar un programa de investigación conjunta que se refería principalmente a la evolución geodinámica reciente (Plio-Cuaternaria) de los Andes bolivianos.

Con la llegada del primer grupo de geólogos franceses (M. Servant, S. Servant-Vildary, F. Risacher, y A. Lavenue), quienes permanecieron durante varios años se constituyó un equipo de investigación con los profesores bolivianos en el marco del Instituto de Investigaciones Geológicas y Limnológicas (I.G.L.)<sup>1</sup>, para desarrollar un programa multidisciplinario de Geodinámica y Limnología.

Además de tratar de realizar investigaciones de alto nivel, una de las preocupaciones que caracterizaban el Convenio de Cooperación fue la formación y capacitación de los jóvenes estudiantes y profesionales bolivianos.

Esto se realizó ya sea dictando cursos especializados, o en los trabajos de campo y de gabinete realizados en conjunto y en la co-dirección y asesoramiento de "tesis de grado". En algunos casos se otorgaron becas a Francia para cursos de especialización o realización de doctorados. Se cubrieron gastos para asistencias a congresos y otros eventos de interés.

Otro tipo de formación que fue muy eficiente y recibió una buena acogida fue lo que llamamos "escuelas de campos"; en base a las experiencias anteriores adquiridas en particular en Perú, se pudieron organizar cursos teóricos y prácticas de campo principalmente en el dominio de la sedimentación de las cuencas intra-montañas, reconocimientos e interpretación de las facies sedimentarias y de la tectónica.

A lo largo de estos 25 años se produjo una evolución en los temas de las investigaciones desarrolladas, en parte porque la adquisición de los primeros resultados planteaba nuevos interrogantes, en parte porque aparecían nuevas demandas de investigaciones sobre temas no considerados inicialmente.

Durante lo que se puede considerar como el período inicial (es decir más o menos entre 1974 y 1980), las preocupaciones eran principalmente orientadas hacia la investigación fundamental en geodinámica externa, tal como la geomorfología y la evolución de las fases glaciales, el estudio de los paleolagos (lagos Titicaca y Poopó), la neotectónica. También se inició el estudio de las cuencas evaporíticas del Altiplano, las cuales a pesar de su inmensa superficie (10 000 km<sup>2</sup> para el salar de Uyuni) no habían sido objetos de estudios particulares hasta la fecha.

---

1: cuyo primero director boliviano fue el Dr. L. A. Rodrigo.

De forma muy esquemática se nota que la primera etapa entre los años 1974 a 1980, pasó transitoriamente a un período donde una parte del esfuerzo de investigación se orientó más hacia el estudio de la evolución reciente del clima de los 20000 últimos años; durante este período se evidenciaron en particular las fluctuaciones de nivel del lago Titicaca, se realizaron estudios sobre las glaciaciones y el piedemonte suroccidental de la Cordillera Oriental y se pusieron en práctica mediciones de isótopos, de microfauna, y palinología para tener datos cuantitativos sobre el medio ambiente y clima de la época.

Otro tema que se incorporó se refiere a la formación de los Andes centrales que constituyen el modelo clásico de una cadena al límite de una placa de subducción, pero para el cual el modo de génesis no es tan sencillo como se lo imaginaba. El Oroclino boliviano plantea problemas cuya resolución necesita una metodología que acerca e integra datos sedimentológicos sobre la disposición de las cuencas antiguas antetectónicas, relación entre la tectónica y la sedimentación, en particular la sedimentación continental, la cronología de la deformación. Es así que se realizó un programa de estudio sobre las cuencas intra-montañas. Se estudió, entre otros, las formaciones detríticas continentales del Cenozoico inferior, del punto de vista sedimentológico y de ambientes de deposición.

También se necesitaban estudios petrográficos, geoquímicos y isotópicos para aclarar el papel y la influencia del magmatismo que durante cierta época fue considerado como la causa del fuerte espesor cortical por debajo del Altiplano (mas de 70 km en el Altiplano Sur) y como responsable del levantamiento de los Andes. Se realizaron investigaciones sobre el volcanismo en la región de Morococala y sus mineralizaciones y también sobre los niveles volcánicos (lavas y tobas) del Altiplano, principalmente para precisar las edades de las formaciones geológicas mio-pliocenas.

A partir de 1985 aparecieron nuevas preocupaciones orientadas hacia aspectos de interés económico y aplicado.

El estudio de reconocimiento de los salares realizado anteriormente había puesto en evidencia que las costras de sal son porosas y contienen soluciones intersticiales de salmueras muy ricas en elementos tales como litio, bromo, magnesio, potasio con tenores dentro de las mas elevadas del mundo. Pero sólo se había podido estudiar la parte superficial y era necesario poder disponer de datos de profundidad. Es así que en 1985, el ORSTOM adquirió una pequeña perforadora saca-testigos; se realizaron más de 40 perforaciones con un sondeo profundo en la parte central de 121 m en el cual se determinó la presencia de 12 costras de sales, separadas por niveles de sedimentos lacustres limosos.

En base a estos sondeos y consideraciones adicionales sobre la geoquímica de las soluciones se pudo establecer un estudio económico del salar de Uyuni. Las reservas en litio son las mas altas conocidas en el mundo (9 millones de toneladas) y las reservas en potasio, boro y magnesio son también muy elevadas.

El programa sobre los yacimientos detríticos de oro y sus fuentes primarias tenía un objetivo fundamental de entendimiento de los mecanismos geológicos que han permitido la formación de placeres.

Se estudiaron áreas de gran interés económico, tales como la zona de Mapiri-Tipuni, por lo cual tuvimos un acuerdo y el apoyo decisivo e irrestricto de la Federación Regional de Cooperativas Auríferas (FERRECO) para el acceso a las zonas de estudio.

Los objetivos eran - obtener un mejor conocimiento geológico y geotectónico con el fin de facilitar la prospección y la explotación; - proporcionar datos sobre la morfología y la composición de las chispas de oro necesarios para la reconstitución de los mecanismos de formación de los yacimientos y también útiles para el tratamiento de los aluviones en los lavaderos; - delimitar las principales áreas fuentes del oro y los yacimientos primarios mediante los análisis geoquímicos, mineralógicos y geológicos.

Además se estudiaron áreas menos conocidas tal como la región del río San Juan de Oro y de Sur Lipez, donde se puso en evidencia la presencia de partículas de oro de origen volcánico. En este caso el propósito era proporcionar información, en base a modelos regionales que permiten a las entidades competentes escoger, con mas conocimientos, zonas de potencial interés para trabajos de evaluación.

Este programa sobre el oro permitió también la organización de un Simposio Internacional sobre Yacimientos Aluviales de Oro en La Paz, en junio 1991, al cual asistieron más de 220 participantes de unos 23 países. Aunque debido al interés del tema las investigaciones continúan hasta la fecha, orientándose hacia el estudio de los rasgos distintivos de la geoquímica del oro en relación con el tipo de yacimiento primario e igualmente en la investigación de oro atrapado en sulfuros (pirita y arsenopirita) además del oro libre explotado tradicionalmente en rocas derivadas del Paleozoico inferior.

En el último período del convenio se ha desarrollado una investigación sobre el magmatismo orogénico del tras-arco magmático y sus implicaciones geodinámicas y metalogénicas. El objetivo fundamental de este programa es de caracterizar desde el punto de vista petrológico, mineralógico, químico, isotópico, radiocronológico y metalogénico los diferentes tipos de rocas magmáticas, desde el Oligoceno superior. Así como indagar en las condiciones de sus génesis, es decir caracterizar las fuentes mantélicas y/o corticales, las tasas de fusión y la interacción entre el magma y las rocas encajonantes.

Se espera brindar, a través del estudio de dicho magmatismo, elementos fundamentales para un mejor entendimiento tanto de la evolución geodinámica como de la distribución de los yacimientos metálicos de interés económicos, tales como las mineralizaciones epitermales.

El programa Plio-Cuaternario desarrollado en Bolivia, en su última etapa, se interesó en la paleoclimatología ya que la comprensión de los cambios climáticos naturales o de origen antrópico (aumento del CO<sub>2</sub> en la atmósfera), que son de suma importancia para la previsión de la evolución futura del clima.

Esto requiere un conocimiento detallado de los cambios climáticos del Cuaternario reciente; para lograr tal objetivo, las investigaciones se intensificaron en el campo de la glaciología, de la micropaleontología cuantitativa y de la geoquímica de los isótopos estables. Asimismo es fundamental conocer la repuesta dinámica de un glaciar tropical a una señal climática.

Igualmente se desarrolló el estudio de ambientes lacustres con la finalidad de definir la relación entre la fauna (ostrácodos en particular) y el medio físico y químico (profundidad, salinidad y concentraciones de elementos disueltos en las aguas); también se realizó el estudio en testigos del lago Titicaca y lagos fósiles (Tauca y Minchín). La evaluación de la profundidad y salinidad de las aguas durante estos períodos debe permitir conocer los paleoclimas cuaternarios. En resumen el objetivo consiste en estudiar qué tipo de clima existía en la región altiplánica a fines del Cuaternario y su relación con el problema del cambio climático actual.

Por otra parte, los avanzados conocimientos generales sobre la estratigrafía del Plio-Cuaternario fueron una base sólida para proseguir los estudios detallados de geología regional en las cuencas de Cochabamba y la región de la Puna cerca Potosí y Tiwanaku. Se espera lograr realizar una cartografía de las formaciones recientes y de las formas de relieve en un contexto geodinámico general.

Los trabajos de geodinámica sobre los Andes centrales han mostrado la necesidad de tener conocimientos sobre la estructura litosférica, razón por la cual se han realizaron perfiles de adquisición de sísmica profunda (Projet Lithoscope), con participación de ORSTOM e INSU de Francia y del Dr. Telleria por parte de la UMSA; este proyecto ha beneficiado del apoyo de la Academia Nacional de Ciencias y del Observatorio de San Calixto. Se instalaron 34 estaciones sísmicas de corto período de un componente en Bolivia, (y otras 7 estaciones en la región Norte de Chile), ubicadas a lo largo de un perfil transversal de más de 700 km con una orientación preferencial W-E, desde la región de Llica por Potosí, Sucre, y Betanzos, registrando la información de eventos sísmicos durante seis meses (desde el mes de Junio hasta Noviembre de 1994). Un estudiante boliviano de la UMSA participó a la fase de adquisición de datos y siguió una estadía de seis meses en el Laboratoire de Physique du Globe de Strasbourg para el tratamiento de los datos en el marco de su tesis de grado. Este perfil es complementario de aquello realizado anteriormente en la parte norte del Oroclino (Sajama, La Paz, Nor Yungas) donde las estructuras tectónicas presentan una orientación NNW-SSE.



## **2. Reseña de los principales objetivos logrados<sup>2</sup>.**

### **2.1. Programa Plio-Cuaternario de Bolivia.**

#### **2.1.1 Los lagos cuaternarios del Altiplano boliviano.**

Este programa (Servant, 1977, Servant y Fontes, 1978) ha permitido establecer la cronología de las variaciones de superficie de los lagos, variaciones que fueron muy importantes en el pasado; los lagos alcanzaron su mayor extensión con unos 43 000 km<sup>2</sup> entre 12 500 y 11 000 años y se redujeron a sus superficies actuales (8 000 km<sup>2</sup>) más o menos a los 10 000 años (fig. 1).

- El período lacustre Ballivián es bien conocido alrededor del lago Titicaca; su superficie es más o menos 50% superior al lago actual; dejó sedimentos arenosos finos hasta 3 850 m de altura (el Titicaca actual está a ≈3 810 m). En el Altiplano sur todavía no se han encontrado testigos seguros de este período, que además puede haber sido deformado por eventos tectónicos.

- El período interlacustre Ballivián-Minchín corresponde, en el Altiplano sur al emplazamiento de abanicos seguidos de una etapa de erosión de los valles. En el Altiplano norte, en la región de Desaguadero, se observa un cambio brusco entre las facies lacustres de diatomitas y depósitos clásticos; esta evolución litológica sugiere una variación muy rápida del nivel del agua.

Cerca al lago Titicaca, el bajo nivel del agua se traduce por el encajonamiento de los ríos dentro de los sedimentos lacustres, de unos 8 m como mínimo. La mayor parte del sureste del lago se ha secado lo que indica una baja del nivel de agua de unos 15 m.

- Durante el período Minchín, en el Altiplano norte se nota una subida del nivel del agua (de unos 10 a 15 m sobre el nivel actual) pero esta subida fue limitada por la apertura del río Desaguadero que permitió la salida de las aguas hacia el sur del Altiplano.

En el Altiplano sur se desarrolla un extenso lago en las cuencas de Uyuni, Coipasa y Poopó; el nivel lacustre ha subido hasta 3 760 m lo que indica una profundidad de por lo menos 100 m.

Los sedimentos del lago Minchín corresponden a areniscas o lutitas más o menos calcáreas y a edificios recifales de algas muy espectaculares que a veces cubren de manera continua las pendientes del fondo del paleolago.

El detalle de la evolución del lago Minchín no está bien establecido pero el lago no se quedó mucho tiempo a su altura máxima de 3 760 m; existen terrazas bien marcadas a los 3 740, 3 720 y 3 700 m que marcan etapas de descenso del nivel del agua. Edades <sup>14</sup>C indican que la extensión mayor del lago Minchín es más antigua que 27 500 años.

---

2: al final del informe se encuentra la lista bibliográfica con los autores de las publicaciones cuyos datos son usados en esta presentación resumida.

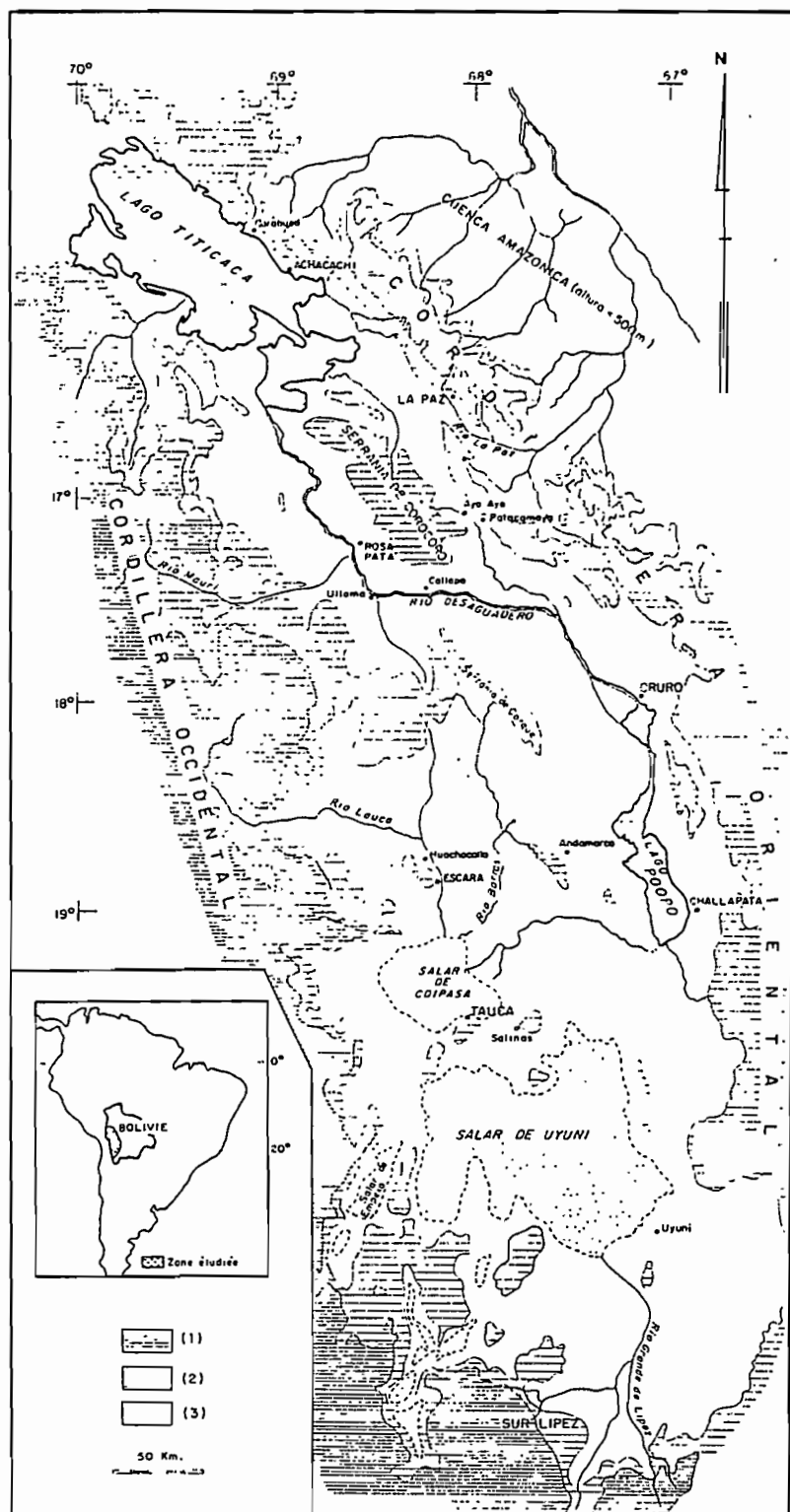


Fig. 1: esquema del Altiplano boliviano. (Servant y Fontes, 1978).

- El período interlacustre Minchín-Tauca está marcado en la región del lago Titicaca por sedimentos clásticos gruesos que descansan sobre las arcillas lacustres del período anterior. En la parte Sur del Altiplano este período se marca por erosión en el borde de las cuencas.

- El período lacustre Tauca está presente en todas las depresiones del Altiplano, pero es poco marcado en el Norte donde la elevación del nivel del lago Titicaca ha sido limitada por la salida de las aguas por el río Desaguadero. Los sedimentos lacustres son bien desarrollados alrededor del Poopó, Uyuni y Coipasa. Generalmente son diatomitas calcáreas o arcillosas de 2 a 5 m de espesor; en los bordes de las cuencas pasan a areniscas finas, con pequeñas conchas de moluscos.

Los testigos más altos se encuentran más o menos a una altura de 3720 m para Servant y Fontes (1978) o a 3770-3780 m según Bills et al. (1994), correspondiente al borde del lago cuando este alcanzó su extensión máxima y cubría unos 43 000 km<sup>2</sup>.

En la zona del Lipez las pequeñas cuencas estaban ocupadas por lagos cuyas terrazas se encuentran entre 5 y 10 m encima del fondo.

Según datos <sup>14</sup>C, los más altos niveles lacustres Tauca tienen edades alrededor de 13 800 años AP.

Después de la fase de extensión lacustre Tauca, la parte norte del Altiplano y las cabeceras de los ríos muestran una terraza baja de edad holocena, de limos finos y diatomitas, localmente ricas en turbas (fechadas en 9430 y 7730 años). Le sigue una fase de erosión y disección de amplitud muy variada entre 2 a 8 m.

- Las relaciones lagos/ glaciares: en base a correlaciones entre las escalas estratigráficas en el borde de las cuencas y el borde de la Cordillera Oriental se mostró que las extensiones lacustres correspondían a los períodos glaciales; estos datos, aunque preliminares, permiten proponer algunas interpretaciones paleohidrológicas y paleoclimáticas.

También se comprobó posteriormente, la existencia de dos niveles lacustres más antiguos al noroeste del lago Titicaca, tanto en el Perú como en Bolivia (Lavenue et al., 1984). Estos dos niveles son anteriores al paleolago Ballivián. El más alto, el lago Mataro se sitúa a una altura de 3950 m y corresponde al Pleistoceno inferior (≈1,6 Ma) mientras que el lago Cabana se encaja en la serie anterior a unos 3900 m. La existencia de estas dos superficies, en el norte y el centro del Altiplano permite pensar que el paso Ulloma-Callapa, entallado por el río Desaguadero no debió existir en el Plioceno inferior.

Paralelamente al estudio de las variaciones de niveles de los lagos se estudiaron también las floras de diatomeas de cada una de las principales formaciones lacustres del Cuaternario del Altiplano boliviano, desde el punto de vista sistemático y paleoecológico (Servant-Vildary, 1978).

Estas diatomeas permiten poner en evidencia una concentración creciente en elementos disueltos, a medida que uno se aproxima a los períodos recientes; la

paleosalinidad alcanza un valor máximo en el episodio lacustre Tauca. Se ha demostrado que esta paleosalinidad no se puede explicar únicamente por la disolución de los sales depositados durante los episodios lacustres anteriores pero que necesita también un marco climático seco (evaporación superior a aportes).

La flora diatomítica conservada en los sedimentos superficiales del lago Poopó presenta una gran variedad para un lago cuya salinidad alcanza valores fuertes de 20 hasta 40 g/l según las regiones. Esta fuerte salinidad se marca en la flora por la amplia distribución de los *Nitzchia*.

El estudio pone en evidencia que los factores físicos juegan un papel importante sobre la repartición de las diatomeas; en algunas circunstancias estos parámetros pueden esconder la influencia de la salinidad sobre la constitución de las asociaciones diatómicas.

Igualmente, se han estudiado los depósitos limosos de fondo de valles Holoceno antiguo que contienen una abundante flora de agua dulce con diatomeas de países fríos o montañosos.

### **2.1.2. Las investigaciones limnológicas sobre el lago Titicaca y Poopó.**

Este estudio permitió delimitar precisamente la morfología del lago y de su cuenca de drenaje; las conclusiones principales fueron presentadas por Boulangé et al., (1981).

El reconocimiento de fallas y lineamientos principalmente de dirección NW-SE, subraya el papel de la tectónica distensiva que caracteriza todo el Cuaternario (Lavenue, 1977) y permite el desarrollo de la fosa del lago Titicaca, posteriormente a fases compresivas antiguas que afectan los sedimentos Plioceno superior.

El estudio del lago abarca también la sedimentación actual, con una evaluación cualitativa de los sedimentos detríticos transportados dentro del lago por los principales ríos afluentes; se ha podido mostrar que debido a la baja pendiente de los ríos y al papel de "filtro" desarrollado por la vegetación (totoraes y algas) en la orilla del lago, la sedimentación detrítica es relativamente débil y que la sedimentación actual es principalmente bioquímica.

Se ha podido elaborar un mapa de la repartición de las facies del fondo del lago a través de un muestreo por draga (fig. 2). El contenido en materia orgánica, carbonato de calcio y residuo insoluble en ácido fue utilizado como referencia para definir un diagrama de composición logrando la definición de facies principales: (I) facies detrítica, (II) facies detrítica-carbonatada, (III) facies carbonatada, (IV) facies organo-detrítica, (V) facies organo-detrítica carbonatada; (VI) facies orgánica.

- La facies detrítica contiene menos de 25% de materia orgánica y muy pocos carbonatos. Se encuentra principalmente en las zonas de bordes y en la desembocadura de los ríos; las facies detríticas con clastos son relativamente restringidas y derivan directamente de las formaciones pliocenas; las facies de areniscas son pocas extensas, localizadas a lo largo de la orilla oeste del lago Menor (o lago Huiñaimarca) y frente a las playas entre la desembocadura de los ríos Suches e Ilave en el lago Mayor (o lago

Chucuito); frente al río Suches se extienden sobre casi 5 km y alcanzan una profundidad de 50 m.

Las facies más finas (limo y limo-arcilla) están constituidas por cuarzo, ilitas y montmorillonitas; estos lodos limo-arcillosos forman los sedimentos actuales de la cuenca central del lago Mayor; se trata de lodos gris-verde oscuro, marrón oscuro o gris-negro; contienen de 15 a 20% de materia orgánica; el carbonato de calcio varía de 0 a 30% y se encuentra localizado en zona de fuerte pendiente.

- Las facies detríticas carbonatadas contienen menos de 25% de materia orgánica y de 20 a 70% de carbonato de calcio. Están presentes tanto en el lago Mayor como en el lago Menor; el carbonato de calcio procede esencialmente de la presencia de fragmentos de conchas.

- La facies carbonatada contiene menos de 25% de materia orgánica y más de 60% de carbonatos; esta casi ausente en el lago Mayor pero cubre gran parte del lago Menor; la presencia de esta facies está ligada a la profundidad (de 4 m) y a una abundante presencia de algas carofíceas. Son lodos gris claro, homogéneos donde la materia orgánica (en promedio 15%) deriva de la descomposición del plancton.

- La facies organo-detrítica presenta de 25 a 50% de materia orgánica y menos de 15% de carbonato de calcio; en el lago Menor corresponde a zonas profundas entre 20 y 40 m mientras que en el lago Mayor se encuentra en la bahía de Copacabana entre 80 y 100 m de profundidad. Son lodos oscuros con pocas conchas y fuerte olor a hidrógeno sulfurado.

- La facies organo-detrítica carbonatada contiene 25 a 50% de materia orgánica y entre 15 a 50% de carbonato; está presente en el lago Menor sobre fondos planos entre 10 a 20 m de profundidad, donde las carofíceas son más o menos abundantes según las variaciones del nivel del agua en el lago.

- La facies orgánica contiene más de 50% de materia orgánica y muy pocos carbonatos; se localiza en el fondo de las bahías de aguas tranquilas con una profundidad menor de 2 m y abundantes "totorales".

Este estudio ha permitido una determinación cualitativa de los aportes en relación con las unidades geológicas de las cuencas vertientes.

Se ha mostrado que la parte arcillosa (montmorillonita e ilita) forma la mayor parte de los sedimentos del lago Mayor; los aportes no arcillosos están atrapados cerca de las desembocaduras por la abundante vegetación y la debilidad de las corrientes. Los fenómenos bioquímicos son importantes en el lago Menor y las grandes bahías donde hay absorción del carbonato de calcio por las algas, destrucción del plancton y producción de materia orgánica. Estas facies se disponen regularmente desde la periferia hacia el centro; son la marca de un estado del lago y su disposición refleja variaciones en profundidad y por lo tanto del nivel del agua del lago.

Las tasas de sedimentación son poco conocidas y varían entre el lago Mayor y el lago Menor. En base a un testigo de unos 70 cm, localizado en la entrada de la bahía de Achacachi en una zona de facies carbonatada con dos niveles ricos en conchas se ha

podido establecer por medio de edades  $^{14}\text{C}$  una velocidad de sedimentación de 0,5 mm por año. Una investigación reciente (Pourchet et al., 1993) permitió precisar la variabilidad de las tasas de sedimentación al nivel de las dos cuencas (lagos Chucuito y Huiñaimarca).

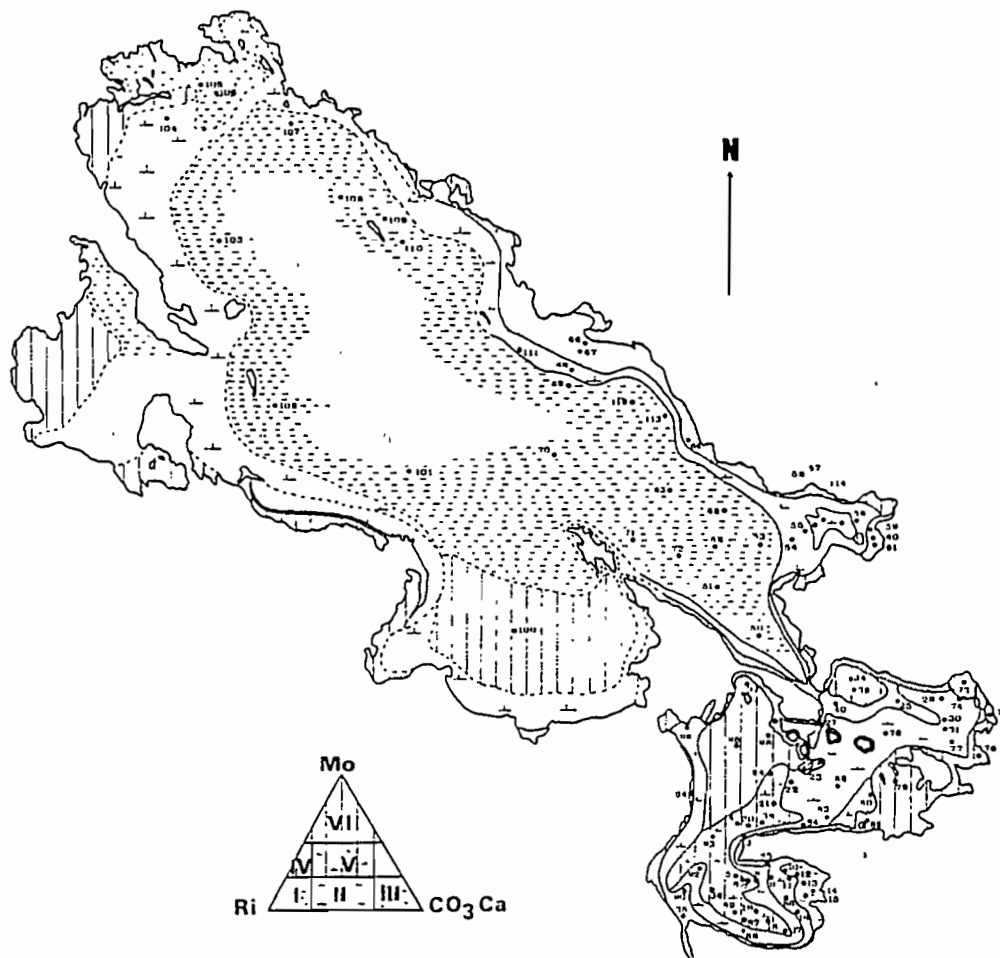


Fig. 2: mapa de repartición de las facies sedimentarias del fondo del lago Titicaca. (Boulangé et al., 1981)

Un estudio análogo se realizó también sobre el lago Poopó, quien presenta características muy diferentes. (Boulangé et al., 1978). Pertenece a la cuenca endorréica del Altiplano y aparece como un intermediario a nivel geoquímico entre el Titicaca y la zona de los salares<sup>3</sup>. Es un lago poco profundo (máximo de 1,60 m a 2,20 m en altas aguas) que se extiende ampliamente sobre las pampas de su lado oeste. La sedimentación actual contiene abundante materia orgánica y carbonato de calcio correspondiente a restos orgánicos, material organo-detrítico (fragmentos de conchas y carofíceas) y carbonato de calcio precipitado químicamente.

La repartición espacial de estas facies debe permitir evaluar la variaciones del nivel del lago.

<sup>3</sup>: se observa actualmente una tendencia al desecamiento del Lago Poopó.

### 2.1.3. El Plio-Cuaternario de la región de la Paz.

Este estudio forma parte de la investigación más amplia desarrollada sobre el cuadro estratigráfico del Plio-Cuaternario del Altiplano y de los Andes de Bolivia. Servant (1977) estableció correlaciones precisas de las relaciones estratigráficas existentes entre los depósitos glaciales (atribuidos a cuatro glaciaciones mayores), las superficies morfológicas interglaciales (glacis) y los sedimentos lacustres del borde de las cuencas.

La región de La Paz ofrece un corte completo del Plio-Cuaternario (fig. 3) en los piedemontes de los Andes (Ballivián et al., 1978) gracias a la disección muy amplia ocurrida durante el Cuaternario reciente, en relación con una erosión regresiva que se ha desarrollado a partir de la cuenca amazónica, logrando cortar la Cordillera Oriental y capturar parte de la red hidrográfica del Altiplano. Se puede observar las formaciones plio-cuaternarias con la totalidad de sus espesores (mas de 1 000 m). Reconocido por Troll et al. (1935), este perfil ha sido estudiado por Dobrovolny (1962), mientras que Servant (1977) hizo una reinterpretación tomando en cuenta el cuadro general del Plio-Cuaternario de Bolivia. El trabajo realizado en la cuenca de La Paz permite observar la presencia de una serie continental de más de 500 m de espesor, pliocénica por lo menos en su parte inferior (fauna de vertebrados). Presenta dos facies diferentes: una facies fina, arcillo-areniscosa, bien estratificada y una facies conglomeradica; estas dos facies presentan pasajes laterales a escala kilométrica en forma de interdigitación. También incluye varios niveles de cinerita.

Estos depósitos parecen asociados a un sollevamiento relativo de los relieves río arriba y a una subsidencia de la cuenca río abajo.

La Formación La Paz esta cortada en su parte superior por una superficie de erosión; esta superficie fue retrabajada por erosiones posteriores o recubierta por depósitos fluviales o glaciales, siendo su definición difícil en terminos morfológicos. Testigos de alteración y paleosuelos se encuentran en esta superficie de erosión. Esta fase de erosión podría estar asociada con la apertura río abajo de la depresión del lago Titicaca.

Luego aparecen depósitos glaciales típicos atribuidos a dos glaciaciones antiguas; la más antigua (Formación Calvario) incluye depósitos glaciales y depósitos fluvio-glaciales o fluviales; el espesor máximo de los sedimentos glaciales es de 80 a 100 m. La segunda glaciación (Formación Kaluyo, Servant, 1977; Formación Milluni, Dobrovolny, 1962) permite distinguir dos formaciones glaciales separadas por un nivel de erosión y alteración; también existen gravas fluvio-glaciales depositadas aguas abajo de los frentes de los glaciares.

Estas glaciaciones antiguas indican que los Andes ya habían alcanzado más o menos a las alturas actuales.

Después las glaciaciones antiguas, los piedemontes de la Cordillera Oriental fueron sometidos a la acción de la erosión cuyo efecto esta representado por el desarrollo de un extenso pedimento con testigos de pedogénesis y alteración.

Se produjo otra glaciación mas reciente (glaciación Sorata, Servant, 1977) que se caracteriza por acumulaciones morrénicas con glaciales de piedemonte. Fue seguida por una disección y erosión fluvial en parte ligada a un descenso del nivel del lago Titicaca. En la zona de La Paz esta erosión fue mucho mas importante en relación con la captura de la red hidrográfica por un afluente de la cuenca amazónica. Los valles en vía de individualización fueron ocupados por glaciales en sus partes altas; esta última glaciación (glaciación Choqueyapu), tuvo dos avances glaciales sucesivos antes del retroceso progresivo de los 10000 últimos años.

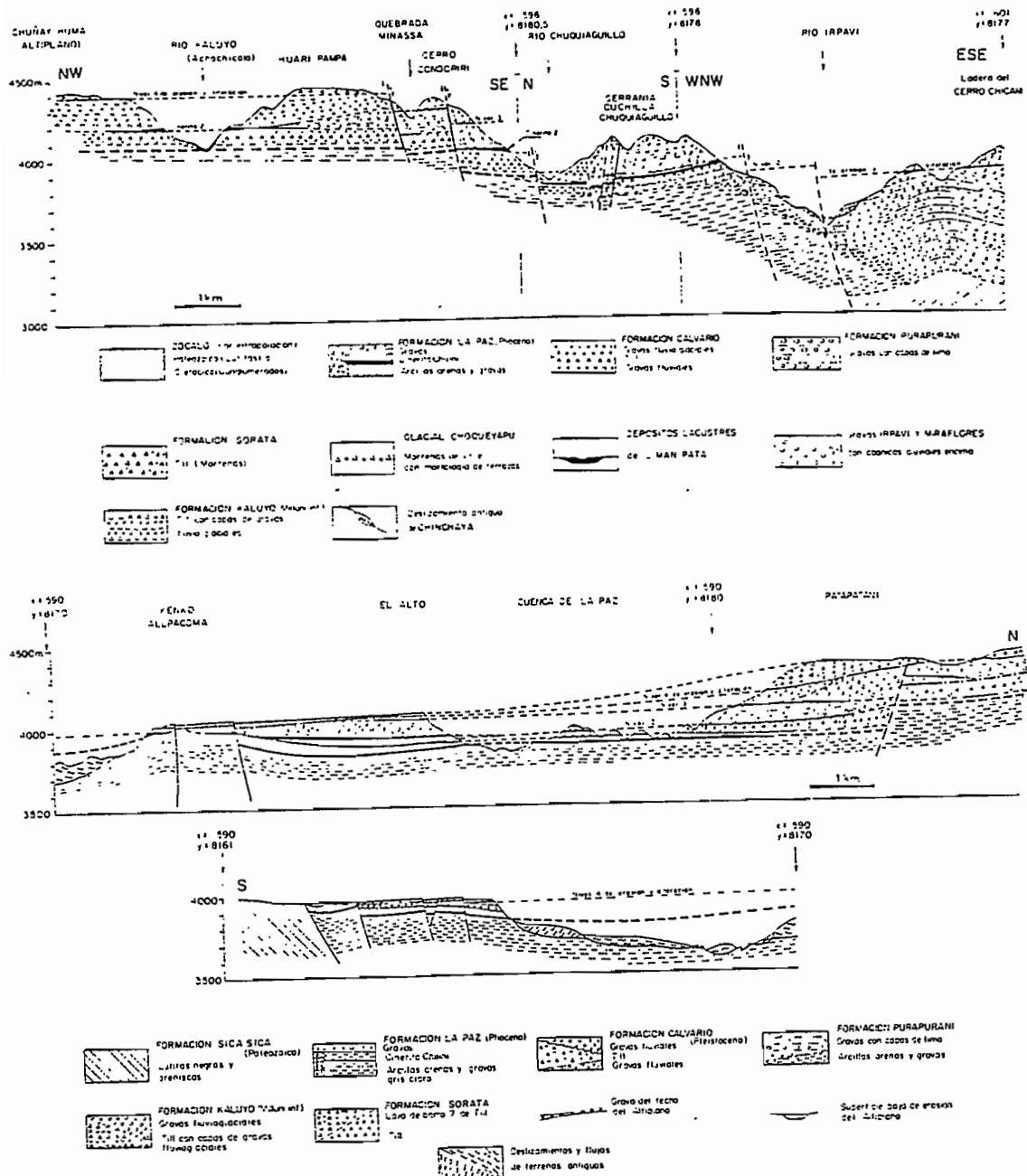


Fig. 3: cortes geológicos del Plio-Cuaternario de La Paz, (in Balliván et al., 1978, según informes BRGM-BCOM)



## 2.2. Los estudios neotectónicos.

Al principio este programa se interesó esencialmente a la deformación Plio-Cuaternaria pero se fue ampliando a las épocas más antiguas hasta llegar a un estudio tectónico y neotectónico del Altiplano y de la Cordillera Oriental desde el Mioceno (Lavenu, 1988).

El estudio de la neotectónica de los sedimentos plio-cuaternarios del norte de l'Altiplano (Lavenu, 1978) realizado con el análisis de las microfallas (fallas de rumbo, fallas inversas y fallas normales) permitió en principio de poner en evidencia diferentes fases de deformación. 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 es responsable de pliegues y de fallas inversas (Lavenu 1988; Lavenu y Mercier, 1981). En el Cuaternario antiguo, una segunda deformación compresiva, de menor intensidad, afecta a los depósitos de edad pliocena superior a cuaternaria antigua; corresponde a fallas inversas con 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 distensión de dirección N-S a N20°E. Esta deformación distensiva interesa a todo el Cuaternario hasta el período actual.

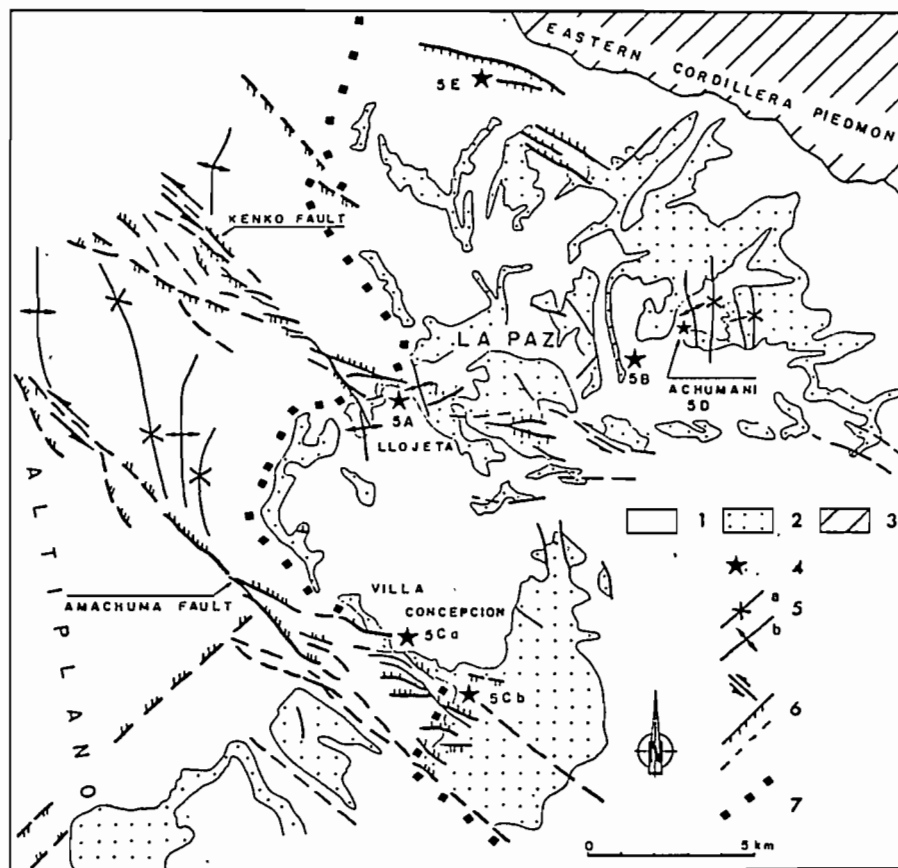


Fig. 4: esquema estructural de la región de La Paz (Lavenu, 1981),  
1: Cuaternario; 2: Plioceno; 3: formaciones ante pliocenas; 5: pliegues; 6: fallas.

Las observaciones de campo permiten evidenciar varios episodios distensivos sucesivos que afectan las superficies de erosión. Sobre el piedemonte de la Cordillera Oriental entre La Paz y el lago Titicaca, las fallas normales con orientación NW-SE afectan los depósitos cuaternarios glaciales y fluvio-glaciales; la amplitud del movimiento vertical es a veces importante en particular en un primer período de extensión pleistoceno (en la cuenca de La Paz ≈ 100 m a Llorata; 300 m en la quebrada Minasa y 200 m al Este de Peñas como también en la ribera este del lago Titicaca). Los desniveles son más fuertes comparados a los del centro del Altiplano donde sólo alcanzan 50 m. Las deformaciones del Pleistoceno superior y del Holoceno son más débiles y los rechazos morfológicos menos importantes; sin embargo numerosos indicios (por ejemplo el recorte por fallas normales de las morrenas Choqueyapu) muestran que esta extensión N-S es continua.

Así, al pie de la Cordillera Oriental 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 paleolagos Mataro y Cabana; es ciertamente en esta época que se crea realmente la fosa tectónica que es ocupada por el lago Titicaca, el punto más bajo del Altiplano.

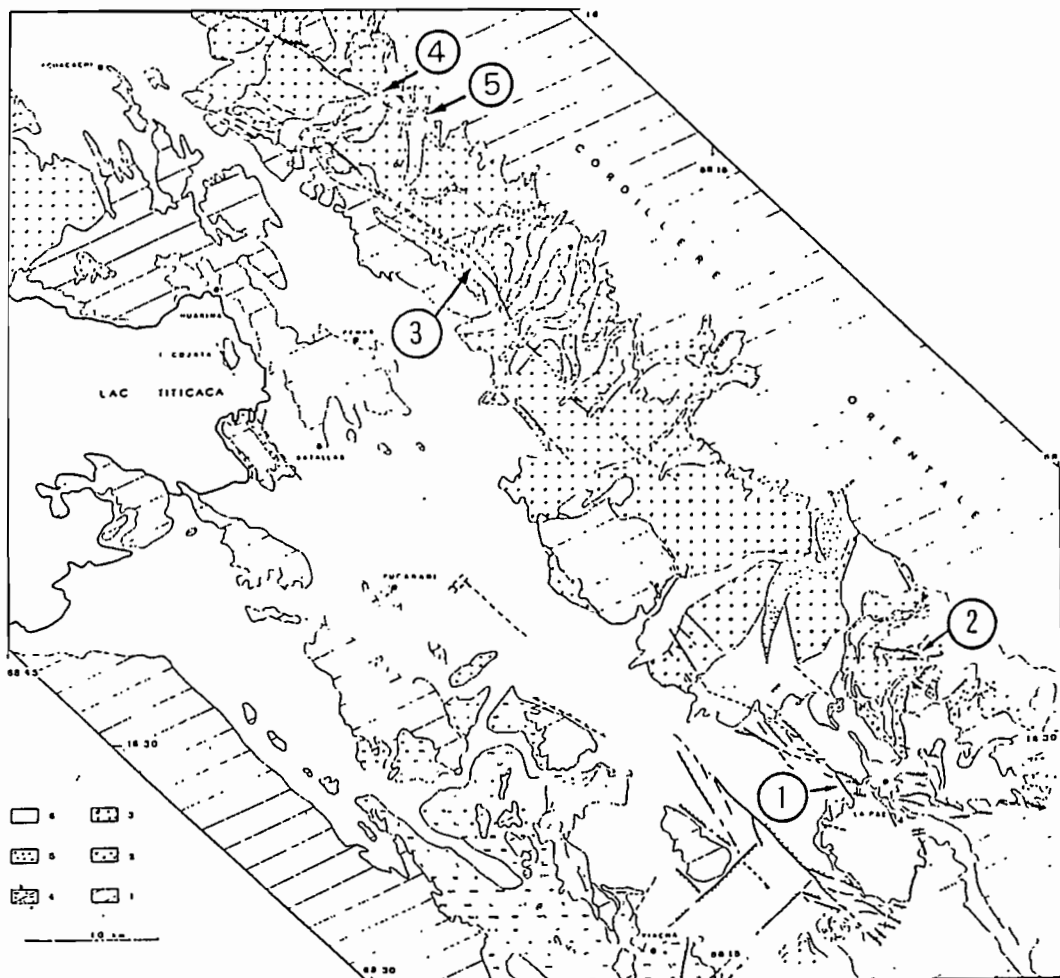


Fig. 5: esquema estructural del piedemonte de la Cordillera Oriental entre La Paz y el lago Titicaca (Lavenu, 1981),

Igualmente se hizo un estudio de las cuencas de las regiones de Cochabamba, Sucre, Tarija, localizadas en la Cordillera Oriental (Lavenu y Ballivián, 1979).

Se trata de cuencas lacustres intra-montañosas, con depósitos neogenos y cuaternarios, generalmente de origen tectónico; así la cuenca de Cochabamba (Sacaba y Punata) es controlada por una falla mayor de dirección N100°E; la cuenca de Sucre por fallas de orientación N125°E, mientras que la cuenca de Tarija es de dirección N-S, paralela a la orientación de las estructuras del dominio subandino, al sur del codo de Santa Cruz.

En la cuenca de Cochabamba los depósitos sedimentarios fallados y plegados del Plioceno (Mancilla, 1979) son cubiertos en discordancia por capas fluvio-lacustres horizontales de edad cuaternaria reciente (Lavenu y Ballivián, 1979). La dirección promedio de ejes de pliegues en el Plioceno indica una dirección de acortamiento ENE-WSW.

Pequeñas terrazas y niveles de ablación se encuentran escalonados a lo largo de la falla Tunari; estos niveles indican un fuerte levantamiento y entonces una actividad de la falla durante el Cuaternario. Numerosos conos aluviales tapan la traza de la falla y no permiten observar su plano. Los sedimentos cuaternarios muy recientes no muestran rasgos claros de falla, pero una microfracturación en fallas normales y fallas de rumbo con componente normal, que indican una extensión con dirección promedio E-W y otra con dirección N40°E.

La cuenca de Sucre contiene sedimentos atribuidos a Plioceno son plegados por un acortamiento de dirección N80°E; las fallas permiten distinguir dos grupos, uno según un acortamiento E-W y el otro con un acortamiento N30°E; no hay datos de campos que permiten establecer la cronología relativa de estos dos eventos. Algunas escasas microfallas pueden indicar una extensión E-W.

La cuenca de Tarija contiene sedimentos fechados por magnetoestratigrafía del Plioceno inferior ( $\approx 1$  a 0,7 Ma según McFadden et al., 1993). Los sedimentos han sufrido una débil tectónica en compresión que se traduce por escasas fallas de rumbo con un acortamiento de dirección N85°E. No se notan grandes fallas normales en los sedimentos cuaternarios pero la medición de más de 100 microfallas en el centro de la cuenca muestra la existencia de una extensión de orientación N201.

Los regimenes tectónicos en los Andes de Bolivia del Mioceno superior al Cuaternario (síntesis según Lavenu y Mercier, 1991).

El marco tectónico de las cuencas subsidentes oligocenas y miocenas del Altiplano, donde el espesor máximo de los sedimentos alcanza 8 000 m fue siempre objeto de discusión. El gran espesor de los sedimentos hizo pensar que se depositaban en ambiente de distensión salvo durante las breves fases de compresión demostradas por Martínez (1980) y Lavenu (1988). Luego, en base a los trabajos desarrollados en el marco del programa de las cuencas intra-montañas, se mostró la existencia de una tectónica en compresión sinsedimentaria, activa durante todo el Oligo-Mioceno (Labrousse y Soria, 1987, Sempéré et al., 1990).

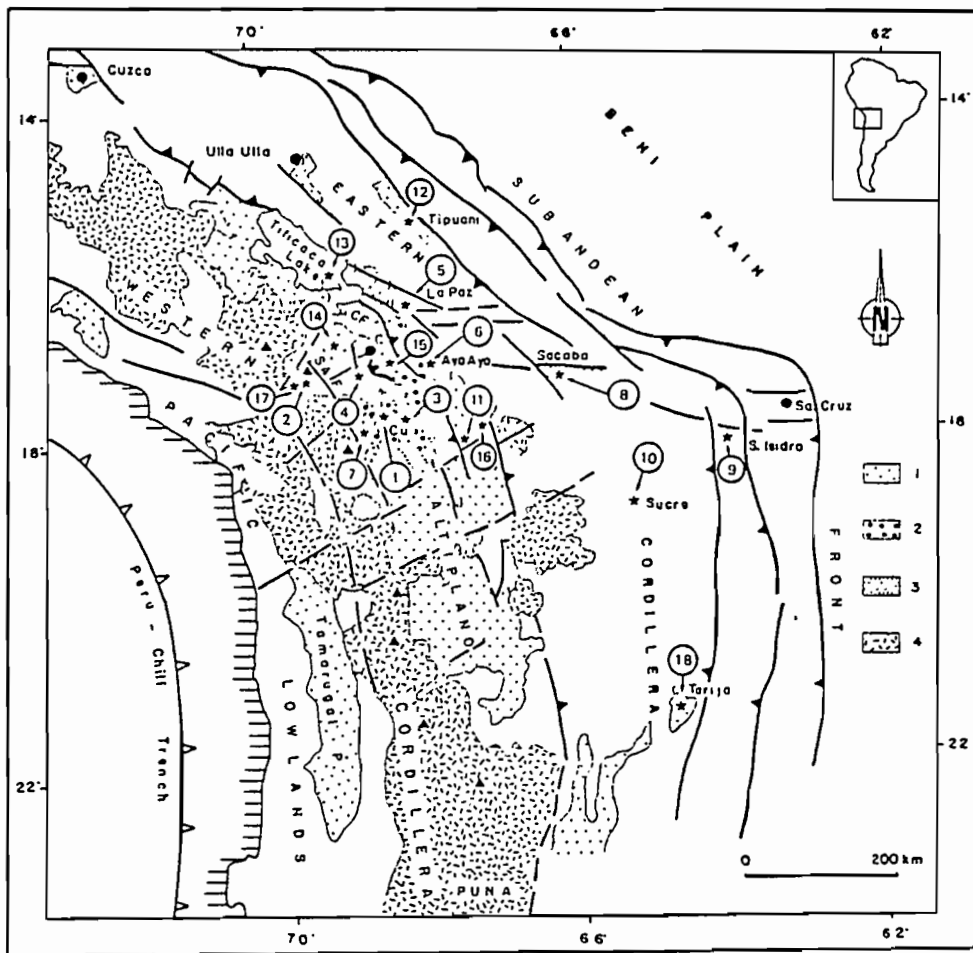


Fig. 6: esquema estructural de los Andes centrales de Bolivia (Lavenu y Mercier, 1991).  
 1= Cuaternario de la cordillera (no diferenciado en el subandino y la llanura del Beni;  
 2= Plioceno del Altiplano; 3= Oligo-Mioceno; 4= volcanismo cenozoico; los numeros  
 cerca a las estrellas se refieren a los sitios de medición de los pliegues y fallas.

En el Mioceno superior ( $\approx 7-8$  Ma) una fase tectónica compresiva (fase F4) provoca un acortamiento de orientación NE-SW, ocasionando pliegues, fallas inversas y fallas de rumbo. El análisis cinético de las fallas muestra que la dirección de acortamiento para esta fase está entre  $N25^{\circ}E$  y  $N45^{\circ}E$ ; esta dirección de acortamiento es diferente de la dirección de convergencia  $N80^{\circ}E$  de las placas Nazca y Sud Americana de esta época (Pardo-Casas y Molnar, 1997). Es posible que esta dirección NE-SW sea asociada a un efecto de geometría regional debido a la dirección  $N120^{\circ}$  de los Andes, o, más probablemente a una rotación de bloques. Es durante este período oligo-mioceno que los Andes alcanzan la mayor parte de su altura, y entonces el espesamiento cortical puede ser en gran parte ligado al acortamiento tectónico.

Durante el Plioceno (entre 6 y 3 Ma) las partes altas de los Andes están sometidas a una tectónica de extensión de dirección E-W. Esta extensión esta bien documentada principalmente por argumentos sedimentológicos y tectónicos, a lo largo de los bordes de la cuenca del Altiplano, al límite con las cordilleras.

Al Plioceno terminal ( $\approx 3-2$  Ma) una fase tectónica compresiva (fase F5) está presente en toda la región estudiada. La deformación, poco intensa, se marca por

pliegues kilométricos, y mas que todo, por la reactivación en fallas inversas o de rumbo con componente inversa, de fallas preexistentes. La dirección de compresión E-W, muy homogénea es paralela a la dirección de convergencia de las placas a esta época. Sin embargo existen también fallas inversas compatibles con un acortamiento N-S. En Bolivia siempre se observa la sucesión de los dos eventos: primero la compresión E-W y luego la compresión N-S.

Finalmente desde el Pleistoceno antiguo hasta el actual, todas las regiones estudiadas localizadas en las altas Andes son afectadas por una tectónica en distensión de dirección N-S a N20°E. Al contrario la cuenca de Tarija, localizada más abajo (1900 m) ha registrado durante este período una tectónica con fallas de rumbos con acortamiento E-W.

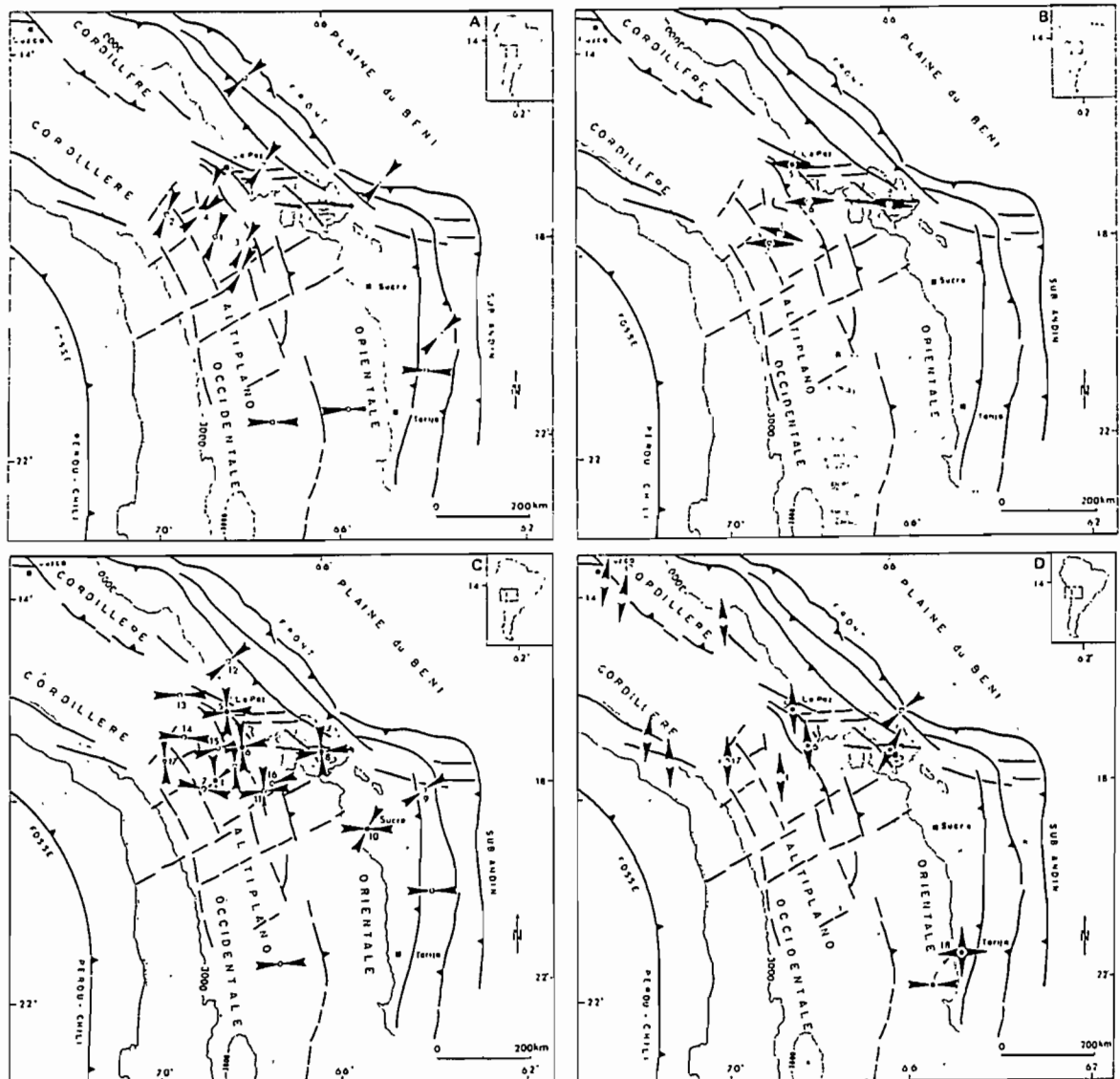


Fig. 7: direcciones principales de compresión o de extensión deducidas del análisis de los pliegues y fallas. (Lavenu y Mercier, 1991). A = direcciones de acortamiento Mioceno superior; B = direcciones de extensión Plioceno; C = direcciones de compresión Plioceno superior-Pleistoceno; D = direcciones de extensión Cuaternaria medio a reciente.

### 2.3. El estudio de los salares del Altiplano boliviano.

Este programa se inició en 1974 con una primera fase de reconocimiento de todo el Altiplano que forma una cuenca de más de 200 000 km<sup>2</sup> de alturas cercanas a los 4 000 m, limitada al Este por sedimentos principalmente paleozoicos de la Cordillera Oriental y al Oeste por el arco volcánico cenozoico, con rocas mayormente ácidas (dacitas a riocacitas). En el Altiplano sur, los volcanes, flujos de lavas e ignimbritas delimitan numerosas cuencas cerradas de alta elevación (4100-4700 m); yacimientos de azufre son comunes cerca de las cumbres de los volcanes más recientes.

El clima es árido y frío. La evaporación potencial es comprendida entre 1 y 1,5 m por año; las precipitaciones anuales disminuyen de 700 mm al norte del Altiplano hasta menos de 100 mm en el extremo sur; las temperaturas pueden bajar hasta menos 30°C en invierno (junio-julio).

Así quedan reunidas las dos condiciones básicas para que un lago salado pueda establecerse: cuencas cerradas donde la evaporación potencial supera las precipitaciones; esto explica que efectivamente, el Altiplano presenta uno de los más impresionantes conjuntos de cuencas evaporíticas del mundo.

Al principio los objetivos del programa eran:

- reconocimiento general a nivel de la geomorfología, origen de los elementos, naturaleza de las sales, evolución de las salmueras, mecanismos de emplazamiento de las sales, origen de su diversidad y modelación de las interacciones sales-salmueras,
- búsqueda e inventario de las sales y elementos de interés económico.

Es así que de 1975 a 1981 se ha dado una descripción completa, con ubicación, litología de la cuenca de drenaje, aportes de aguas, química y reservas de sales contenidas, renovabilidad de las sales, etc., para todos los salares y lagunas investigadas (Ballivián y Risacher, 1981).

Se ha podido diferenciar tres grupos de cuencas evaporíticas:

- los salares del borde del lago Poopó que consisten en conjuntos complejos de costras de yeso subaflorantes con formas muy irregulares,
- los dos salares gigantes del centro del Altiplano el salar de Coipasa (2 000 km<sup>2</sup>) y el salar de Uyuni (10 000 km<sup>2</sup>) que es la costra de sal mas grande del mundo; son costras de halita (NaCl) muy duras y porosas con una salmuera intersticial cloro-sódica,
- Los pequeños salares de los Lipez que se encuentran en numerosas cuencas entre los volcanes. La superficie de estos salares varia entre algunos centenares de metros cuadrados y 200 km<sup>2</sup> y existen lagos salados playas y costras de sal. Estos últimos contienen sales muy variadas (carbonatos, sulfatos, boratos de sodio y de calcio) a pesar que las cuencas vertientes volcánicas son muy parecidas.

Se investigó la razón de tales variaciones químicas; los componentes disueltos en las aguas de los manantiales y de los ríos tienen un doble origen: (1) alteración meteórica e hidrotermal de las rocas volcánicas que produce aguas bicarbonatas-sódicas y (2) disolución de antiguas evaporitas debajo de la cubierta volcánica, que origina

aguas clorurada-sódicas. Los altos contenidos en litio y boro no están específicamente relacionados con el termalismo.

La evaporación simulada de las aguas diluidas que alimentan a los salares indica que la mayor parte de ellas deberían evolucionar hacia salmueras alcalinas de pH superior a 10. Sin embargo los lagos alcalinos son escasos, la mayor parte son de tipo neutral (Na-Cl o Na-Cl-SO<sub>4</sub>). La causa principal de la escasez de los lagos alcalinos fue esclarecida. Se debe al azufre nativo erosionado por el viento desde la cima de los volcanes y depositado en las formaciones superficiales de las cuencas de drenaje.

Las aguas llevan partículas de azufre que se oxidan en ácido sulfúrico; este ácido, a su vez, neutraliza una parte notable de carbonatos y bicarbonatos de las aguas de aporte lo que favorece la evolución hacia fases neutrales.

El trabajo de reconocimiento de los salares de Uyuni y Coipasa, debido a su tamaño y a la imposibilidad de realizar perforaciones no se realizó al principio del programa. Sin embargo, en 1978, un trabajo con GEOBOL y el US Geological Survey ha permitido reconocer la salmuera superficial que se encuentra a algunos centímetros debajo de la superficie de los salares de Uyuni y Coipasa. Se identificó una salmuera clorurada-sódica muy rica en litio y boro (Jones, Rettig y Risacher, 1980).

Los resultados de interés económico.

- las sales: varias sales pueden ser explotadas: carbonatos de sodio, sulfatos de sodio y boratos. Se hizo un inventario de los salares carbonato-sódicos, estimando sus reservas y renovabilidad en caso de explotación de carbonato de sodio; también se han evaluado los yacimientos de boratos y sulfato de sodio,

- las salmueras: las salmueras de casi todos los salares contienen altas concentraciones en potasio, litio, boro y magnesio. Los primeros análisis mostraron una correlación muy fuerte entre las concentraciones de estos cuatro elementos. Las zonas más concentradas en boro estaban conocidas: se trataban de las borateras; es así que se descubrió el más grande yacimiento de litio, potasio y magnesio asociado a las borateras del delta del río Grande de Lipez en el sur del salar de Uyuni (Risacher y Miranda, 1976; Risacher, Miranda y Carlo, 1976; Risacher, 1984).

Los años 1985-1990, los sondeos:

Acabamos de ver que los principales yacimientos de litio, boro, potasio han sido identificados en 1976; pero no se conocía ni su extensión (horizontal y más que todo vertical) ni sus reservas y grado de renovabilidad. Para el salar de Uyuni solo se conocían algunos centímetros más superficiales de la salmuera subaflorante, así como la presencia de fuertes anomalías en la zona del río Grande de Lipez.

La adquisición de una máquina perforadora saca-testigos permitió de dar un nuevo enfoque al programa; los objetivos fueron entonces en prioridad:

- la localización en tres dimensiones de las zonas más favorables para la explotación de los elementos económicamente interesantes (Li, K, B, Mg),

- la evaluación de las reservas y la estimación de su grado de renovabilidad en caso de explotación.

Estos datos fueron presentados en 1989, en el marco del convenio UMSA-ORSTOM y Ministerio de Minas. El informe titulado estudio económico del salar de Uyuni (Risacher, 1989) detalla el método usado para la evaluación así como la repartición de los elementos con mapas de isovalores (fig. 8). Se definió las reservas totales en las salmueras del salar de Uyuni que son:

- litio = 8,9 millones de toneladas (reservas más altas conocidas en el mundo),
- potasio = 194 millones de toneladas,
- magnesio = 211 millones de toneladas,
- boro = 7,7 millones de toneladas, que también para estos elementos son muy elevadas.

Además se ha delimitado una zona más concentrada en estos elementos, en la costra superficial en la parte sur del salar, cerca la desembocadura del río Grande de Lipez (fig. 9). Es una anomalía geoquímica producida por los aportes del río Grande de Lipez desde hace 10 000 años. Sin embargo no es renovable; una vez agotada habrá que explotar salmueras netamente menos concentradas en otros lugares del salar.

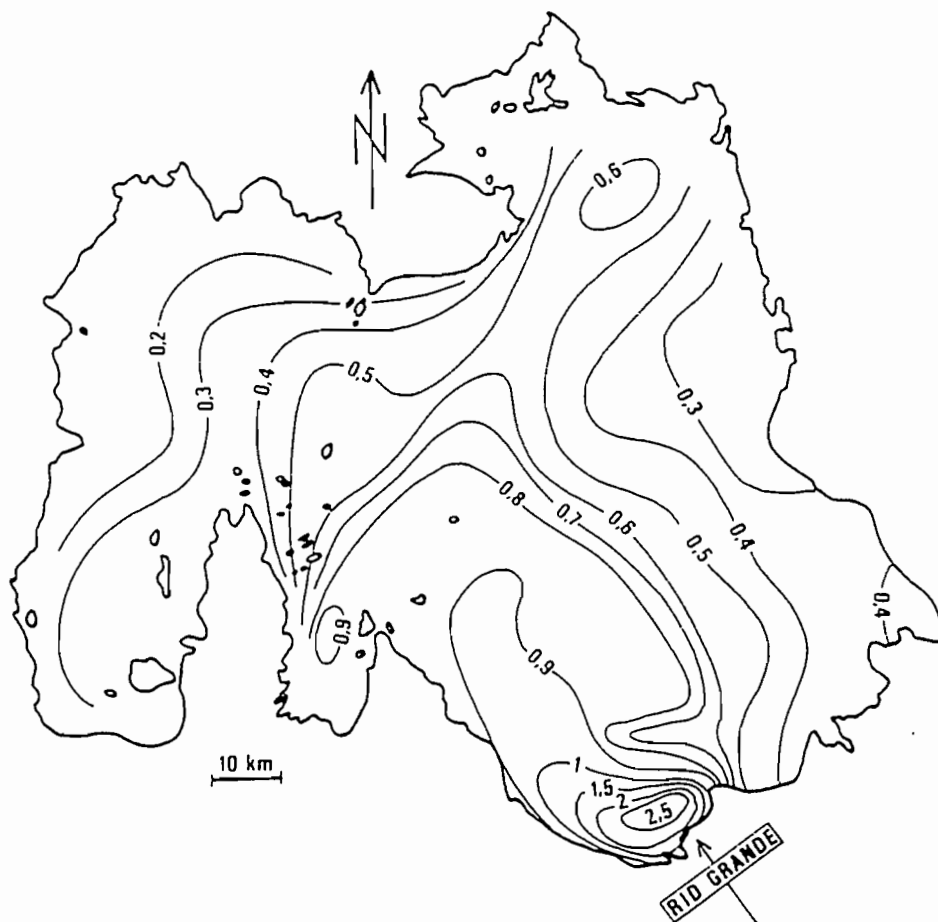


Fig. 8: curvas de isoconcentraciones promedio en litio ( en g/l) de la salmuera intracrustal del salar de Uyuni (Risacher, 1989)



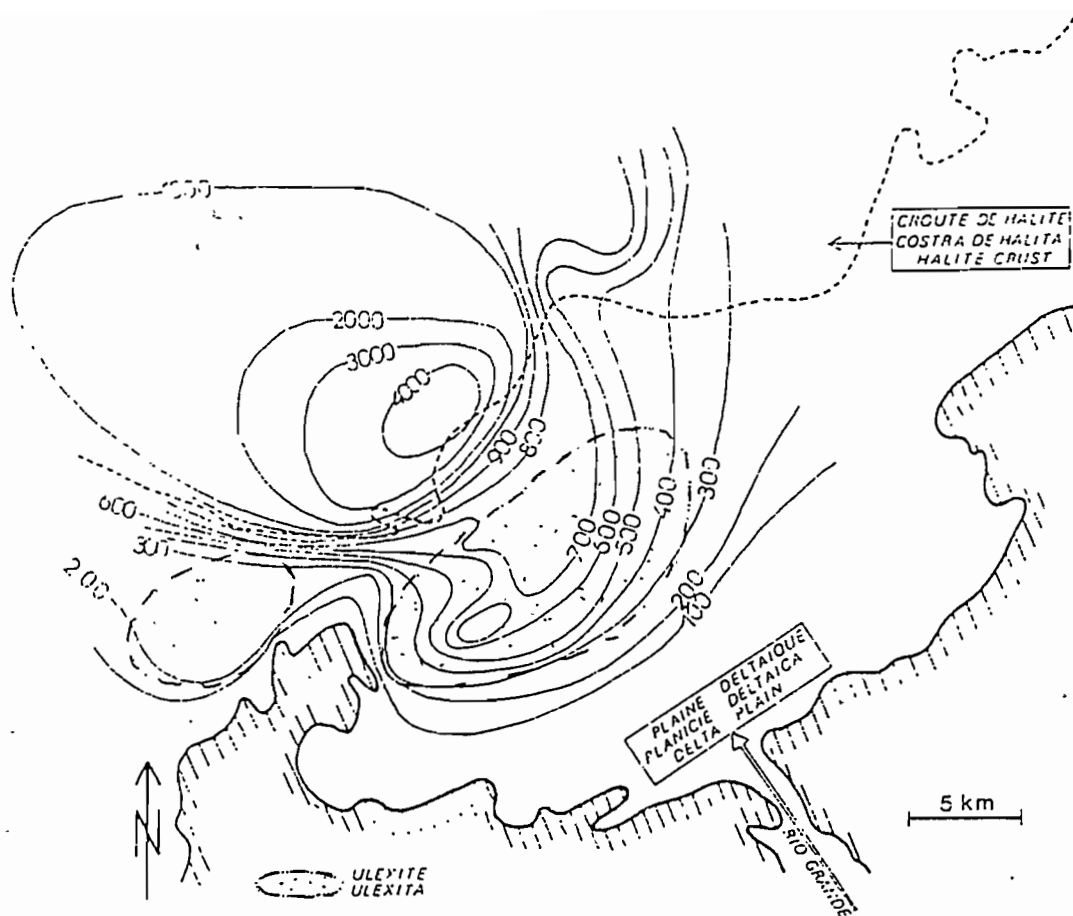


Fig. 9: curvas de isoconcentraciones en litio (en mg/l) de la salmuera superficial en la zona del delta del río Grande de Lipez, (Risacher, 1989).

El conjunto de datos adquiridos permitió también el estudio científico de estos salares (Risacher, 1992) logrando a explicar su modo de formación y de concentración de los elementos químicos.

Las dos extensas costras salinas provienen de la desecación hace 10 000 años de un amplio lago salado: el lago Tauca; las costras descansan sobre sedimentos lacustres impermeables. Su mayor espesor es de 11 m a Uyuni y 2 m a Coipasa; los sales son principalmente la halita (NaCl o sal común a 95%).

La composición química del paleolago Tauca ha sido estimada de dos maneras: (1) disolviendo todas las sales y salmueras de los salares en el volumen de agua del antiguo lago, y (2) simulando la evaporación de los principales ríos actuales de la cuenca de drenaje. Las dos composiciones químicas así obtenidas son muy diferentes: las concentraciones en Li, K, Mg y B obtenidas por disolución de los salares son 5 a 50 veces inferiores a las concentraciones obtenidas por la simulación de la evaporación de las aguas diluidas actuales del Altiplano. Sin embargo, las concentraciones en Na y Cl son similares en los dos casos; eso sugiere o sea una pérdida de los elementos Li, K, Mg y B por infiltración después del secamiento del lago o sea un gran exceso de cloruro de sodio en el paleolago Tauca.

Para investigar esta anomalía un sondeo de 121 m de profundidad ha sido perforado en la parte central del salar de Uyuni (fig. 10). Se han encontrado 12 costras de sales separadas por 11 niveles de sedimentos limosos. En la mitad inferior del perfil,

espesas costras de sales alternan con delgados niveles de sedimentos limosos. Más arriba, los niveles limosos aumentan de espesor y presentan nítidos rasgos lacustres mientras que el espesor de las costras salinas disminuye.

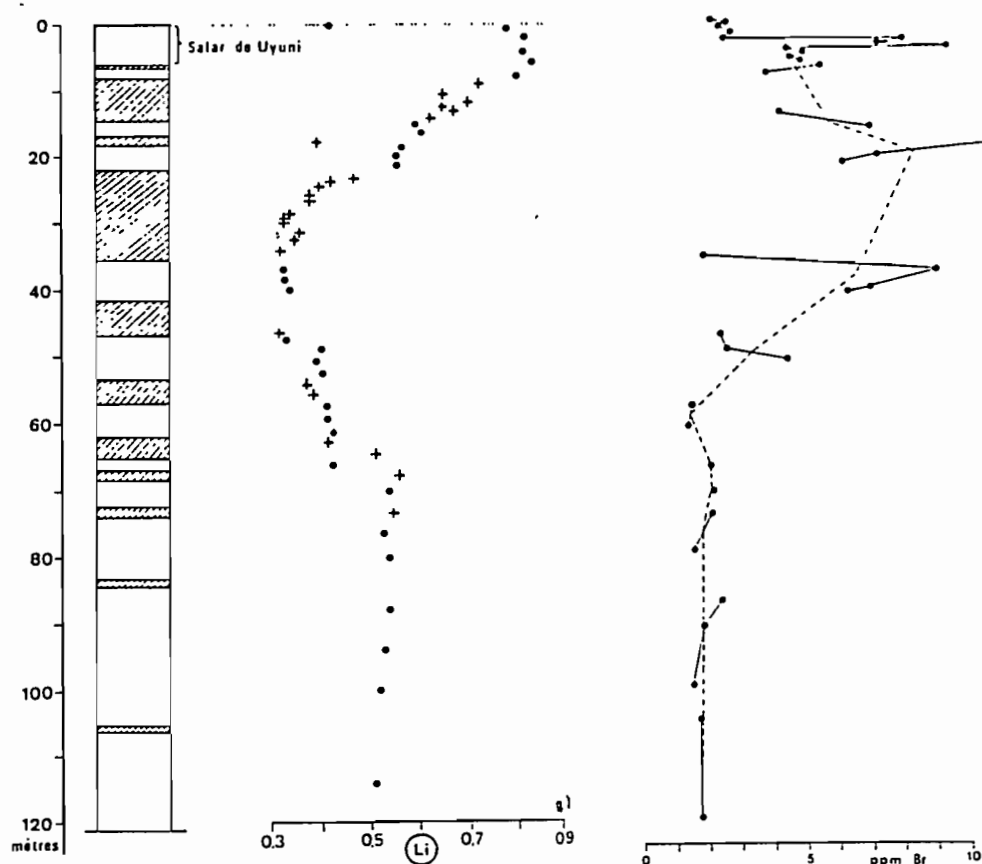


Fig. 10: el sondeo profundo en el salar de Uyuni. En blanco: costras de sal; con rayas: niveles lacustres. Las leyes de litio son figuradas por círculos para las salmueras asociadas con las costras salinas y por cruces para las salmueras intersticiales de los sedimentos lacustres. También figura el contenido en bromo de las costras de halita; el contenido promedio es marcado por una línea punteada. (Risacher, 1992)

La geoquímica del bromo y el ratio Br/Cl han dado resultados para entender la historia de estas costras de sal. En efecto el contenido de bromo de la halita de todas las costras varia de 1,3 a 10,4 ppm (fig. 10). Tales concentraciones muy bajas indican que la halita no puede haber precipitado a partir de las aguas que drenan las formaciones actuales de la cuenca, que presentan altos ratios Br/Cl.

El descubrimiento de halita con muy bajo contenido de bromo (2 ppm) en un diapiro de yeso de la cuenca de drenaje indica que la mayor parte de la halita depositada en el Altiplano central proviene de la lixiviación de antiguas formaciones salinas de tipo diapirico.

Entonces la composición muy especial del antiguo lago Tauca se debe a un fuerte exceso de cloruro de sodio, transmitido de un lago al siguiente y no a una pérdida de Li, K, Mg por infiltración de la salmuera residual en los sedimentos lacustres.

## **2.4. Los yacimientos detríticos de oro y sus fuentes primarias.**

Una parte importante de la producción de oro de Bolivia procede de la explotación de los placeres; estos placeres se distribuyen en todo Bolivia pero es en la Cordillera oriental que son los más numerosos.

Los estudios realizados han mostrado que se puede distinguir varios tipos de placeres que difieren en su modo de formación (Hérail et al., 1991). La mayoría de los placeres son de origen fluvial pero existen también importantes placeres de origen glacial (Suches) y más pequeños placeres de origen eluvial. Generalmente estos placeres están asociados a un solo evento geológico (placeres monogénicos) tal como la erosión de una mineralización primaria. Sin embargo, los más importantes y los más ricos presentan generalmente de una historia más compleja y más larga, con la sucesión de varias fases de sedimentación entrecortadas por fases de erosión y remobilización del sedimento, que provocan generalmente un aumento de las tenores en oro (placeres poligénicos).

### **2.4.1. El placer de Tipuani-Mapiri**

Es un ejemplo de placer poligénico cuya formación está controlada por la evolución tectónica de los Andes y en particular del frente amazónico de la Cordillera Real y de la zona subandina.

Su estudio proporcionó entre otro, informaciones sobre - el modo de deposición del conglomerado aurífero (Formación Cangallí) y su edad, lo que permitió establecer criterios seguros de reconocimiento del paleocauce, - el origen de las partículas de oro, su evolución morfosférica y químicas y los mecanismos que condicionan su concentración. (Fornari et al, 1986; Viscarra, 1986; Miranda, 1988; Hérail et al., 1986; 1989; 1990).

La cuenca de Tipuani-Mapiri se presenta como una cuenca intra-montaña de forma alargada, desde la región de Apollo-Aten hacia el norte de Coroico, es decir algunos 200 km de largo por un ancho que no pasa los 30 km; este alargamiento NE-SW, según el rumbo estructural de los Andes, es ligado al levantamiento tectónico de los relieves de la Cordillera Real al SW y a la propagación del frente tectónico andino hacia el Este. La tectónica de cabalgamiento en el subandino provocó el levantamiento de la Serranía de Carura que actuó como una barrera, aislando la cuenca de Tipuani-Mapiri y facilitando la acumulación de los sedimentos detríticos de la Formación Cangallí (cuenca de tipo piggy back; Fornari et al., 1987).

La edad de la Formación Cangallí, a podido ser determinada precisamente gracias al descubrimiento de una toba volcánica levemente retrabajada en su parte superior, la toba Chotalotuni, cerca de Vilaque (Hérail et al., 1994). Determinaciones K/Ar sobre biotitas dieron edades de  $\approx 8$  Ma, pero planteaban un problema debida a la discrepancia con las edades obtenidos de los feldespatos. Recientemente se ha podido realizar edades  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  por fusión láser sobre monocristales que dieron edades bien concordantes de 7,79 Ma sobre feldespatos y 7,96 Ma sobre biotitas. Esta toba se localiza más o

menos a la base del tercio superior de la Formación Cangallí. En base a consideraciones más regionales, la Formación Cangallí se depositó después de una importante fase de levantamiento de la Cordillera Oriental que produjo el encajonamiento de los valles que contienen los sedimentos. Este levantamiento empieza mas o menos después de  $\approx 11$  Ma (Hérail et al., 1993) según datos de la vertiente altiplánica. El represamiento de la cuenca que provoca el colapso de los paleovalles se debe a la activación de los cabalgamientos del frente subandino que se produjo alrededor de 10 Ma y siguió activo después de los 7 Ma.

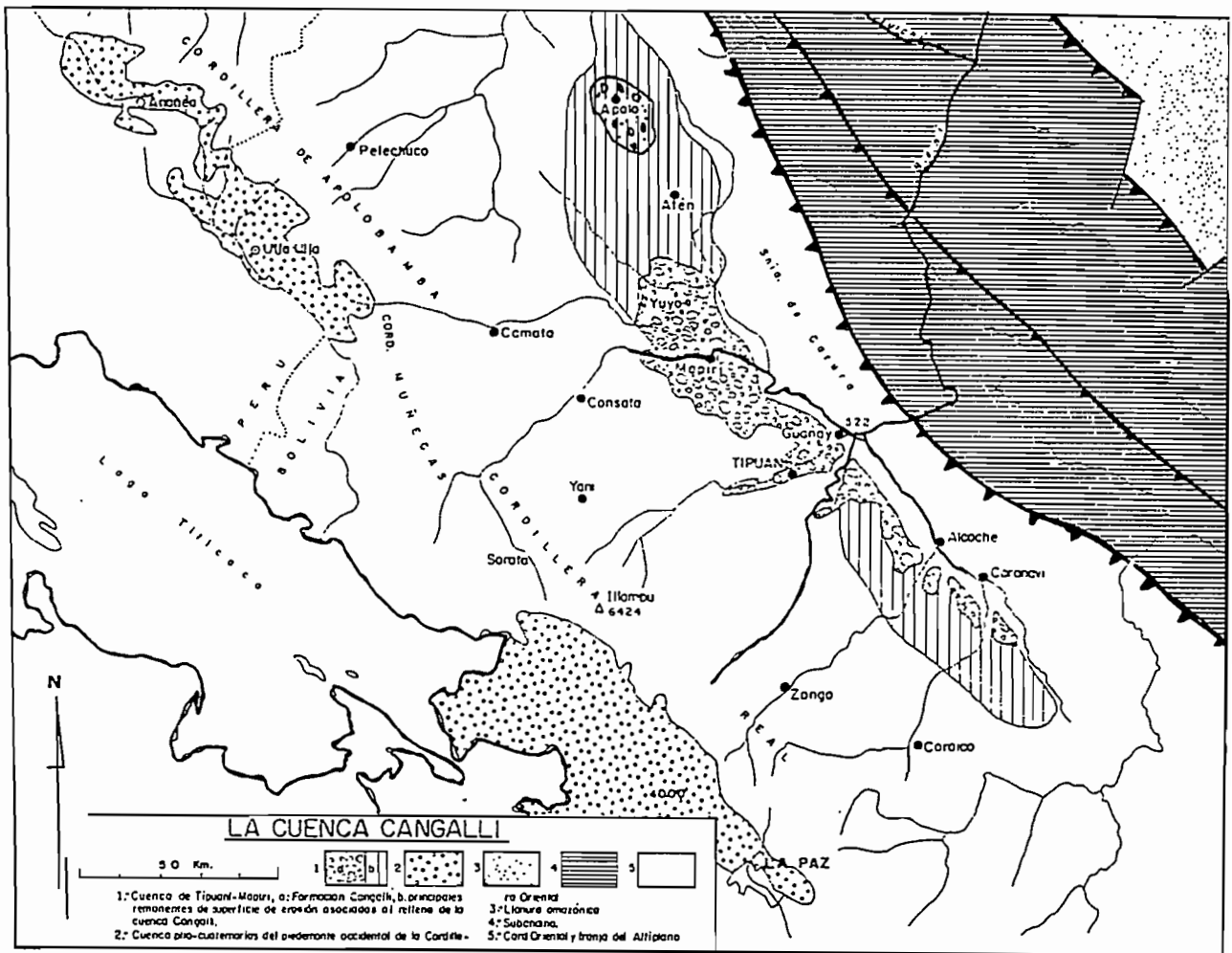


Fig. 11: mapa de localización de la cuenca de Tipuani-Mapiri.

Los sedimentos cenozoicos de la Formación Cangallí están conservados únicamente en la parte central de la cuenca; corresponden a sedimentos detríticos continentales, constituidos principalmente de conglomerados fluviales. Cubren cuarzitas y pizarras del Paleozoico inferior, relleno una paleotopografía muy acentuada, reflejo de un rápido levantamiento de la parte cordillerana. Esto explica los importantes cambios de espesor (de 0 a 500 m) y los numerosos cambios de facies de la Formación Cangallí.

Los aspectos del conglomerado Cangallí varían bastante según que se depositarón valles principales alimentados por la Cordillera o en valles secundarios con cuencas vertientes de extensión reducidas tal como el paleoMaríopo (fig.12). Además las facies sedimentarias cambian de aguas arriba hacia aguas abajo.

En la parte aguas arriba de los paleovalles que proceden de la cordillera, el sedimento consiste en conglomerados fluvio-torrenciales, con bloques grandes y un material poco ordenado, con clastos de granito y metamórfitas de la Cordillera, mezclados con esquistos y cuarzitas del Ordovícico de procedencia local; hacia el tope, el tamaño promedio de los clastos disminuye así como la abundancia de los clastos graníticos y metamórficos.

Aguas abajo, pasan a conglomerados nítidamente fluviales, con un material menos grueso y bien redondeado, dispuestos en canales; los clastos son bien imbricados, constituidos mayormente por elementos que proceden del Ordovícico, a excepción de algunos clastos de granitos que provienen de la Cordillera; también aparecen facies de llanura de inundación.

Lateralmente, cerca a los paleovertientes, existen facies de coluvios compuestos de bloques y clastos poco desgastados de pizarras ordovícicas en una matriz areno-arcillosa de color rojo. Estos depósitos corresponden a aportes de origen local.

También existen localmente facies de empantanamiento que están conformados por capas de arenas y arcillas gris-azulado, que contienen restos de vegetales (a veces muy abundantes y con capas de lignito). Hacia el eje del valle principal estas arcillas se interstratifican con los capas conglomerádicas, mientras que del lado de la vertiente rocosa se mezclan con los coluvios. Se trata de sedimentos depositados en llanuras de inundación laterales a partir de desbordamientos de los ríos principales.

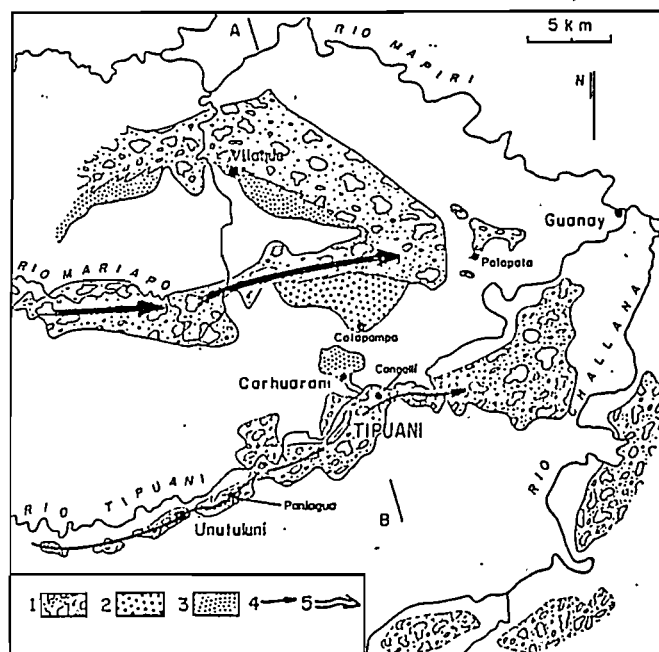


Fig. 12: repartición de las facies de la Formación Cangallí. 1: facies fluvio-torrenciales y fluviales, 2: facies conglomerádicas de riachuelos y desparrames de pie de vertiente, 3: facies areno-arcillosas de llanura de inundación y ambientes palustres, (Hérail et al., 1987).

La cuenca de Tipuani-Mapiri no muestra en su parte más distal facies lacustre, entrampadas detrás de los relieves de la Serranía de Carura, lo que indica que nunca fue endorréica.

El tope del relleno de la deposición de la Formación Cangallí corresponde a una superficie de erosión que, en los bordes de la cuenca, recorta a los afloramientos del Paleozoico y queda bien conservada en los interfluvios, mientras que más en el centro de la cuenca, está cubierta por los aluviones de la más alta terraza de los ríos principales (Challana, Tipuani, Mapiri); en sitios con ríos locales (Mariapo) está cubierta por abanicos detríticos muy amplios (Formación Chimate). Al norte del valle de Mapiri, en la misma posición estratigráfica y geomorfológica que la Formación Chimate están conservados los sedimentos de la "Altiplanicie de los Guarayos" (Miranda, 1988).

Por acción meteórica se desarrolló a partir de esta superficie (situada en los alrededores de 1000 a 1100 m de altitud) un perfil de alteración fuertemente rubefiado de unos cien metros de potencia; este fenómeno permitió explicar la superposición de un denominado "Cangallí rojo" sobre "Cangallí azul" como un rasgo posterior a la deposición del Cangallí.

Es también a partir de esta superficie de erosión que se ha desarrollado la red hidrográfica actual. La amplitud de la disección cuaternaria (500 m de desnivel entre el nivel de la paleosuperficie y el lecho actual de los ríos) explica porque las terrazas aluviales están conservadas sólo bajo la forma de remanentes, "plataformas", de algunas hectáreas, escalonadas a lo largo de los ríos Tipuani, Challana o Mapiri. Generalmente están constituidas por un conglomerado fluvial, compuesto de canales con clastos y bloques más gruesos hacia la base y pasando hacia arriba a un encape de sedimentos arcillo-areniscosos y tapado por coluvios.

Estas terrazas, así como los sedimentos del lecho actual, se caracterizan por un mayor contenido de clastos graníticos que en la Formación Cangallí, lo que indica que en la zona de la Cordillera la erosión había llegado a cortar ampliamente los granitos.

La concentración y la distribución del oro son directamente asociadas con estas diferentes etapas de deposición, erosión y retrabajo de los sedimentos.

Es así que en la Formación Cangallí tenores muy elevados (varios g/m<sup>3</sup>) se encuentran en los canales conglomerádicos del fondo de los paleovalles, cerca de su eje, al contacto del bed-rock o en la base de canales gruesos ("veneros").

En la parte aguas arriba estos canales son numerosos y cercanos unos a otros mientras que hacia aguas abajo las leyes disminuyen porque estos canales son menos ricos y, más que todo, menos numerosos y más dispersos en la serie. Esto se explica por el aumento del ancho del paleovalle cuando se aleja de la zona de cañones cercana a la cordillera. El mismo fenómeno se produce con el tiempo, a medida que la colmatación de la cuenca va avanzando, porque los canales son más distantes uno de otros debido al aumento del ancho del fondo del valle recorrido por las aguas (fig. 13).

También se debe tomar en cuenta la morfología del paleovalle y su evolución en el curso del relleno porque ciertas estructuras geomorfológicas pueden provocar

modificaciones locales y momentáneas en trazado del eje del cauce. Se deben identificar los lugares donde el fondo del paleovalle es demasiado estrecho, porque en estas gargantas, debido a la fuerte energía de las aguas, el oro no ha podido acumularse, sino que ha sido transportado en otros lugares más favorables.

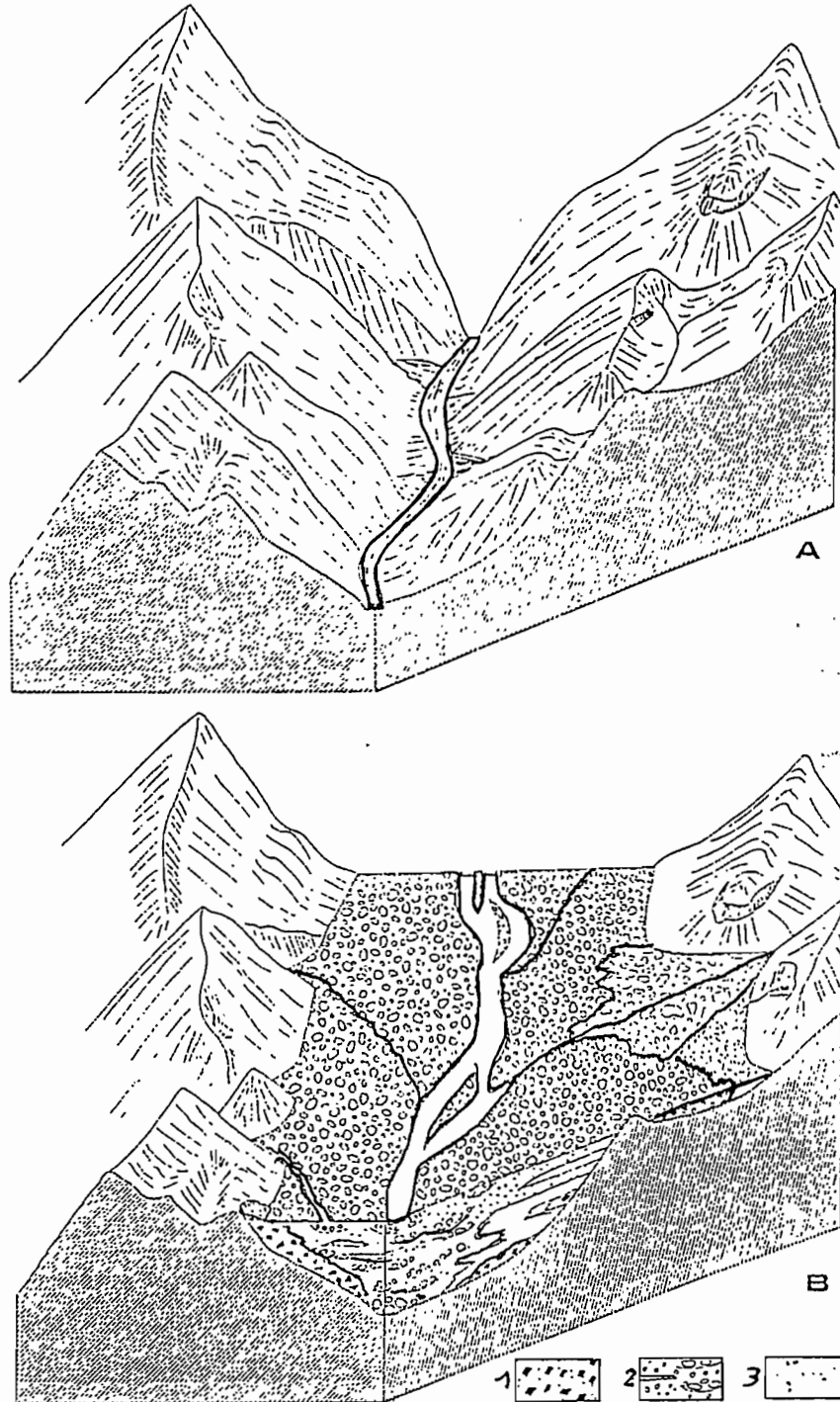


Fig. 13: bloque diagrama esquematizando las diferentes etapas de deposición de la Formación Cangallí. A: disecación fluvial y formación de la red hidrográfica, cuyo río principal es el paleoTipuani (paleocauce). B: aspecto del valle al final de la deposición Formación Cangallí, con la repartición de las facies de 1: falderios, 2: sedimentos fluviales, 3: arcillas y limos, (Hérial et al., 1988)

Los sedimentos de las terrazas (plataformas) y del lecho actual forman la segunda fuente de oro explotable en la cuenca de Tipuani-Mapiri. Las leyes son generalmente altas pero presentan importantes variaciones sea a la escala de algunos metros en el afloramiento, o sea a la escala de la terraza entera.

En los depósitos de terraza, cual sea su edad, la repartición del oro en un corte vertical sigue siempre el mismo patrón: se nota (1) un encaje superior de 3 a 5 m casi estéril en oro, formado por material fino de llanura de inundación o por coluvios locales, (2) una parte mediana de varios metros de espesor, donde el conglomerado esta organizado en canales, y que puede contener leyes de interés económico, (3) una parte basal, de 1 a 2 m que no difiera de la parte anterior sino por el tamaño más grueso de los clastos en los conglomerados situados al contacto con el bed-rock y donde las leyes son mas elevadas y pueden alcanzar varios  $g/m^3$ .

En los depósitos de los ríos actuales, la distribución del oro presenta los mismos rasgos que en las terrazas: si se toma por ejemplo la terraza baja cerca a Cangallí, se nota la presencia de una parte superior, compuesta de secuencias arenosas hacia arriba y conglomeradas hacia abajo, casi estéril (menos de  $100 mg/m^3$  en los conglomerados). Por debajo, un conjunto conglomeradico de base de unos 5 m de espesor, organizado en canales de varios metros de profundidad con clastos de 50 a 60 cm y algunos bloques de granito de 2 a 3  $m^3$ . En este material y más que todo cerca al bed-rock, la leyes superan frecuentemente varios  $g/m^3$  y a veces alcanzan  $10 g/m^3$ ; es ahí donde se encuentran las partículas de oro las más grandes.

El estudio de la morfoscopia y de la composición de las partículas de oro ha sido una herramienta muy útil para la obtención de datos que fueron usados tanto para identificar las áreas fuentes primarias como para reconstituir la evolución de la formación de los placeres (Hérail et al., 1990).

Sea cual sea la edad y las características de los sedimentos auríferos, la forma de las partículas de oro cambia durante su transporte hacia aguas abajo en el lecho de los ríos. Esta transformación se marca por un incremento del índice de aplastamiento, por la desaparición de los rasgos primarios tales como caras cristalinas y la aparición de rasgos morfológicos específicos tales como estrías, doblamientos, enrollamientos, etc.

Se ha podido mostrar que en sistemas fluviales donde hay un fuerte gradiente de pendiente, existe una relación entre los valores del índice de aplastamiento y la distancia de transporte de las partículas; este indicio con valores iniciales entre 2 y 4, alcanza  $\approx 9$  después de un transporte de mas o menos 30 km y  $\approx 15$  después de 60 km; luego el índice no se incrementa más porque los granos son tan aplastados que se doblan muy fácilmente.

Los rasgos morfoscópicos y la composición de las partículas dan también informaciones sobre los fenómenos que han ocurridos en la formación de un placer. Los cambios de composición química de las partículas no son relacionado con la distancia de transporte sino, más bien, con el camino recorrido; es así que, por ejemplo,



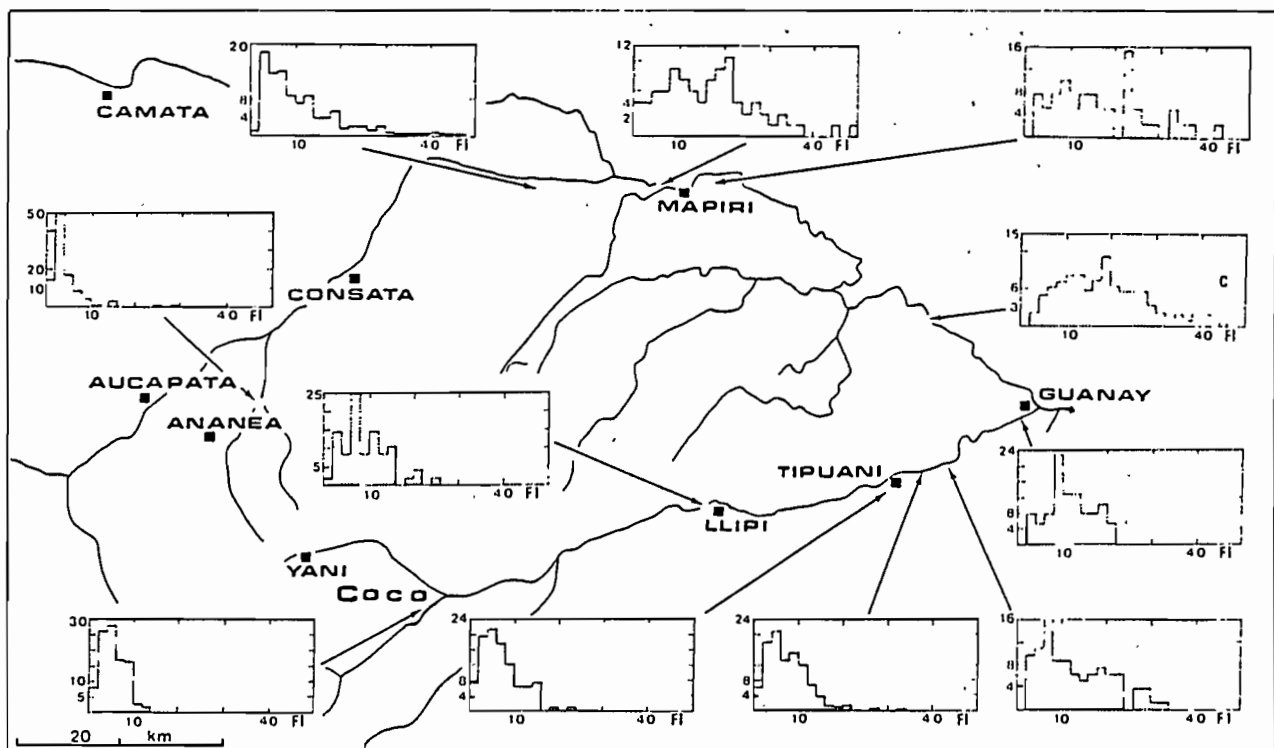


Fig. 14: histograma de los valores del índice de aplastamiento a lo largo de los ríos Tipuani y Mapi (Hérial et al., 1990).

Los rasgos morfoscópicos y la composición de las partículas dan también informaciones sobre los fenómenos que han ocurrido en la formación de un placer. Los cambios de composición química de las partículas no son relacionado con la distancia de transporte sino, más bien, con el camino recorrido; es así que, por ejemplo, en los sedimentos del lecho actual del río Tipuani se encuentran juntas partículas de oro que han seguido diferentes caminos:

- algunas muestran la misma composición que las mineralizaciones primarias del área de Yani y no presentan bordes depurados de plata; se puede entonces inferir que estas partículas han sido transportadas directamente por el río desde las zonas fuentes,
- otras presentan bordes externos depurados de plata (tal como la mayoría de las partículas encontradas dentro de la Formación Cangallí), lo que permite inferir que estas partículas no proceden directamente de las mineralizaciones primarias sino que son liberadas por la erosión de la Formación Cangallí, que, en este caso, actuó como colector intermediario de oro.

En ciertos casos, tal como en el caso del río Mariapo, cuya cuenca de drenaje está totalmente incluida en la cuenca de Tipuani-Mapi y no tiene conexión con las partes altas de la Cordillera se ha observado que junto a la mayoría de las partículas de oro muy transformadas y derivadas erosión de la Formación Cangallí, habían unas cuantas partículas con composición y rasgos morfológicos muy parecidos a aquellos de las mineralizaciones primarias; esto permitió descubrir una otra fuente primaria mas cercana, en el area de Chimate, localizada en vetillas de cuarzo dentro de pizarras negras del Llanvirniano, (Hérial et al., 1988 b).

#### **2.4.2. Trazado del "Cauce Antiguo" entre Unutuluni y el valle del río Capitán.**

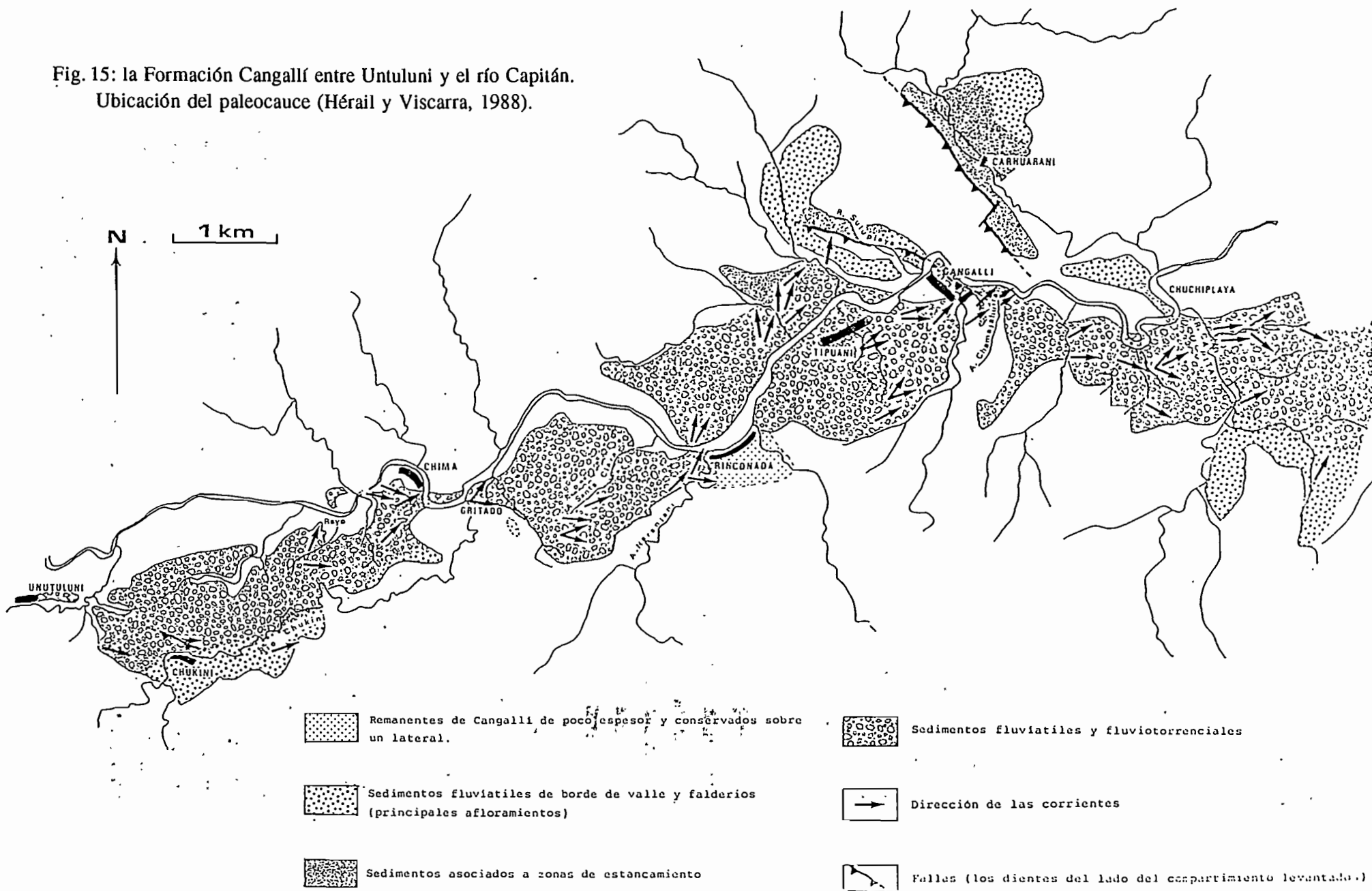
En la zona de Tipuani se ha podido reconstruir el trazado del "Cauce Antiguo" (Hérail y Viscarra, 1988a) lo que constituye un aporte importante porque es la única opción para el futuro de las explotaciones debido a que las dos otras posibilidades (1) las terrazas altas o plataformas tienen reservas y extensiones limitadas y (2) los sedimentos del lecho actual están en proceso de agotamiento. Por estas razones se planteaba la necesidad de prospectar nuevas reservas para que la actividad minera pueda continuar en esta zona.


Entre Unutuluni y Chima, (fig. 15 ) el trazado del paleovalle se puede definir a partir de datos de superficie, levantamientos en las galerías y cuadros de la antigua Compagnie des Mines Aramayo, levantamientos en los socavones de la zona de Chima-Tantacatu y galerías del grupo de Cooperativas mineras en Molleterío y Chima. En esta zona, la entrada del paleocauce se hace en Tujojahuira, dirigiéndose hacia los trabajos de interior mina desarrollados en la zona de la rampa Chuquini, donde sufre un ligero desplazamiento a ser cortado por una falla inversa orientada N110°E a N115°E. Más aguas abajo, su trazado está bien controlado, pasando por la rampa Orión, mientras que los cuadros Salter y Eureka fueron ubicados en su ladera izquierda. Un brazo secundario, asociado a un desborde, pasó por Rayó y San Miguel.


Entre Chima y el sector de Unificada 6 - Gritado - Saiyuani, el trazado del "Cauce Antiguo" puede ser definido por afloramientos y trabajos subterráneos, complementados por datos geofísicos. El cauce pasa al sur de la boca de la Mina Milagrosa y, probablemente, ligeramente al sur del cuadro de Chima. El cuadro Dorado se ubica, probablemente, al borde derecho del cauce. Sin embargo, en esta zona, afloramientos de peña permiten ubicar su flanco izquierdo. Más al este, datos de geofísica eléctrica vertical permiten localizar el paleocanal pero la profundidad indicada por este método parece muy exagerada como lo sugiere la reconstrucción puramente geométrica a partir de los datos de pozos.


En la zona de San Juanito-La Rinconada, el "Cauce Antiguo" se localiza fácilmente a partir de los trabajos desarrollados por la Cia Aramayo en el cuadro 60 y en el cuadro que se está perforando un poco más al Sur, en el arroyo Naranjani. El "Cauce Antiguo" se ubica a 84 m al sureste del cuadro 60 y el cuadro perforado por el GCM está localizado sobre la orilla sur del paleocauce, lo que permite una localización precisa. Las reconstituciones de dirección de escorrentía, hechas en esta zona, indican que el río se dirigía hacia el NE, pasando a la orilla izquierda del actual río Tipuani. En cambio, la presencia de importantes afloramientos de sedimentos depositados en ambientes de borde de valle en toda la zona situada frente a la Rinconada, en el área del arroyo Huichuko y en la del río Iscua, indican que toda esta zona estaba ubicada en una orilla del cauce. Las direcciones de escorrentía medidas en el Formación Cangallí, en la zona de Tipuani, permiten suponer que el "Cauce Antiguo" pasaba al sureste del actual río Tipuani. Al sur de Cangallí, en Chokapuncu, se observan los dos bordes laterales del paleorío, lo que permite una localización precisa del paleocauce.

Fig. 15: la Formación Cangallí entre Untuluni y el río Capitán.  
Ubicación del paleocauce (Hérail y Viscarra, 1988).





 Remanentes de Cangallí de poco espesor y conservados sobre un lateral.

 Sedimentos fluviales de borde de valle y falderios (principales afloramientos)

 Sedimentos asociados a zonas de estancamiento

 Sedimentos fluviales y fluviotorrenciales

 Dirección de las corrientes

 Fallas (los dientes del lado del compartimiento levantado.)

Entre el arroyo Cangallí y el arroyo Chamajahuira, la Formación Cangallí está bastante deformada mientras que, más al este, entre el arroyo Chaco y el río Capitán, el "Cauce Antiguo" puede ubicarse más fácilmente. En el valle del Capitán, la presencia de importantes facies de aportes locales en el margen sur, así como los afloramientos de peña que aparecen en varios lados, la reconstitución de las direcciones de corriente y la presencia de conglomerados muy gruesos hacen pensar que el centro del paleovalle está situado en los alrededores de San Miguel.

En el estado actual de los trabajos, es muy difícil dar, con precisión, los rasgos del perfil del "Cauce Antiguo", así como su profundidad en diversos puntos. Entre Tujojahuira y el Cuadro Orión, se puede tener una idea bastante clara del gradiente del paleoTipuani. Más aguas abajo, el fondo del paleocauce está más abajo que el curso del actual río Tipuani. Para el cuadro comprendido entre el Cuadro Orión y la Rinconada, si aceptamos que el Cuadro Orión y el Cuadro 60 alcanzaron el fondo del paleocanal y que el Cuadro Dorado está en un lateral, se puede afirmar que deben existir unas quiebras del perfil que se pueden explicar ya sea por problemas de erosión diferencial, ya sea por el efecto de fallas de rechazo poco importante (inferior a 10 metros).

A pesar de esta relativa imprecisión, la reconstitución de este perfil permite dar un margen de profundidad posible para el paleocauce y eliminar datos que podrían sobreevaluar esta profundidad. Más aguas abajo de la Rinconada, no se tienen buenas referencias para tener una idea de la profundidad. Sin embargo, vale la pena subrayar que es muy posible que la pendiente disminuya y que fallas inversas importantes, como las descritas en la zona de Cangallí-Chamajahuira, han acercado a la superficie el fondo del paleocauce.

#### **2.4.3. Exploración del "Cauce Antiguo" en la región de Cangallí.**

La cuenca Cangallí en la región de estudio (fig. 16) tiene una longitud aproximada de 4 km, con un ancho de 2 km (Thompson, 1992, Thompson, 1995 ined.). Está cubierta por sedimentos cuaternarios (terrazas) y rellenada por depósitos aluviales de la Formación Cangallí (Viscarra, 1986, Hérail et al., 1988) que descansa sobre un substrato ordovícico (intercalación de pizarras y cuarcitas).

El tope del relleno sedimentario se encuentra por encima de los 900 m.s.n.m. (zona de la Apachetilla), el lecho actual del río Tipuani está entre los 570 a 620 m.s.n.m. o sea unos 300 m más abajo del tope de relleno. Esta diferencia muestra un profundo encajonamiento, lo que provocó una fuerte disección de los sedimentos conglomerádicos.

En general, en esta parte el fondo del paleocauce está por debajo del nivel actual del río Tipuani. Tiene una pendiente longitudinal moderada: en este trabajo se estableció que la pendiente en esta parte del paleorío varía entre 2° y 3° (5% de pendiente), lo que no corresponde a una pendiente de deposición, sino que integra a la deformación tectónica post-Cangalli que afectó la cuenca.

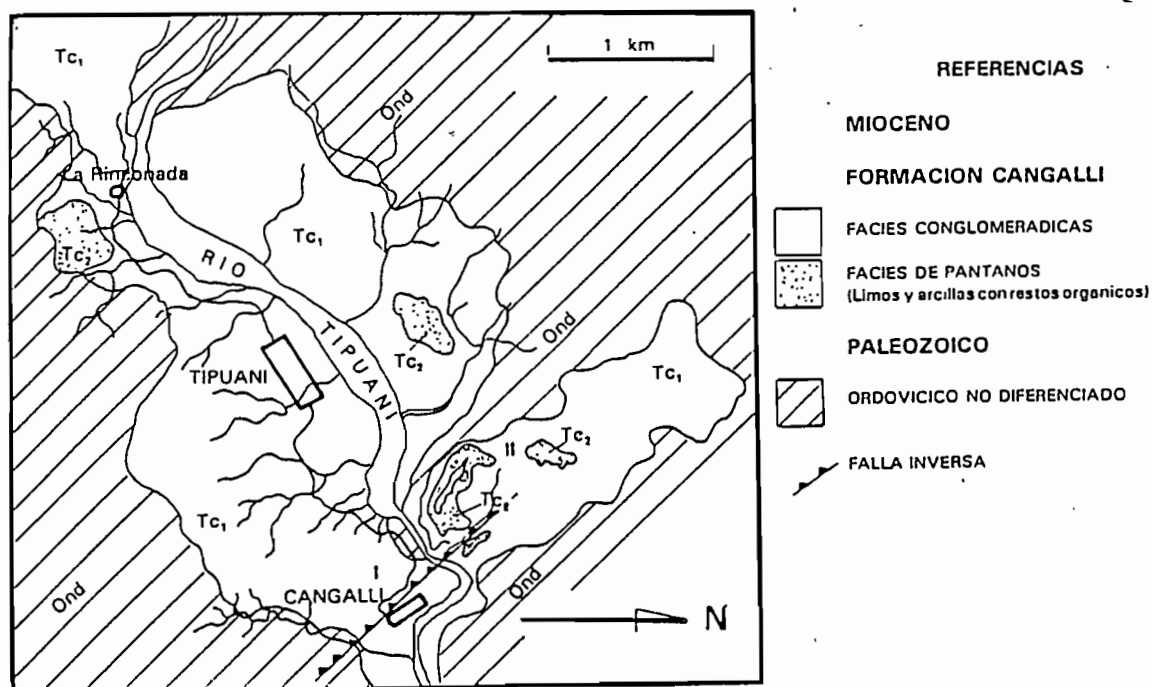


Fig. 16: la Formación Cangallí en la región de Tipuani-Cangallí, (Thompson, 1995).

Posteriormente a la deposición de la Formación Cangallí, siguen períodos sucesivos de erosión y disección de la cuenca, que forman el drenaje actual, entrecortados por períodos en el transcurso de los cuales se formaron las diferentes terrazas y depósitos cuaternarios. Esta disección marcada por el desnivel entre las terrazas antiguas y el lecho actual, produjo un encajonamiento del río Tipuani.

La disposición estratigráfica y las características sedimentarias de la Formación Cangallí varían tanto a escala regional, como local.

La disposición estratigráfica y características sedimentarias a escala local, están en función de las características topográficas del paleovalle donde han sido depositados los materiales. En la primera sección, levantada en el Cuadro Cangallí, (fig. 16, I) se han ubicado 12 secuencias sedimentarias positivas, en un espesor de 222 m, la última en contacto con el basamento ordovícico, en una discordancia fuertemente erosiva. La disposición de las secuencias y estructuras sedimentarias observadas, muestra que los canales se encuentran en mayor proporción hacia la base, separados por una distancia menor que hacia el tope (fig. 17).

La segunda sección levantada en la región de Iscua (fig 16, II), ubicada en el borde del paleovalle (margen izquierdo), muestra características diferentes a la anterior. En esta sección se observan 4 secuencias sedimentarias. La evolución se inicia con la deposición de sedimentos fluviales de un afluente local de la cuenca, posteriormente se depositan los sedimentos finos (limos y arcillas) de ambientes pantanosos, con influencia de aguas y sedimentos del paleorío principal (desbordes), con lentes conglomerádicos y clastos "flotantes" de cuarcitas, pizarras y canales arenosos, cubiertos por secuencias conglomerádicos de ambientes fluviales de poca energía.

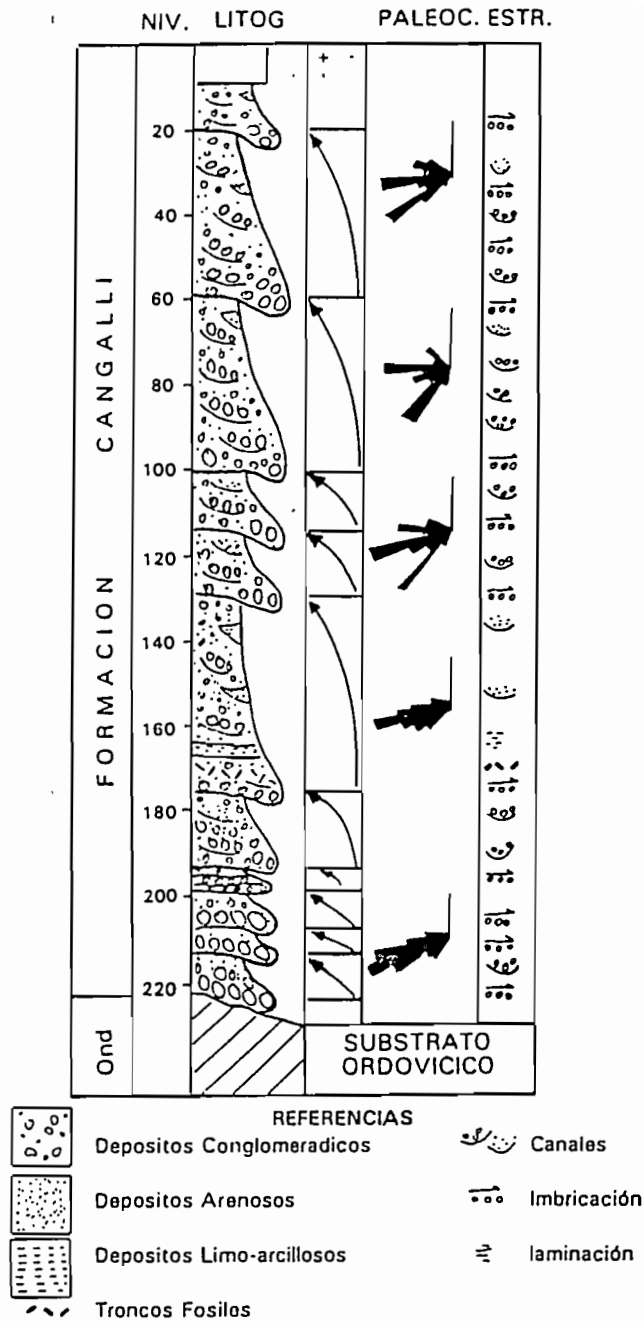


Fig. 17: sección estratigráfica de la Formación Cangallí en el centro del paleocauce en la región de Cangallí, (Cuadro Cangallí, Thompson, 1995).

Con estas observaciones podemos concluir que la Formación Cangallí presenta las características típicas de una sedimentación de un ambiente fluvial, pero su estratigrafía varía de una zona a otra, condicionada a diferentes factores como la pendiente, aporte de sedimentos, energía y geometría del paleovalle en el momento de su deposición. Todos estos factores nos han permitido estructurar el yacimiento desde el punto de vista geológico, el mismo que implica sobre la distribución del oro.

La medida de las direcciones de las paleocorrientes se hicieron en los afloramientos de la Formación Cangallí y los fondos de canal de las diversas secuencias, y muestran una dirección preferencial entre N 71° a N 84°.

La Formación Cangallí es una formación sintectónica, depositada en los paleovalles que fueron excavados consecutivamente al levantamiento de la Cordillera Oriental; la depositación de los sedimentos se produjo como consecuencia del levantamiento de la Serranía de Carura y del Subandino.

Esta tectónica esta marcada a escala local por la presencia de estructuras anticlinales, sinclinales y fallas en los conglomerados. Los datos microtectonicos, dan como resultado un esfuerzo compresivo subhorizontal orientado N50°E, donde aparecen pliegues y fallas orientadas NW-SE (Viscarra, 1986, Hérail et al., 1988).

En la zona de Suluplaya-Cangallí la deformación es intensa. Se observa una falla inversa que corta transversalmente al cauce antiguo, con una dirección general de N130°/25°SW (fig. 15). En el margen izquierdo del río Tipuani, los sedimentos de la Formación Cangallí, conservados sobre la loma de Chakapunku están plegados y poseen un buzamiento de 30° al SW.

En el Cuadro Cangallí esta tectónica se manifiesta, a escala microtectonica, con clastos fracturados y punzonados en los niveles -195 y -213. También se notan pequeñas fallas inversas, donde el basamento ordovícico "cabalga" a los sedimentos conglomeradicos en los niveles -213 y -231 (fig. 18), y se observan espejos de falla, milonitas y planos de falla orientados en N130°/40°. Estas corresponden a las fallas antitéticas de la falla principal, con rechazos no mayores a los 10 m.

Todas estas fallas inversas generalmente se producen a lo largo de los planos de estratificación del basamento ordovícico, razón por la cual en superficie es difícil ubicarlas.

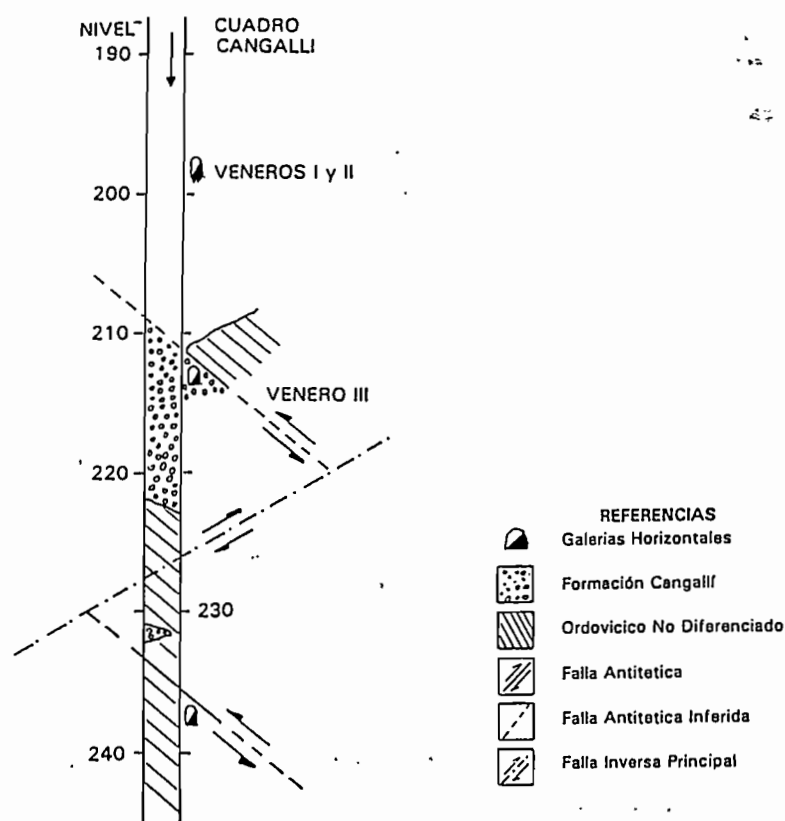


Fig. 18: tectónica en los niveles inferiores del Cuadro Cangallí (Thompson, ined.).

La tectónica local observada en el Cuadro Cangallí (fig. 18) produce efectos de plegamiento en los sedimentos conglomeradicos, pues los horizontes mineralizados y veneros efectúan "subidas" y "bajadas" tanto en dirección longitudinal y transversal al paleocauce, donde no mantiene una pendiente constante y en muchos casos se producen "saltos". Estos desniveles afectan las labores de explotación, tanto en el paleocauce, como en los veneros, lo que produce que los horizontes mineralizados se encuentren en el "piso" o en el "techo" de la corridas al momento de ser explotadas.

Esta deformación que afecta a los sedimentos de la Formación Cangallí no afecta a los sedimentos cuaternarios (terrazas, llanuras aluviales, etc).

Para conocer la estructura y geometría del yacimiento, antes de escoger sitios favorables para la implementación de cuadros de exploración y/o explotación se hizo el estudio geológico descrito anteriormente, que fue completado por un estudio geofísico, destinado a describir la geometría del subsuelo, del contacto entre la Formación Cangallí y el substrato ordovícico.

Se utilizó el método de resistividades aparentes con un dispositivo cuadrupolar, (modelo Schulumberger). Se realizaron dos cortes, con 45 sondajes eléctricos, orientados de NE a SW, o sea transversal a la posible dirección del cauce antiguo.

Combinando los datos obtenidos por la geología de superficie (esencialmente sedimentología) y los datos obtenidos a través de la geofísica se propone el trazado del perfil del valle, y dar una aproximación de la profundidad del bed rock (fig. 19).

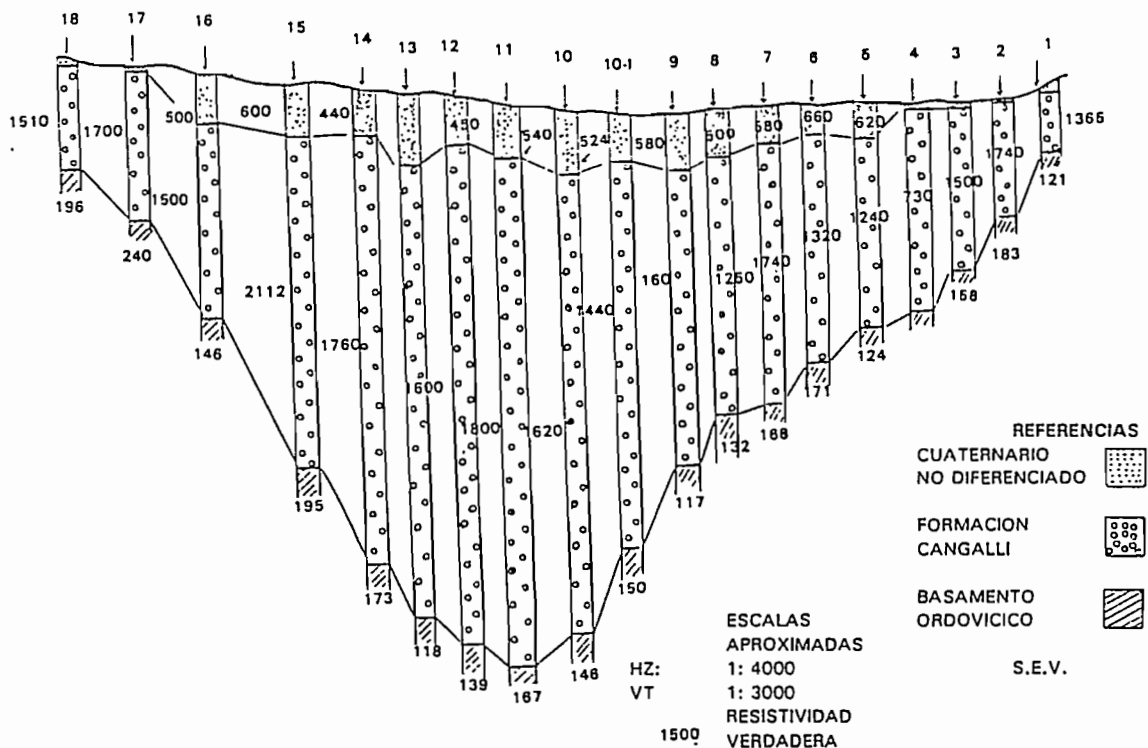


Fig. 19: geometría y profundidad del paleocauce, en base a los sondajes eléctricos.

En la región de Cangallí se ha determinado que el eje del paleorío tiene una profundidad media de 226 m y pasa a 450 m al SE del río Tipuani. Con todas las



profundidades obtenidas se calculo la pendiente longitudinal del paleorío en la zona de estudio, obteniendo un valor moderado de 3° o sea 5% de pendiente, lo que no corresponde a una pendiente de deposición, sino que integra la deformación post-Cangallí que afectó a la región.

Ubicación del cuadro Cangallí. La ubicación y profundidad del cuadro de exploración y/o explotación ha sido determinada en base a la posición del "Cauce Antiguo", deducida del estudio geológico, y de la prospección geoelectrica. Además, se tomó en cuenta las condiciones más fáciles de operabilidad, tanto minero, como geológico, y el cuadro fue ubicado a unos 30 m al Sur del SEV UC-11.

El objetivo principal que fundamenta el desarrollo de este cuadro es la determinación de secuencias u horizontes mineralizados o los denominados veneros a lo largo de las labores de profundización. Para conseguir este objetivo principal se ha seguido la siguiente metodología :

- seguimiento geológico-sedimentario en las labores de profundización, con el fin de identificar las secuencias atravesadas y medir sus parámetros geológicos, los mismos que están resumidos en la correspondiente columna estratigráfica del cuadro (fig. 16),
- muestreo sistemático de todo el volumen extraído o arrancado por los disparos efectuados. Las muestras extraídas se procesan totalmente, mediante una concentración gravimétrica en una criba vibratoria, con el fin de recuperar el oro,
- determinación de los tenores de oro en las diferentes secuencias atravesadas, así como también de los parámetros físicos de la matriz aurífera, recuperación de los minerales pesados para su posterior identificación,
- estudios morfoscópicos de las partículas de oro y la granulometría del oro recuperado para la instalación o mejoramiento del actual proceso de recuperación del oro cuando se entre en la fase de explotación.

La distribución del oro en esta parte es muy variable, ya que queda demostrado tanto en la práctica y observación que los minerales pesados en los yacimientos aluviales ofrecen una mayor concentración según la profundidad, ya sea cerca ó en la culminación de una secuencia sedimentaria o cerca del piso (Peña o Paleozoico).

A la conclusión de las labores de exploración del paleocauce en la región de estudio a través de la profundización de 252 m de cuadro, se han interceptado con esta labor tres estructuras importantes con tenores de varios g/m<sup>3</sup> (veneros) susceptibles de ser desarrolladas para su posterior explotación.

Estas estructuras son las siguientes:

Venero Nivel -195.

Venero Nivel -213,

Paleocauce Nivel -223.

Es necesario indicar, que entre estos horizontes mineralizados o veneros existen algunos otros niveles portadores de oro, con un bajo contenido menor a los 100 mg.

#### **2.4.4. El oro aguas abajo de la cuenca de Tipuani: río Kaka, Alto Beni, Beni.**

Aguas abajo de la cuenca de Tipuani, a lo largo del valle del río Kaka (Ramirez et al., 1992), Alto Beni, Beni y de sus afluentes que vienen desde la Cordillera tal como el río Tuichi, (Hérail et al., 1991) el oro está contenido en terrazas aluviales y en el lecho actual.

También algunos ríos, cuya cuenca de drenaje esta completamente en la zona sub andina, donde no existen mineralizaciones primarias, y sin conexiones directas con la Cordillera, que contienen oro (por ejemplo río Maniqui y Tejeque). En este caso el oro procede de la erosión de conglomerados mio-pliocenos (Formación Tutumo) muy pobre en oro, pero que sirvieron de colector intermedio para el oro.

Estos yacimientos que son parecidos los de las terrazas de la cuenca de Tipuani cambian poco a poco hacia aguas abajo con la disminución de pendiente del río y la granulometría del sedimento. Ya en Tomachi, (Ramirez, 1992), la repartición del oro es diferente, las leyes son generalmente mas bajas y la mineralización ya no se caracteriza por un fuerte enriquecimiento en el bed-rock; las leyes al bed-rock son altas pero se encuentran canales tan ricos o más ricos, varios metros mas altos en la serie. También disminuye el tamaño promedio de las partículas de oro.

En la llanura del Beni, el oro está presente más que todo a lo largo del río Madre de Dios. Al revés, los aluviones del río Beni son poco mineralizados entre Rurrenabaque y Riberalta donde el Beni alcanza al río Madre de Dios, y esto ocurre a pesar de la riqueza en oro de la parte cordillerana de su cuenca de drenaje. Los sedimentos auríferos son de edad pleistocena superior o mas frecuentemente holocena o actual. En la mayor parte de la cuenca los sedimentos cuaternarios descansan sobre sedimentos arcillosos del Mioceno superior mientras que hacia en noreste cubren directamente el zócalo precambriano.

Estudios a escala regional (Dumont et al, 1991) han mostrado que el sistema de sedimentación esta controlado por una sucesión de zonas con tasas de subsidencia o de surección diferentes de una a otra (fig. 20).

- Así a lo largo del Beni entre Rurrenabaque y Riberalta aparecen tres zonas:
- a la salida de la zona subandina una parte donde el río es poco sinuoso y donde se depositan los sedimentos gruesos y probablemente los minerales pesados, seguida aguas abajo por una zona de río muy sinuoso con riberas bajas,
  - una área donde el río, poco sinuoso, es bordeado por riberas altas ("alturas") a veces de mas de 20 m,
  - en fin una zona de sinuosidad elevada, con riberas bajas donde locamente se notan meandros recortados, se extiende hasta Riberalta.

No parece existir una zona tan subsidente al pie de los relieves del subandino a la salida del río Madre de Dios, lo que, quizás, explica la presencia de oro en todo su curso a lo largo de la llanura amazónica. También se nota que el curso del río Beni ha sufrido cambios recientes de orientación.

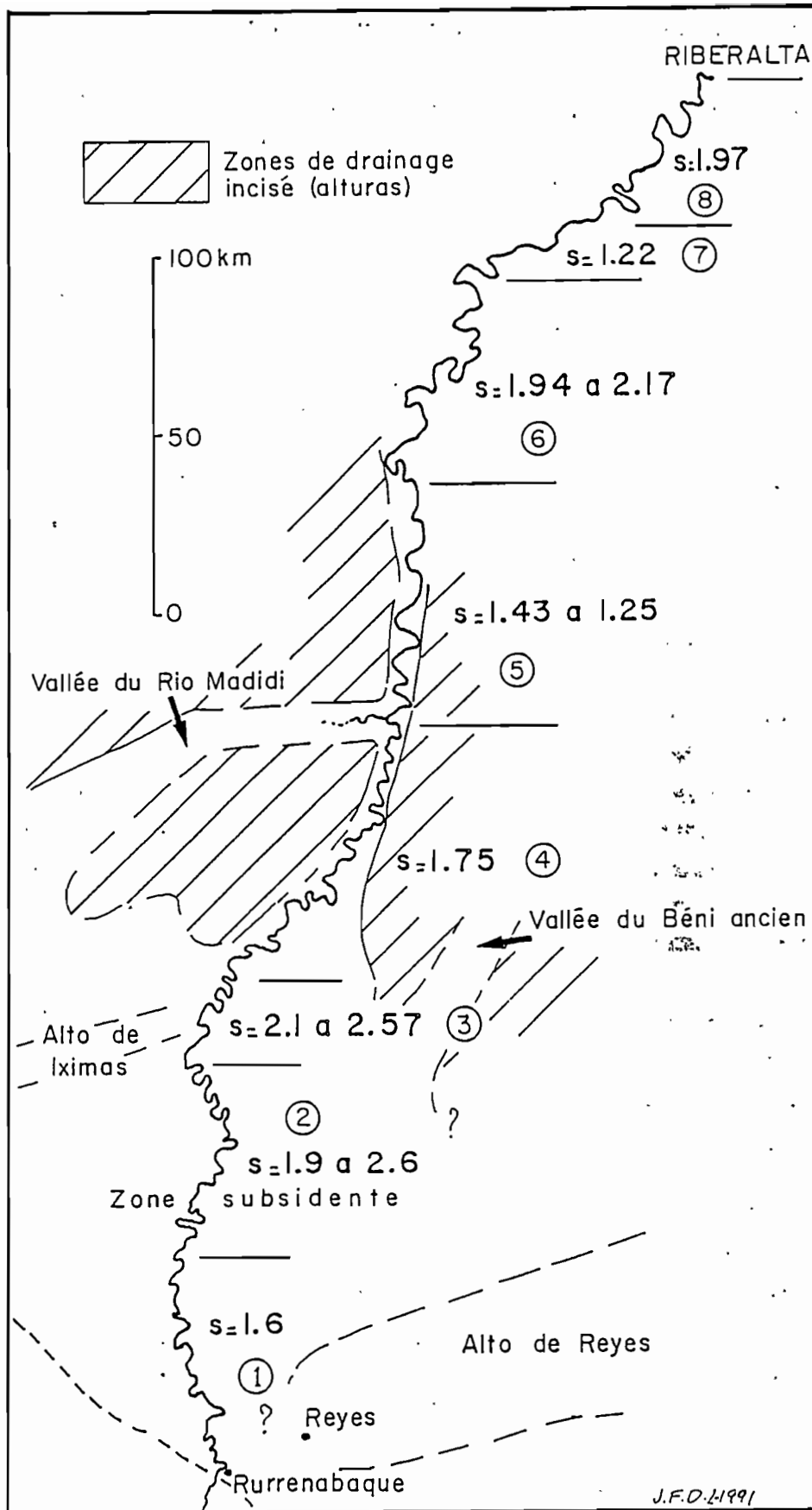


Fig. 20: principales características morfológicas del río Beni entre Rurrenabaque y Riberalta ( $s$  = índice de sinuosidad) (Dumont, 1991).

#### 2.4.5. Los placeres de la región de Soledad (Oruro)

En esta zona, de conocida tradición minera y donde actualmente se explota el yacimiento epitermal de Kori Kollo, la explotación de placeres es muy reducida. Se limita a la región de Soledad - Jankho Nuño y no se extiende más allá de Conchamarca porque las leyes disminuyen rápidamente desde el sureste hacia el noreste. Solo se trabajan materiales aluviales cuaternarios, de poco volumen, en el fondo de quebradas poco profundas que recortan los conglomerados miocenos de la Formación Kholllpana (Lizeca, 1990; Lizeca et al., 1990). El sedimento mineralizado explotado consiste en una capa de gravas y clastos de menos de 1 m de espesor cubierta por coluvios de varios metros de espesor.

El oro procede del retrabajo de los sedimentos de la Formación Kholllpana. La Formación Kholllpana es una serie detrítica conglomerádica compleja, en parte de origen sintectónico. Está compuesta por la mezcla de aportes derivados de la erosión de relieves donde afloraba el Siluro-Devónico, localizados principalmente al noreste, y cuyo levantamiento estaba mantenido por el funcionamiento de una falla de cabalgamiento y de aportes derivados de la erosión de cuerpos intrusivos dacíticos localizados el SSE de la cuenca. Las leyes de oro bajan rápidamente desde el sureste hacia el noreste y la morfología de las partículas de oro evoluciona en el mismo sentido, con partículas poco gastadas al sureste y partículas mucho más transformadas al noroeste. La micromorfología de las partículas poco transformadas por el transporte permite distinguir las partículas derivadas de la erosión de vetas de cuarzo y las partículas que proceden de formaciones volcánicas.

Además esta diferencia existe también a nivel de la composición química que muestra que las partículas de origen volcánica presentan una fineza más elevada que las partículas derivadas de las vetas de cuarzo. En las zonas más distales, donde el transporte ha borrado los rasgos morfológicos primarios solo el análisis químico del corazón de las partículas permite distinguir el origen del oro; en este sector parece que el oro de origen volcánico forma la mayor parte de las partículas.

La génesis de los placeres de Soledad refleja una evolución muy compleja. La fuente primaria es principalmente las mineralizaciones contenidas en rocas volcánicas miocenas que afloran al sur, pero, también las vetas de cuarzo encajonadas en el Paleozoico. La historia del oro detrítico empieza con la deposición de la Formación Kholllpana que contiene partículas de oro dispersas en el sedimento.

Esta Formación se depositó después de 15,9 Ma (contiene clastos de volcánitas de esta edad) y antes de 11 a 13 Ma. Cerca a Soledad la Formación Kholllpana, está cubierta en discordancia erosiva por una toba fechada en 5,2 Ma (Lavenue, 1986); esta toba se depositó después la erosión de unos 400 m de sedimentos de la Formación Kholllpana, en más o menos 6 a 8 millones de años.

Es solo en los aluviones de los glaciares que marcan el final de esta fase de erosión, o en sedimentos más recientes que se alcanzan leyes suficientes para justificar una explotación de modo artesanal.

#### 4.4.6. Los placeres de la región de Guadalupe y de Sur Lipez

En esta región no se conocen placeres muy voluminosos pero existen varios pequeños placeres que son explotados de manera temporal por los lugareños, solo el río San Juan de Oro fue objeto en el pasado, de un intento de explotación mediante draga.

El oro primario solo estaba conocido en vetas de cuarzo dentro del Ordovícico (a veces asociado con mineralizaciones de antimonio) mientras que en las rocas volcánicas cenozoicas solo estaba señalado en mineralizaciones epitermales (Sugaki et al., 1986). El oro no había sido detectado en prospecciones geoquímicas regionales (Esposito, 1984).

Los trabajos de geología y de prospección de oro detrítico realizados en la zona de los cerros Morokho y Bonete y luego en el área del cerro Lipez han permitido detectar la presencia de partículas de oro en las tobas de composición dacíticas y de edad mioceno (Fornari et al, 1989; Pozzo, 1990; Fornari et al., 1991; Héral et al., 1993; Ramos, 1993).

En esta región aflora un potente conjunto de rocas volcánicas que descansan ya sea sobre el Paleozoico inferior, o sobre formaciones sedimentarias detríticas cenozoicas (Formación Potoco, Formación San Vicente). El conjunto volcánico empieza por rocas básicas a andesíticas (Formación Rondal) de edad Oligoceno superior a Mioceno inferior, recubiertas en discordancia erosiva por las tobas, esencialmente de composición dacítica, asociadas a antiguos edificios volcánicos. Un conjunto detrítico de conglomerados fluviales con clastos derivados de la erosión de rocas dacíticas o de tobas ricas en litoclastos dacíticos, aflora ampliamente salvo en las zonas de paleorelieves altos y parece cubrir paleoglacis y paleovalles cavados por ríos temporales. Por encima de este conglomerado se depositó un potente conjunto de tobas que puede alcanzar 700 m de potencia y que forman mesetas particularmente bien conservadas en la zona del cerro Pabellón y de Torre Loma, en ribera derecha del río Guadalupe.

El muestreo realizado ha permitido encontrar oro en los sedimentos recientes del río Guadalupe, en numerosas quebradas laterales así como en los suelos y coluvios desarrollados sobre las tobas.

A lo largo de los ríos principales y con caudal permanente (como el río Guadalupe y el río San Juan de Oro), los placeres presentan una estructura clásica con un nítido enriquecimiento al contacto con el bed-rock. En cambio, en las pequeñas quebradas, en particular las que vienen de la meseta de cerro Pabellón hacia el río Guadalupe, los placeres corresponden a un sedimento menos organizado con niveles de concentración preferencial poco marcados. En fin, en las cabeceras de las quebradas y en las vertientes poco inclinadas que cortan las tobas existen pequeños placeres eluviales formados por la desagregación de la roca, principalmente por críoclastia, y la reconcentración casi in situ, de los minerales pesados y del oro por las escorrentías superficiales durante la estación de lluvia.

En base al muestreo sistemático de los aluviones del río Guadalupe, de los depósitos de fondo de quebrada y de los suelos sobre las tobas, una población

relativamente numerosa de partículas de oro ha sido recuperada, 592 de ellas han sido medidas y observadas en detalle.

Las partículas que proceden de los aluviones del río Guadalupe presentan una morfología característica de un transporte por río; están relativamente aplastadas, gastadas y con bordes redoblados; tienen una superficie martillada y frecuentemente estrías largas y estrechas. Sin embargo, el valor poco elevado (entre 3 y 6) del índice de aplastamiento muestra que las distancias de transporte son relativamente cortas.

En cambio las partículas de las quebradas laterales que cortan las tobas presentan una morfología diferente: muchas de estas partículas son casi esféricas; el índice de aplastamiento varía entre 1 y 4 y es más bajo (promedio de 1,8) en las partes aguas arriba de las quebradas. Además de su forma general subesférica las partículas no presentan doblamiento o estrías que podrían indicar un transporte largo por el agua. Observaciones al microscopio electrónico de barrido muestran un microrelieve ruiforma poco o no desgastado y en algunos casos formas, octaédricas de cristalización primaria perfectamente conservadas lo que indica que estas partículas no han sido transportadas.

Estas partículas de oro proceden entonces directamente de la erosión de las tobas.

Presentan también una composición química particular: se trata de oro casi puro, de finesa superior a 985‰; la plata es inferior a 1‰ y puede faltar completamente mientras que se notan trazas de Cu, Fe, As, Te y Hg.

Investigaciones desarrolladas más al oeste hacia el Cerro Lipez (Ramos, 1992; Ramos y Fornari, 1994), han permitido la recuperación de partículas de oro con las mismas características sobre otros niveles de tobas, lo que permite suponer que la emisión de oro por erupción volcánica fue un fenómeno relativamente general en la zona y no restringido a un aparato volcánico particular.

La presencia de oro en los fluidos hidrotermales asociados al volcanismo es un hecho bien conocido (ej. yacimientos epitermales) mientras que la emisión de partículas de oro durante los eventos volcánicos explosivos no ha sido documentada sino de forma excepcional tal como en el caso del volcán Mont Erebus (Meeker et al., 1991).

En el caso del volcanismo cenozoico del sur de Lipez, la presencia de este oro "magmático" plantea interrogantes sobre el comportamiento geoquímico del oro durante la diferenciación de los magmas dacíticos.

#### **2.4.7 El placer de Vilader.**

El placer de Vilader está ubicado cerca a San Antonio de Lipez, en la quebrada Condormayu, a una altura de 4 190 m, cerca a relieves conformados de lutitas y cuarzitas atribuidas al Ordovícico de la estructura Cocani-Relave, afectada por grandes fallas de cabalgamiento y de rumbo y que forma la parte meridional de la estructura en flor de Pululus. El Paleozoico está cubierto en discordancia por tobas pocas soldadas de probable edad Mioceno medio ( $\approx 12$  Ma).

Los aluviones mineralizados del placer se localizan en un abanico aluvial que en su parte inferior se interestratifica con una terraza (T2) del río Condormayu. Una terraza más joven (T1) se encuentra a unos 20 m por debajo de la terraza T2 y a unos 3 m encima del lecho actual del río. (Fornari y Ramos, 1991; Ramos, 1992; Ramos y Fornari, 1992; Ramos y Fornari, 1994).

Se nota que más aguas arriba en la quebrada no hay mineralización mientras que hacia aguas abajo, aunque se encuentran todavía partículas de oro, su abundancia decrece muy rápidamente por dilución con aportes estériles.

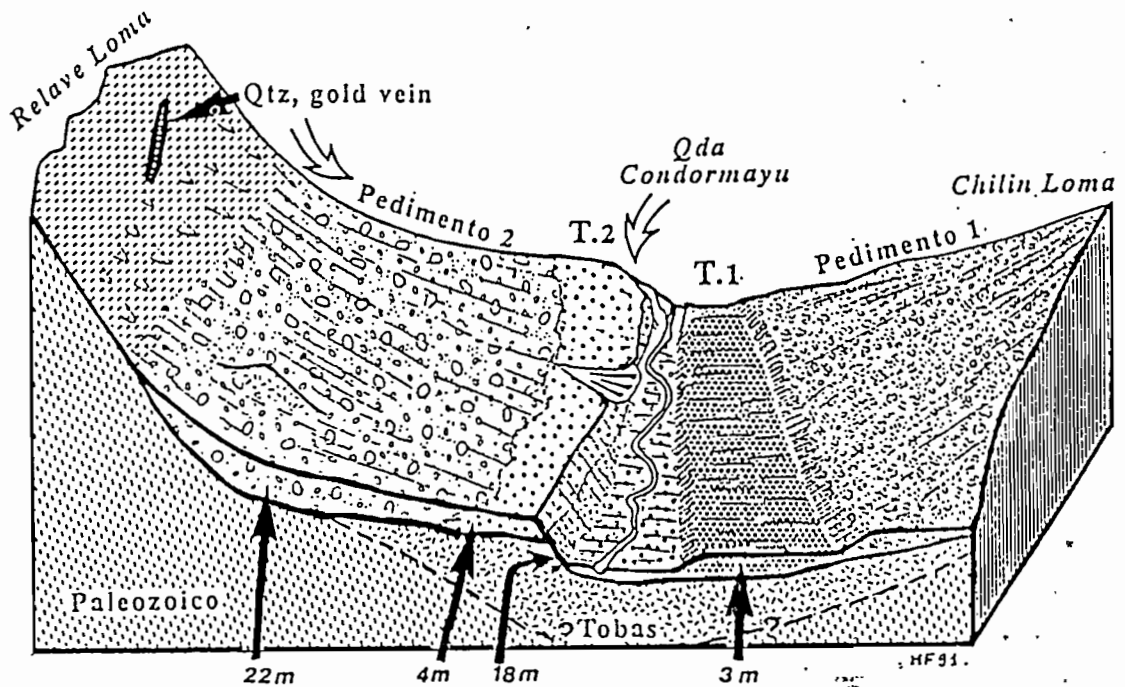


Fig. 21: bloque diagrama del placer de Vilader (sin escala).

El abanico, cuya espesor varía de 5 a 12 m, contiene únicamente clastos de Paleozoico principalmente de clastos angulosos y poco desgastados de cuarzitas y lutitas con algunos cuarzo blancos filonianos. La terraza T2, de 4 a 5 m de espesor se diferencia del abanico por su composición y su organización secuencial. Además de una mayoría de clastos del Paleozoico, contiene clastos más desgastados de rocas volcánicas, principalmente de composición dacítica. Los clastos son imbricados y el material presenta canales arenosos.

La terraza T1 presenta una composición parecida a T2, pero los clastos paleozoicos presentan formas más desgastadas que en T1.

Generalmente todo el material es lavado aunque cuando el espesor pasó varios metros como en el abanico y en la terraza T2 solo el material al contacto con el bed-rock es recuperado mediante piques y galerías.

Las partículas de oro recuperadas son pequeñas, con un largo promedio de 0,94 mm para un rango de 0,1 a 6 mm y una fuerte disimetría de la curva de repartición

del lado de los tamaños menores. Estas partículas son relativamente espesas, lo que se marca por valores del índice de aplastamiento entre 1,1 y 6, con un promedio de 2,5. Presentan rasgos morfológicos indicando un transporte muy corto (contornos irregulares, ausencia de doblamiento); la observación al microscopio electrónico de barrido muestra la presencia de caras cristalinas de crecimiento y moldes de cristales (de cuarzo) encajonantes bien conservados.

El análisis de la composición química del oro primario de algunas muestras de las vetas de cuarzo indica un contenido en plata entre 9 y 5%, con trazas de hierro y cobre. Esta composición es muy parecida a aquella de las partículas del placer salvo que algunas partículas de las terrazas presentan un borde externo de oro muy puro. La presencia de esta franja externa depurada en plata caracteriza generalmente una etapa de evolución en un perfil de alteración.

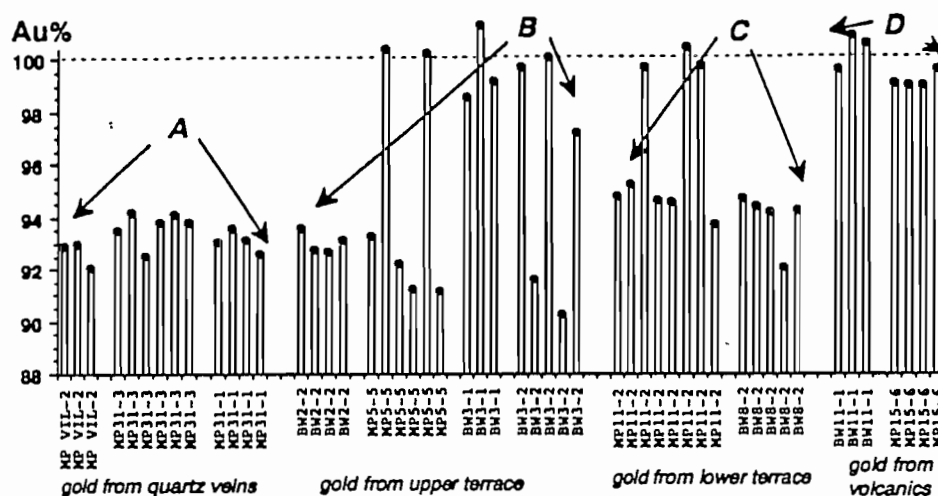


Fig. 22 : comparación de la composición del oro de las partículas del placer de Vilader (B y C) con oro de las vetas de cuarzo (A) y oro de las volcánitas (D).

Así en base a argumentos geomorfológicos y sedimentológicos de los materiales, juntos con los datos de morfoscopía y de composición de las partículas de oro se puede concluir que el oro del placer de Vilader procede de la erosión de vetas encajonadas en el Ordovícico y no de la erosión de las tobas miocenas, que también contienen oro disperso y afloran abundantemente en la zona.

Debido a su modo de formación el placer de Vilader presenta un volumen mineralizado no muy extenso con baja ley, sin posibilidad de reservas que lo que limita su interés económico.

#### 2.4.8. Composición del oro en depósitos primarios de la provincia metalogénica andina y su significado genético.

El propósito de estas investigaciones es de determinar la composición del oro y de los elementos trazas asociados para establecer si existen diferencias características en relación con el marco geológico, la edad y el tipo de mineralización. Es bien conocido que el oro, la plata, el cobre, el mercurio son elementos de características químicas



similares; el oro y la plata forman una solución sólida continua a la cual se incorporan elementos trazas (Fe, Te, Bi, etc.)

Datos sobre la composición de oro ya han sido adquiridos a través del proyecto oro de ORSTOM y de otros investigadores (Alarcon; Lehrgerger, 1988; Tistl, 1990; Alarcon y Fornari, 1994). Además las condiciones de presión y temperatura de su deposición pueden evaluarse a través del estudio de las inclusiones fluidas y de las asociaciones mineralógicas características (geotermómetros minerales).

Anteriormente muchos de los yacimientos han sido explotados para minerales asociados a yacimientos hidrotermales de Sn, W, Ag, Bi, Sb, Pb y Zn, distribuidos en una extensión de aproximadamente 800 km en el cinturón metalogénico andino. Sin embargo, este cinturón también ha proporcionado cantidades de oro más que todo como subproducto a partir de otros minerales. Debido a las bajas cotizaciones del Sn, W, Ag, Bi, Sb, Pb, Zn, el oro tiene actualmente prioridad en la prospección de nuevas ocurrencias de depósitos primarios y el potencial aurífero de los antiguos yacimientos esta siendo evaluado.

El uso de análisis puntuales por la microsonda sobre secciones pulidas permite ver la zona analizada, lo que es una ventaja en relación a trabajos análogos anteriormente realizados por análisis global de granos de oro, que no permiten identificar eventuales contaminaciones provocadas por la presencia de microinclusiones en el oro. En cambio presenta una sensibilidad limitada y la adquisición de datos suficientemente numerosos para ser representativos es larga.

En base a los primeros datos ha podido definir básicamente cuatro tipos de ambientes geológicos en el cinturón de la provincia metalogénica andina de Bolivia, de los cuales el primero se relaciona muy probablemente a la época paleozoica.

- Depósitos de tipo exhalativo, hidrotermal o de remobilización metamórfica. Los depósitos primarios de oro correspondientes a este ambiente se hallan ubicados en la zona norte de la Cordillera Real. Entre las regiones mejor conocidas se pueden citar la Cordillera de Apolobamba, cerca de la frontera con el la República del Perú (área de Suches, Cerro Palomani) las cabeceras de los ríos Pelechuco y Amalanta (Turcos, Lavanderani, Luiruni, Sunchuli y Huarachani) también el área de Yani con numerosas minas (Aucapaca, Santa Barbara, Lacayani, Silusani, La Suerte, San Jorge, Lipichi, etc.). En la parte sur de la Cordillera Real y alrededor del macizo del Mururata y del Illimani también son conocidos trabajos en depósitos primarios de oro (Olla de Oro, Aucapata, Rosario de Araca y otros). Estos depósitos han sido conocidos y explotados desde el Incario y con mayor intensidad durante la Colonia y además han dado lugar a la formación de ricos depósitos secundarios particularmente en la región de Tipuani. Depósitos de este tipo se extienden hasta el norte de Argentina.

- Depósitos de oro del tipo hidrotermal meso-hipotermal. Son aquellos que se hallan clasificados como polimetálicos; se caracterizan por una mineralogía compleja con numerosos sulfosales de plata, estaño, antimonio y el oro no es más que un subproducto. Muchas veces presentan fenómenos de tipo "telescoping".

De un modo general están asociados a intrusiones dacíticas-riolíticas emplazados en rocas sedimentarias del Ordovícico y Silurico; la distribución de los cuerpos ígneos miocenos abarca desde la parte central del cinturón estañífero de Bolivia hasta el límite fronterizo con la Argentina. (ejemplos distrito aurífero de La Joya, Cerro Rico de Potosí, Tasna, Chorolque, etc.)

- Depósitos de oro de tipo hidrotermal epitermal. Se caracterizan por la presencia de estibina siempre asociada al oro. La mineralización se concentra frecuentemente en estructuras de origen tectónica (fallas, charnelas anticlinales) desarrolladas en rocas del Ordovícico y Silurico. Existen aproximadamente más de 500 ocurrencias de este tipo, frecuentemente explotadas para el antimonio.

La mineralogía de estos depósitos es relativamente simple con la predominancia de estibina y cuarzo como minerales principales y cantidades menores de sulfuros comunes y sulfosales. El oro se presenta en partículas generalmente pequeñas y se caracteriza por una finesa elevada de más de 950‰.

- Depósitos de oro de tipo epitermal asociado con el volcanismo cenozoico. Están representados en toda la provincia del Altiplano y en la Cordillera Occidental (Berenguela, Nor Lipez y Sur Lipez) con numerosas zonas de alteración y anomalías todavía en proceso de evaluación

## **2.5. El magmatismo de tras-arco del oroclino boliviano; implicaciones geodinámicas y metalogenéticas.**

El oroclino boliviano presenta características particulares en lo que se refiere al magmatismo y a la metalogenia (cinturón estañífero) que no se observan en las zonas adyacentes del sur o del norte.

Desde el Oligoceno tres tipos de rocas magmáticas se han emplazado en posición de tras-arco en el oroclino (1) rocas magmáticas ácidas, generalmente peraluminosas, (2) rocas shoshoníticas o ultra potásicas, (3) rocas volcánicas alcalinas.

En cuanto a su modo de emplazamiento parece relacionarse con la naturaleza del régimen tectónico con periodos relativamente largos compresivos y periodos mucho más cortos de deformación extensiva o transtensiva.

### **2.5.1 Las rocas magmáticas ácidas.**

Corresponden a rocas (dacitas a riolitas) más o menos peraluminosas que se emplazan en varias etapas:

- de ≈28 a 23,5 Ma (Oligoceno superior), se produce el emplazamiento de los batolitos granodioríticos a graníticos meta a peraluminosos de la Cordillera Real (Illimani, Quimsa Cruz, Santa Vera Cruz) y de stocks metaluminosos en el área de Potosí-Morococala (Kumurana),

- de  $\approx 22$  a 19 Ma (Mioceno inferior), se produce otro episodio, reconocido solamente en la parte orientada NW-SE de la Cordillera Oriental, desde Santa Vera Cruz hasta Kari Kari. Le corresponden stocks subvolcanicos y rocas extrusivas (Llallagua, Colquechaca, y otros casi al limite Cordillera oriental-Altiplano) así como la caldera de Kari Kari con andesitas a riolitas ultrapótasicas, y peraluminosas con granate y cordierita.

- de  $\approx 18$  a 12 Ma (Mioceno medio), ocurrió un episodio bien representado al límite Cordillera oriental-Altiplano desde la región de La Paz hasta la frontera con Argentina.

Corresponden a numerosos aparatos volcánicos, stocks y diques subvolcanicos, mayormente dacíticos a riodacíticos, levemente peraluminosos. A este episodio corresponden las mineralizaciones de Sn-Ag, (más Bi, metales de base Pb, Zn y Au) tal como las del Cerro Rico de Potosí, y el conjunto de los cerro Bonete, Morokho, etc. en el sur Lipez).

En los masivos de los cerro Bonete y Morokho la actividad magmática empieza por una etapa explosiva (Fornari et al., 1989; Pozzo, 1991; Fornari et al., 1994; Bally 1994) en la cual se emplazan grandes volúmenes de flujos piroclásticos, generalmente poco soldados y depósitos de caídas de cenizas. Las tobas se caracterizan por la abundancia de los xenocristales (hasta 40%) de plagioclasas, biotita y cuarzo, y menor circón, apatita, y opacos esfena.

Después se emplazan stocks y domos más o menos lávicos, coladas de brechas volcánicas y coladas de lavas; presentan una textura porfírica, con fenocristales de plagioclasa, biotita y cuarzo. La matriz forma mas o menos 65% de la roca, con pequeños cuarzos xenomorfos, microlitos de plagioclasas, generalmente mas básicos que los fenocristales y pequeños feldespatos potasicos.

Tanto las tobas como las lavas se caracterizan por su rango de variación en sílice muy reducido y corresponden principalmente a dacitas.

Se caracterizan por su carácter peraluminoso subrayado por presencia de granate, corindon normativo y una relación aluminio/álcalis (A/KCN) superior a 1. Son altamente potasicos, con  $K_2O/Na_2O > 1$ . A pesar de una fuerte alteración ligada a las mineralizaciones (Bailly, 1994; Bailly et al., 1992; 1993) se ha podido comprobar que los tenores en álcalis son primarios para la mayoría de las rocas. Estas rocas definen una serie de afinidad shoshonítica, y corresponden a latitas y bakanitas, en el diagrama de Peccerillo y Taylor.

- de  $\approx 10,5$  a 2 Ma (Mioceno superior a Plioceno) se produce un episodio magmatico muy importante en volumen, con actividad principalmente entre 8,5 y 5 Ma. Se trata del emplazamiento de grandes volúmenes de tobas ignimbríticas peraluminosas de Los Frailes y Morococala.

En el Altiplano norte de Bolivia, algunos edificios volcánicos corresponden a este episodio al cual son asociadas mineralizaciones de Ag-Au-Sn-Cu. En el Altiplano

central, en la región de Sevaruyo hacia el oeste, le corresponden varios edificios dacíticos erosionados.

En la región de La Joya, este volcanismo ácido fue estudiado principalmente en el macizo de Esquentaque (Monrroy et al., 1994, Monrroy, 1995). Se puede establecer esquema cronológico siguiente:

- emplazamiento de los cuerpos subvolcánicos de La Joya (13,6 - 15,7 Ma.),
- extrusión de domos volcánicos riodacíticos alineados en una dirección NW-SE (8,8 Ma.),
- erupción de las Tobas Soledad (5,2 - 6,5 Ma.),
- emplazamiento del complejo volcánico de Esquentaque conjuntamente con la toba Esquentaque (5,4 Ma.),
- extrusión de rocas básicas de afinidad shoshonítica del Cerro Pujno (menor a 2 Ma.?).

Las lavas Esquentaque representan una unidad compleja, la cual comprende por lo menos cuatro efusiones de lavas, dos domos y diques y un depósito piroclástico (tobas Esquentaque) entre la primera y segunda coladas de lava.

Petrográficamente los stocks La Joya son dacitas biotíticas, los domos alineados son de composición riodacítica, las lavas Esquentaque son de composición dacítica - andesítica, en tanto que las lavas del Cerro Pujno corresponde a andesitas basálticas.

El emplazamiento de estas rocas tienen un control estructural como producto de varias fases compresivas ocurridas en los Andes desde el Eoceno al presente. Se pone en discusión la hipótesis a cerca de el origen de estas rocas como parte de una caldera de bajo volumen con centro no resurgente propuesta por Redwood (1987). Sin embargo sobre las bases de nuevas investigaciones y datos presentados en este trabajo, se propone un modelo alternativo.

En el Macizo Esquentaque, se han identificado tres zonas de alteración hidrotermal que se formaron a través de fracturas y fallas por las cuales han circulado los fluidos hidrotermales. Estas zonas de alteración pueden constituir un interesante sector de mineralización polimetálica, ya que varios sectores con alteración argilitica presentan características similares al Cerro Kori Kollo.

### **2.5.2. Las rocas shoshoníticas.**

Se emplazan en episodios mas cortos. En Bolivia dos de ellos son bien documentados:

- de  $\approx$ 13 a 11 Ma, en la zona tectónica de transición entre la Cordillera oriental y el Altiplano norte.

En la región de Eucaliptus Sica-Sica se ha podido investigar varios afloramientos de rocas de afinidad shoshonitica (Soler et al., 1992). Las volcánitas del cerro Kholpana son derrames básicos, de estructura generalmente traquítica porfírica con fenocristales milimétricos de olivino (con corona de reacción), clinopiroxeno, anfíbol (en parte reabsorbida y con una corona sistemática de opacos), plagioclasa y opacos en una matriz orientada, fina y con microfenocristales de plagioclasa, clinopiroxeno y

opacos. Las composiciones químicas de estas lavas son típicas de las shoshonitas *s.s.* conocidas en los Andes centrales ( $\text{SiO}_2 \approx 53.7 \%$ ,  $\text{TiO}_2 \approx 1.7 \%$ ,  $\text{Na}_2\text{O} \approx \text{K}_2\text{O} \approx 3 \%$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5 \approx 0.8 \%$ ,  $\text{FeO}^*/\text{MgO} \approx 1.3$ ,  $\text{MnO} \approx 0.10 \%$ ,  $\text{Ba} > 1500 \text{ ppm}$ , ...).

En esta región, otros derrames shoshoníticos *s.l.* han sido descritos al norte de Sica Sica (cerro Sanu Pucara, cerro Tankha Tankha) y al norte de Villa Villa (zona de Villa Villa - Hornuni) por Redwood (1986) y Redwood y McIntyre (1989). Estos autores han obtenido para estas rocas cuatro edades comprendidas entre  $13.2 \pm 0.7 \text{ Ma}$  y  $11.4 \pm 0.5 \text{ Ma}$ . Hacia el SE del área estudiada, las shoshonitas (no datadas aún) de Baños Capachos al NE de Oruro (S. Aitchison, com. pers.) pertenecen verosímilmente a la misma familia. Hemos encontrado también en la pampa al este de Sica Sica, cerca de Laurani, un pequeño afloramiento de banakita ( $\text{SiO}_2 \approx 58.4 \%$ ) por la cual hemos obtenido una edad K-Ar sobre roca total de  $8.20 \pm 0.26 \text{ Ma}$ , que corresponde posiblemente a un efecto de "reset" debido a las intrusiones de Laurani.

Estas manifestaciones de volcanismo shoshonítico se encuentran sistemáticamente en el techo de la falla Eucaliptus (las shoshonitas del cerro Pokhota son las únicas que sellan dicha falla) y definen una provincia shoshonítica de edad mioceno medio ( $\approx 13\text{-}10 \text{ Ma}$ ) de unos 100 kilómetros de largo y de unos 20 kilómetros de ancho.

En la región, este episodio de volcanismo shoshonítico está intercalado entre dos episodios de magmatismo ácido (representados por dacitas esencialmente) de edades  $\approx 20\text{-}14 \text{ Ma}$  y  $\approx 10\text{-}5 \text{ Ma}$  respectivamente.

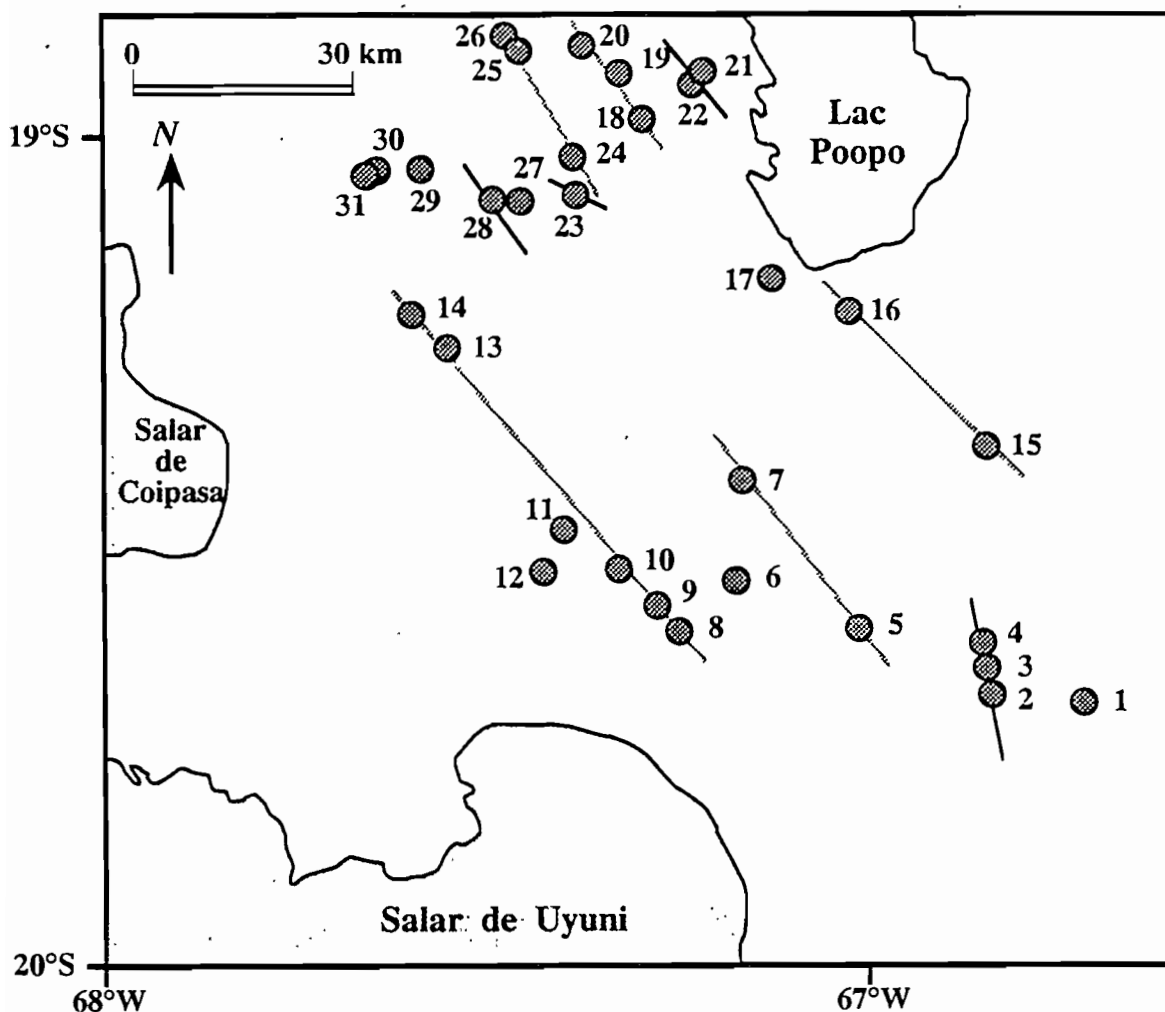
- a menos de  $\approx 1 \text{ Ma}$  (Cuaternario a actual) en el Altiplano central se han reconocido numerosos afloramientos de rocas shoshoníticas, relativamente ácidas (bakanitas a latitas), (Carlier y al., 1992; Soler et al., 1992, 1993a,b). Se presentan como numerosos afloramientos aislados de extensión limitada que no pasan de algunos  $\text{km}^2$  (fig. 23). (Más al norte le podrían corresponder las rocas básicas de afinidad shoshonítica del Cerro Pujno, cerca a La Joya, Cf. supra).

Presentan morfologías variadas (coladas, domos-coladas, domos) pero más frecuentemente forman domos relativamente achatados con coladas espesas. En algunos casos se han observado coladas más extensas tal como cerca de Coroma.

Estas lavas de color oscuro contienen xenocristales de cuarzo, en forma casi sistemática; plagioclasa, granate y enclaves, a veces muy abundantes de material variado (rocas metamórficas de zócalo profundo, lamprofidos, dioritas).

Las observaciones petrográficas, geoquímicas así como los datos isotópicos parecen evidenciar fenómenos de mezcla magmática y/o de contaminación en la génesis de las shoshonitas. Los datos de los isótopos de Sr y Nd parecen indicar la presencia de zonas crustales diferentes debajo del Altiplano.

Además es posible proponer un modelo genético nuevo para el volcanismo shoshonítico en el cual la fuente primaria procede del manto litosférico subcontinental dentro del cual la fusión sería provocada por la subducción "continental" del zócalo brasileño por debajo de los Andes.



- |                     |                  |                  |                  |
|---------------------|------------------|------------------|------------------|
| 1 - Opoco           | 2 - Chiar Kkollu | 3 - Vila Vila    | 4 - Chipi Tankka |
| 5 - Pucara          | 6 - Potoco       | 7 - Agua Milagro | 8 - Cajuata      |
| 9 - Cuchi Vilque    | 10 - Opa Kkollu  | 11 - Jayu Kkota  | 12 - Nekhe Kkota |
| 13 - Vili Vili      | 14 - San Martin  | 15 - Cerro Gordo | 16 - Quillacas   |
| 17 - Pampa Aullagas | 18 - Chauca      | 19 - Parantare   | 20 - Ucumasi     |
| 21 - Querimita      | 22 - Pichacari   | 23 - Chita Chita | 24 - Luce        |
| 25 - Icho Kkollu    | 26 - Ñusta       | 27 - Chacarara   | 28 - Chacani     |
| 29 - Jankko Kkollu  | 30 - Challahuma  | 31 - Parinuyo    |                  |

Fig. 23: los principales aparatos shoshoníticos cuaternarios del Altiplano central de Bolivia, (Soler y al., 1992).

### 2.5.3. El magmatismo alcalino.

Se emplaza al Oligoceno Superior - Mioceno Inferior ( $\approx 25- 21$  Ma.). Las rocas volcánicas alcalinas son muy voluminosas y se extienden en forma casi continua desde la frontera con el Perú (Formación Abaroa, región de Corque Andamarca, Tambo Tambillo).

Forma una faja de dirección NNW-SSE de más de 400 km de largo con una orientación aparentemente oblicua en relación al arco magmatico calco-alcalino del Mioceno Medio y actual.

Actualmente, hacia el Noroeste, las rocas alcalinas están en parte cubiertas por un magmatismo de arco, mientras que hacia el Sur los afloramientos se encuentran lejos del arco volcánico de la Cordillera Occidental.

Al Sur del Salar de Uyuni, se presenta de forma más discontinua y aparentemente esta en relación con fallas de rumbo de importancia regional (cuenca de Tupiza, Hérial et al., 1992), Serranía de las Minas (Baldellón, 1995), volcanismo Rondal (Kussmaul et al., 1975; Fornari et al., 1993). El carácter alcalino es menos pronunciado y tiene una tendencia shoshonítica.

En la zona ubicada hacia el margen noreste del Salar de Uyuni, en la serranía que se extiende por cerca de 70 km, desde las cercanías de Tambo Tambillo al Norte hasta el río Salado al Sur, este volcanismo ha sido estudiado más en detalle (Espinoza et al., 1994; Espinoza, 1995).

En esta región, el magmatismo alcalino comprende numerosos sills, coladas de lava, brechas y tobas. Algunos sills tienen una potencia superior a los 100 m. Los sills presentan una marcada continuidad horizontal y vertical así como una gran homogeneidad en su composición mineralógica, las facies con grandes feldespatos (hasta de 4 cm.) son muy frecuentes.

En la Serranía de Urachata ubicada en la parte Sur de esta zona, los sills representan una potencia acumulada de más de 500 m. (fig. 24 y fig. 25), las coladas y las brechas son escasas y están asociados a los conductos de emisión. También existen diques que parecen recortar sistemáticamente a los sills.

Petrográficamente las rocas más básicas corresponden a gabros con olivino mientras que las más ácidas son andesitas. Las rocas ígneas presentan: olivinos (forsterita), piroxenos (diopsidas, titanoaugitas y augitas), plagioclasas (labradoritas y andesitas), en algunos casos biotitas y hornblendas, y se caracterizan por que no presentan ortopiroxenos.

Las tobas son de caída "ash fall", de acuerdo a criterios petrográficos y de campo se han identificado dos tipos de tobas: a un primer grupo corresponden tobas cristalinas de carácter epiclástico con una matrix compuesta esencialmente de plagioclasas y un segundo grupo esta constituido por tobas vitreas.

Las rocas de este estudio son mayormente peraluminosas y solo el gabro de Chiar Kollu tiene una composición metaluminosa. Los datos geoquímicos reflejan la afinidad alcalina de las rocas tal como se observa en los diagramas: alcalis totales versus sílice o Nb/Y vs. Zr/P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (fig. 26).

Los análisis normativos C.I.P.W., muestran que las rocas de esta serie presentan nefelina y clinopiroxeno normativo en su composición.

La geoquímica de los elementos mayores y trazas ha permitido diferenciar diferentes tendencias de diferenciación que sugieren diferentes grados de cristalización y de esta manera diferentes grados de fusión parcial, sin que este involucrado un proceso de mezcla de magmas, diagramas Ce/Yb vs. Ce, (fig. 27), y K/Ca vs Fe/Si o un algún proceso de contaminación cortical (diagrama Y/Nb vs. Zr/Nb, fig. 28).

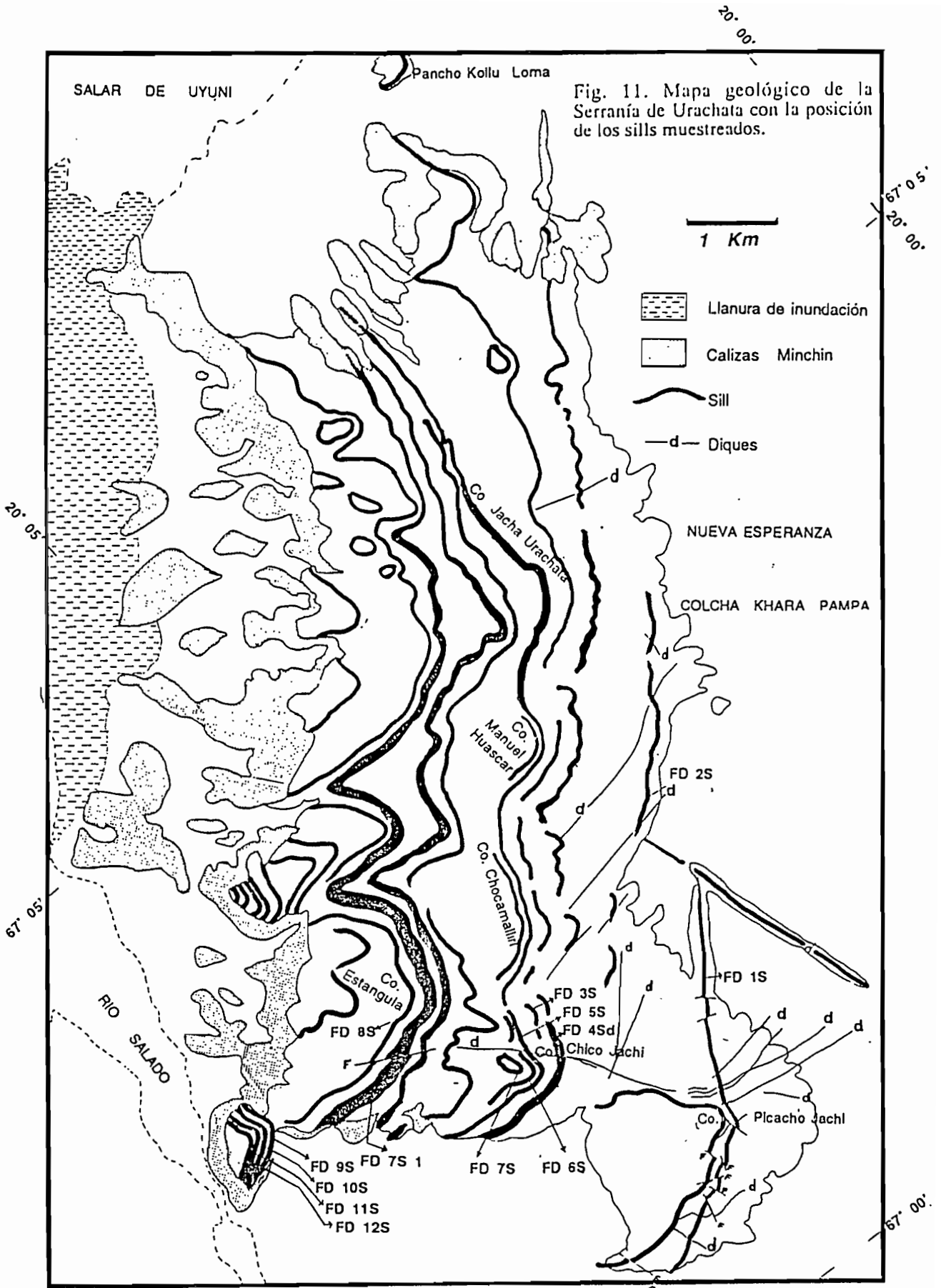


Fig. 11. Mapa geológico de la Serranía de Urachata con la posición de los sills muestreados.

Fig. 24: mapa geológico de la Serranía de Urachata con la ubicación de los sills muestreados (Espinoza et al., 1994; Espinoza, 1995).



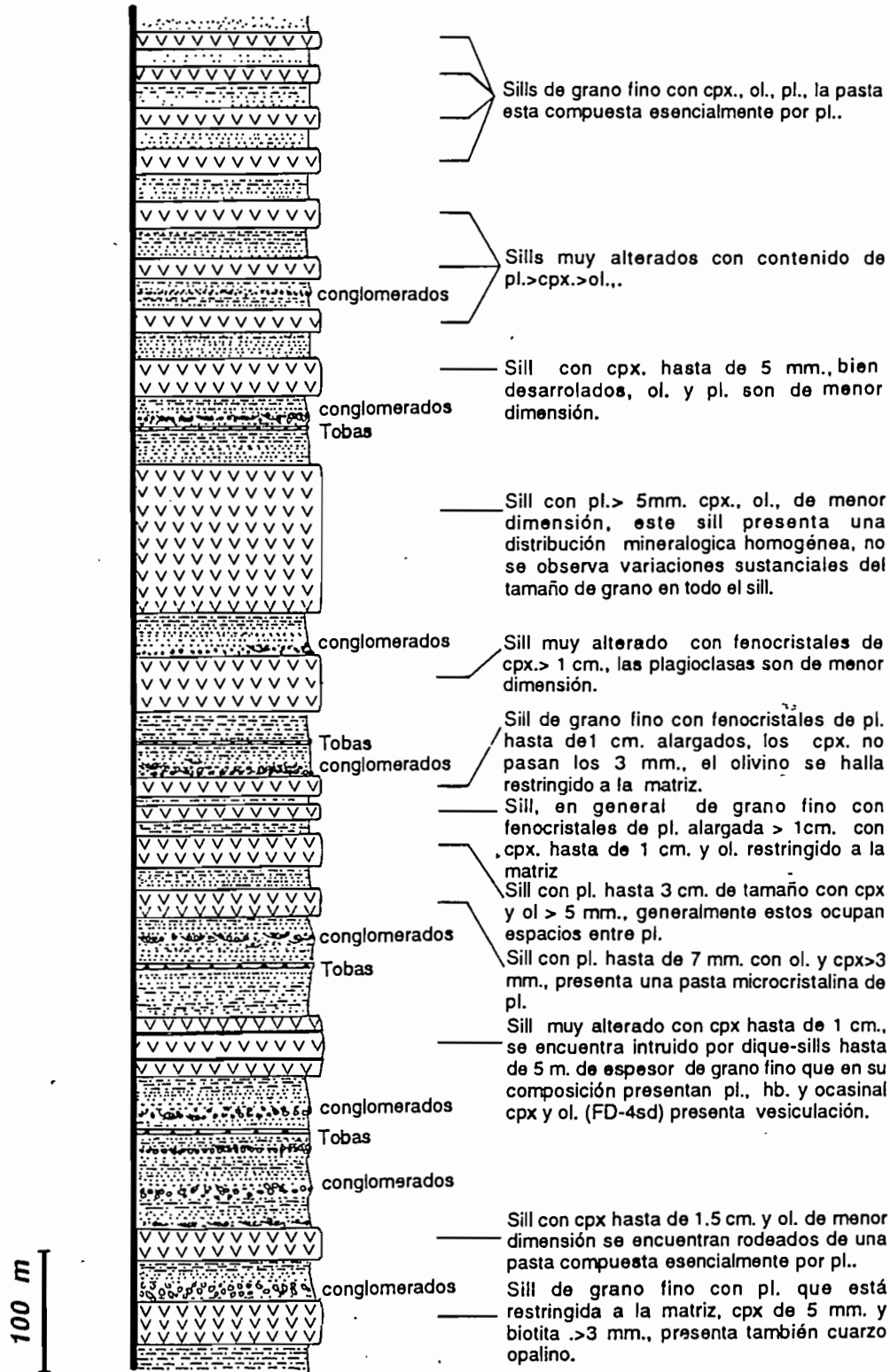


Fig. 25: corte esquemático de la Serranía de Urachata mostrando la posición de los sills dentro de los sedimentos detrítico principalmente areno-limosos de la Formación Tambillo (Espinoza et al., 1994; Espinoza, 1995).

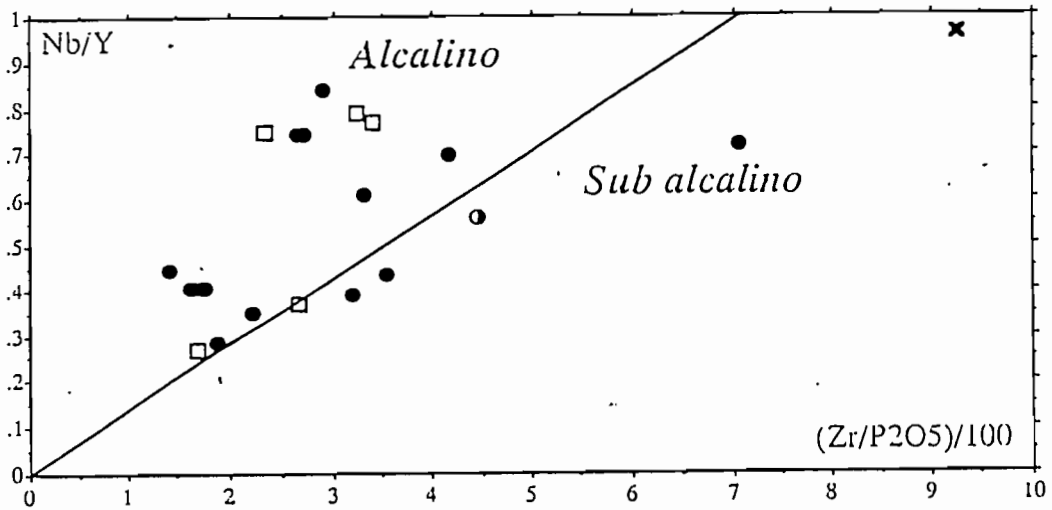


Fig. 26: diagrama de discriminación de las series magmáticas de Winchester y Floyd (1976)

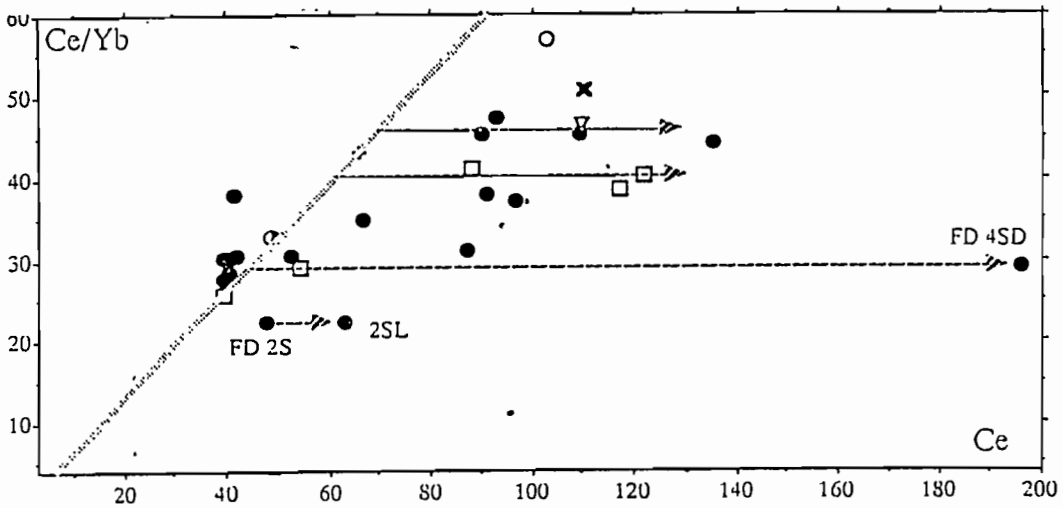


Fig. 27: diagrama Ce/Yb vs Ce; la línea oblicua representa un proceso de fusión parcial del manto, las líneas horizontales procesos de cristalización fraccionada.

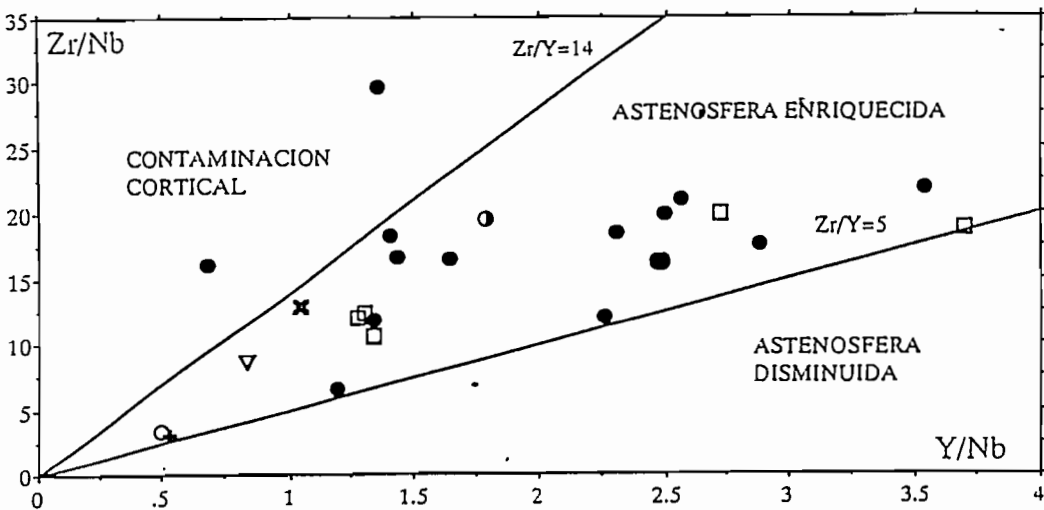


Fig. 28: diagrama Zr/Nb vs Y/Nb mostrando el origen astenosférico enriquecido del magmatismo alcalino.

En el "spiderdiagram" roca/condrita (Nakamura, 1974), la regular trayectoria de las curvas es compatible con un proceso de cristalización fraccionada, la ausencia de anomalías negativas de europio clásicamente atribuida a la cristalización de plagioclasa sugiere que la fase principal de cristalización fué la de los minerales ferromagnesianos. La forma concava de los "spiderdiagrams" con el enriquecimiento en LREE y disminución de HREE, pueden interpretarse como el resultado de pequeños grados de fusión parcial de un manto lherzolítico enriquecido que tenía granate.

En el diagrama normalizado de Pearce (1982) referente a la relación roca/MORB las rocas exponen modelos de curvas típicas de los basaltos alcalinos con enriquecimientos en elementos incompatibles y bajos contenidos de elementos compatibles, así mismo, esta conducta refleja debiles grados de fusión del manto superior granatífero, y en apariencia hubo una serie de episodios de fusión en proporciones levemente diferentes. La evolución básico-ácido está reflejada en la sucesiva disminución de los contenidos de Cr y Ni.

Los incrementos en LILE y las anomalías de Nb en los diagramas normalizados podrían hacer pensar en la posibilidad de una contribución de la placa que se subduce (efecto de delaminación), pero las relaciones de  $La/Ta = 22$  son características de rocas intraplaca, esto hace pensar en la existencia de otros mecanismos, tal como la influencia de un cierto manto metasomatizado, en la génesis del magmatismo alcalino.

### **3. Contribución al proyecto:**

#### **PLIO-CUATERNARIO DE BOLIVIA**

##### **INFORME FINAL**

**Jaime ARGOLLO**  
**Responsable del Proyecto**

**Philippe MOURGUIART**  
**Co-responsable del Proyecto**

Las actividades de investigación iniciadas el año 1974 en el marco del Convenio UMSA-ORSTOM, a través del Instituto de Geodinámica y Limnología, dependiente en principio de la Facultad de Ciencias Puras y Naturales (hasta 1982) y posteriormente de la Facultad de Ciencias Geológicas de la UMSA, han contribuido al conocimiento de la geología del Cuaternario de Bolivia y de los recursos asociados a los mismos.

El presente informe no corresponde a la totalidad de las actividades de investigación llevadas a cabo desde el inicio del proyecto, ya que nuestra participación efectiva en el Instituto de Geodinámica y Limnología comienza a partir del año 1983 (J. Argollo) y 1984 (Ph. Mourguiart). Por lo que solamente presentamos una síntesis de las actividades de investigación posteriores a 1983, referentes a los sitios estudiados, materiales estudiados, metodologías empleadas, algunos resultados generales, y las nuevas tendencias de investigación.

Los resultados científicos han sido publicados en diferentes medios de difusión científica nacional e internacional en forma periódica. Ha sido escrito un libro en ocasión del año sabático de J. Argollo, el cual será finalmente publicado en los próximos meses.

El convenio UMSA-ORSTOM ha permitido además la formación de estudiantes y profesionales bolivianos y franceses, a través de la elaboración de tesis de grado, tesis de doctorado, cursos de especialización, etcétera.

#### **EL PROYECTO CUATERNARIO DE BOLIVIA (1974-1983)**

El estudio general de las formaciones cuaternarias de Bolivia fue iniciado en el año 1974 con la creación del Instituto de Geodinámica y Limnología de la UMSA, en el marco del convenio UMSA-ORSTOM. La geología del Cuaternario de Bolivia, poco estudiada hasta entonces, recibió un impulso muy importante con los trabajos del Dr. M. Servant (investigador ORSTOM), permitiendo caracterizar la geodinámica reciente de los Andes bolivianos, a través de estudios geomorfológicos, sedimentológicos, paleoecológicos, geoquímicos y neotectónicos.

La importancia económica de estos depósitos, determinada por su vasta extensión, impuso por sí misma el establecimiento de conocimientos de base, por

ejemplo: las cuencas evaporíticas del salar de Uyuni, mineralización en depósitos aluviales del río Suches y depósitos glaciares de la Cordillera Real, así como suelos y paleosuelos de la región de Cochabamba y Altiplano Norte. Conocimientos que permitieron la implementación de futuros proyectos relacionados con la mineralización en depósitos recientes.

Por otra parte, la fuerte actividad tectónica de los Andes en esta época, acompañada de grandes variaciones climáticas, poco o nada estudiados todavía, fueron también objeto de investigación.

Los resultados de estas investigaciones están traducidos en publicaciones científicas en revistas nacionales e internacionales, libros, tesis, etcétera.

## **EL PROYECTO PLIO CUATERNARIO DE BOLIVIA (1984-1995)**

En base a las investigaciones geológicas, geoquímicas y biológicas anteriores realizadas por un equipo boliviano-francés (UMSA y ORSTOM) sobre el conjunto del Plio-Cuaternario (medios lacustres, medios evaporíticos, medios glaciares y fluviales), el proyecto Plio-Cuaternario de Bolivia ha sido replanteado en sus alcances y objetivos el año 1984.

Precisamente cuando la comunidad científica mundial emprendía un esfuerzo sin precedentes para coordinar las investigaciones iniciadas sobre los cambios climáticos y más concretamente sobre el funcionamiento del sistema planetario, este gran esfuerzo comienza con el lanzamiento del **Programa Internacional Geosfera Biosfera (IGBP)**, siendo uno de los principales proyectos **Cambios Globales del Pasado**, cuyo estudio se centra en el último gran ciclo climático (150 000 años).

Los últimos cambios mayores, registrados a escala del globo, fueron focalizados sobre el estudio de los 20 000 últimos años, revelando que:

- a los 18 000 años AP (Antes del Presente), un máximo de extensión de los hielos continentales indica una perturbación mayor del ciclo del agua en el planeta;
- entre los 15 000 y 10 000 años AP, una elevación de la temperatura estuvo asociada a un aumento de los tenores en gases de efecto invernadero de la atmósfera;
- entre 10 000 años AP y el período actual, un máximo recalentamiento (+1 a 2°C) es observado en la globalidad del hemisferio Norte.

En 1984, el insuficiente conocimiento de los medios en latitudes tropicales del Sud no permitía establecer las interacciones entre el hemisferio Norte y el hemisferio Sur de la dinámica del clima tropical a escalas largas.

Todas las observaciones realizadas en medio tropical se limitaron a descripciones cualitativas y a la medida de ciertos indicadores (niveles lacustres, polen en sedimentos, etc.) sin ningún soporte estadístico. Existían limitaciones más marcadas a nivel de indicadores geoquímicos y sedimentológicos, particularmente sobre los medios actuales.

La posición geográfica de Bolivia y los resultados previamente alcanzados justificaron el replanteamiento del proyecto Plio-Cuaternario de Bolivia.

## MOTIVACION CIENTIFICA DEL PROYECTO

El proyecto estaba focalizado en el estudio de algunas regiones todavía poco estudiadas a nivel general y particularmente en el estudio paleoclimático en base a las siguientes preguntas científicas:

- ¿Cuáles fueron los cambios mayores durante el último máximo glacial y el período interglacial actual?
- ¿Cuáles han sido los cambios mayores durante el mismo período de los ambientes en latitudes tropicales del continente Sud americano en alta y baja altitud?
- ¿Cómo evaluar cuantitativamente los parámetros lacustres (niveles lacustres, salinidad, temperatura, etc.) que han podido registrar las modificaciones del clima?

## CONDICIONES DE EJECUCION

El proyecto Plio-Cuaternario de Bolivia fue coordinado por el Instituto de Geodinámica y Limnología hasta 1992; posteriormente, pasó a ser una unidad de investigación del Instituto de Investigaciones Geológicas de la Facultad de Ciencias Geológicas de la UMSA, siempre en el marco del convenio UMSA-ORSTOM.

El Instituto de Geodinámica y Limnología y posteriormente el Instituto de Investigaciones Geológicas han realizado la mayor parte de los trabajos de campo y la recolección de muestras. Mientras que la mayor parte de los análisis sedimentológicos, geoquímicos, micropaleontológicos y dataciones por radiocarbono se realizaron en los laboratorios de ORSTOM, Bondy, Francia.

Durante el desarrollo del proyecto, se realizó una serie de reuniones de coordinación de trabajo, agrupando a los participantes franceses, bolivianos y otros investigadores que participaron en la ejecución del proyecto.

Al margen del aporte al conocimiento de la evolución de los ambientes cuaternarios y del hombre, las acciones del proyecto estuvieron también dirigidas hacia tres actividades prioritarias:

- 1) Formación de personal,
- 2) Inserción de los investigadores nacionales en grandes programas internacionales (PICG de la UNESCO, INQUA, IGBP, etc.),
- 3) Organización de seminarios científicos internacionales.

## REGIONES Y MATERIAL DE ESTUDIO

El proyecto Plio-Cuaternario se realizó en diferentes sitios repartidos sobre un gradiente climático actual Norte-Sud, donde las precipitaciones son de 800 mm/año al Norte (cuenca del Lago Titicaca) y 100 mm/año al Sur (cuencas de Uyuni y Coipasa). Estos sitios corresponden a estas dos cuencas.

**Sedimentación lacustre** - En la cuenca lacustre del Titicaca, las perforaciones de poca profundidad realizadas en un principio indicaron variaciones importantes del nivel de las aguas (Vargas, tesis, 1981). Una nueva campaña de perforaciones (1984) permitió obtener una decena de testigos a diferentes profundidades (entre 5 y 60 metros

aproximadamente). Dos de estos testigos han sido estudiados de manera exhaustiva (TD y TD1 de aproximadamente 25 000 años en la base). Los otros han sido analizados de manera menos completa, referentes a: análisis sedimentológicos, estudios de ostrácodos, palinología, diatomeas y sedimentación reciente por el método del Plomo 210.

En las cuencas de Uyuni y Coipasa, los primeros reconocimientos efectuados en los años 70 (Servant & Fontes, 1978) han sido completados por el proyecto, particularmente en el curso de los últimos años; el estudio de la cuenca, se ha retomado en los sitios de Coipasa y Tauca (borde Sud del salar de Coipasa), Churacari y Negrojahuira (borde norte del salar de Uyuni). En todos estos sitios se estudiaron las terrazas ligadas a altos niveles lacustres cuaternarios.

**Sedimentación fluvial** - Numerosos sitios han sido objeto de un levantamiento geológico detallado, con el objeto de precisar la relación entre los flancos y los sedimentos del fondo de los valles, en el Altiplano, en algunos valles (de Cochabamba, Potosí y Santa Cruz) y en las Cordilleras (Oriental y Occidental).

Algunos de ellos han sido objeto de estudios detallados en el laboratorio: Chuquiaguillo, Sorechata, Chiarjahuira, Jichhu Kota en la región de La Paz, Alianza en la región del salar de Uyuni.

**Actividad glaciar** - Se ha realizado un esfuerzo en la prospección y la cartografía de un gran número de valles glaciares en las Cordilleras Oriental (Apolobamba, Muñecas, Real, Tres Cruces, Tunari, Tiraque) y Occidental (Azanaques, Tunupa, Tata Sabaya).

Paralelamente, se ha prospectado un número considerable de valles glaciares a fin de obtener elementos de datación de las morrenas, a través de perforaciones o levantamiento de columnas geológicas.

Igualmente, los lagos de los valles glaciares y las turberas, situados a diferentes alturas, han merecido un estudio detallado, particularmente en el valle de Jichhu Kota, donde se han efectuado varias perforaciones.

**Sedimentación actual** - A fin de establecer una calibración de los indicadores ecológicos, se realizaron una serie de campañas para recolectar sedimentos actuales en función de las diferentes especialidades:

1. Ha sido efectuado un muestreo para el estudio de diatomeas en las siguientes regiones:

- en el valle glaciar de Jichhu Kota con el objeto de establecer la relación diatomeas/altitud;
- en Sud Lipez, con el objeto de estudiar la relación diatomeas/salinidad.

2. Se ha realizado un muestreo para el estudio de ostrácodos a diferentes profundidades del Lago Titicaca, igualmente en los lagos salados del Sud del Altiplano, con el objetivo de estudiar la relación ostrácodos/batimetría y ostrácodos/salinidad.

3. Se efectuó un muestreo para el estudio de polen en los valles glaciares de Jichhu Kota y en los lagos Titicaca y Poopó, con el objetivo de conocer mejor la

distribución de polen en función de la altura y en función de la distancia respecto a la línea de costa.

4. Se llevaron a cabo muestreos botánicos en el valle de Jichhu Kota a fin de proporcionar una referencia actual a los estudios de macrorestos vegetales en los sedimentos del Holoceno de este mismo valle y otros de la Cordillera.

## **METODOS DE ESTUDIO**

Los métodos de estudio son los siguientes:

- Análisis geomorfológicos y geológicos (observación de campo, fotointerpretación), con el objeto de realizar reconocimientos de los cambios mayores de los ambientes a escalas regionales.
- Estudios paleoecológicos, particularmente sobre testigos lacustres ya que los indicadores biológicos (polen, diatomeas, ostrácodos etc.) son conocidos por su gran sensibilidad a las modificaciones ambientales.
- Establecimiento de un calendario apoyado principalmente sobre dataciones por radiocarbono.

### **Evaluación cronológica**

La cronología de los eventos fue establecida por cuatro métodos:

Radiocarbono - El laboratorio de Geoquímica de isótopos del Centro ORSTOM de Bondy (M. Fournier) ha realizado la mayor parte de las dataciones por radiocarbono, que son la base de la evaluación cronológica.

Plomo 210 - El laboratorio de glaciología y geofísica del medio ambiente del CNRS de Grenoble (M. Pourchet) ha intervenido para la evaluación cronológica de los sedimentos muy recientes del lago Titicaca y los lagos glaciares de la Cordillera Real (Jichhu Kota). Gracias a este método fue posible obtener para cada uno de los lagos las tasas de sedimentación reciente.

Uranio/Torio - El laboratorio de geoquímica isotópica (GEOTOP) de la Universidad de Montreal (C. Hillaire-Marcel) realizó dataciones U-Th. Este método ha sido aplicado a los carbonatos de las cuencas cuaternarias del Altiplano Sud.

Paleomagnetismo - Se realizó el registro de las modificaciones seculares del campo geomagnético en los sedimentos lacustres del Titicaca (C. Barton). Sin embargo, la naturaleza de los sedimentos no fue apropiada para los análisis.

El estudio de paleomagnetismo de los sedimentos Plio-Cuaternarios de la Formación La Paz fue realizado por N. Thouveny del Laboratorio de Geología del Cuaternario de Marseille (France).

### **Análisis especiales**

Palinología - La palinología ha sido aplicada para definir cualitativamente los grandes tipos de formaciones vegetales presentes en los bordes del lago Titicaca y otros



medios de sedimentación (turberas) en diferentes épocas, con el objeto de reconstruir las variaciones de los niveles de agua. Este esfuerzo ha sido particularmente llevado a cabo sobre espectros palinológicos de los sedimentos actuales del lago Titicaca.

Micropaleontología - Los Andes bolivianos ofrecen una larga gama de medios acuáticos en función de la morfología de las cuencas (lagos profundos, lagos superficiales, turberas, etc.) de la altitud (gradiente térmico) y las condiciones geológicas (facies hidroquímicas). Las investigaciones se realizaron sobre dos grupos de organismos: las diatomeas (S. Servant-Vildary) y los ostrácodos (Ph. Mourguiart).

Otros métodos - Análisis de composición de los sedimentos al espectrómetro infrarrojo. Caracterización de la materia orgánica, etc.

## **RESULTADOS ALCANZADOS**

### **1. Estudio de los medios actuales**

#### **Relación diatomeas/altitud/temperatura y vegetación de alta altitud -**

Se estableció una función de transferencia diatomeas/altitud sobre el flanco occidental de la Cordillera Real de los Andes (Servant-Vildary & Roux, 1990). La integración de la temperatura en el seno de esta relación está establecida en un gradiente altitudinal local determinado por las medidas obtenidas de los suelos (donde la temperatura es estable a 80 cm de profundidad) y los medios acuáticos (donde la temperatura varía de acuerdo a las horas del día).

Paralelamente al estudio de las diatomeas, se ha realizado una observación de la zonación altitudinal de la vegetación actual (Ostria, 1987) y de los espectros polínicos de los sedimentos superficiales (Ybert, 1992).

**Relaciones diatomeas/composición química de las aguas** - Estas relaciones han sido analizadas en el Sudoeste de los Lipez, donde los estudios hidroquímicos detallados mostraron que los lagos muy superficiales de esta región, actualmente árida, presentaban una larga gama de salinidades y de composiciones químicas. Estas condiciones se modificaron muy levemente a escalas plurianuales.

Los tratamientos estadísticos revelan que las diatomeas están más fuertemente ligadas a la composición iónica que a los tenores en sales (Servant-Vildary & Roux, 1990; Roux *et al.*, 1991).

**Relaciones ostrácodos/batimetría y ostrácodos/salinidad** - Estas relaciones han sido analizadas sobre bases estadísticas de la repartición de las faunas en los sedimentos muestreados a diferentes profundidades en el lago Titicaca y en los diferentes lagos superficiales del sud del Altiplano (Mourguiart, 1987; Mourguiart & Roux, 1990; Mourguiart *et al.*, 1992). Se otorgó una atención particular a la representatividad de las asociaciones de individuos muertos en vías de fosilización en relación a la asociación de los individuos vivientes.

**Relación polén/batimetría/altitud** - Estas relaciones han sido definidas sobre bases no estadísticas por el momento, en muestras tomadas en tres lagos glaciares de alta altitud, igualmente en dos transectas en el lago Titicaca y dos en el lago Poopó (Ybert, 1992). Estos estudios revelan que los pólenes son buenos indicadores de las fluctuaciones de los niveles de agua en medios de poca profundidad.

**Balances en agua/meteorología** - El proyecto Plio-Cuaternario ha dado origen a diversos estudios que conciernen al funcionamiento de los hidrosistemas actuales:

- A partir de 1990, se montó una operación orientada a la evaluación del balance de los glaciares.
- Se llevó a cabo otra operación sobre las oscilaciones del lago Titicaca desde el año 1900 en relación con la variaciones plurianuales del clima.
- Una tercera operación se llevó a cabo sobre la dinámica atmosférica del clima actual.

## **2. Estudio de los medios del pasado**

**Modificaciones pasadas del lago Titicaca** - Las variaciones del nivel del Lago Titicaca durante los últimos 25 000 años han sido en principio definidas en sus grandes tendencias por la sedimentología (Wirrmann & Oliveira Almeida, 1986), luego de manera más detallada por la palinología (Ybert, 1992). La aplicación de la función de transferencia ostrácodos/batimetría sobre una decena de testigos lacustres muestreados a diferentes profundidades ha terminado en una estimación cuantitativa de las variaciones del nivel de las aguas durante los 8 000 últimos años (Mourguiart *et al.*, 1992, 1993). El resultado principal de estos estudios es haber mostrado que el nivel del Lago Titicaca ha sido por períodos largos más bajo que actualmente, con excepción de dos períodos (14 000 y 10 500 años AP). Intensas oscilaciones cortas dieron cambios bruscos (3900 años AP) durante el interglaciar actual.

**Modificaciones de la distribución altitudinal de la vegetación acuática. Estimación de las temperaturas** - El estudio de las diatomeas de una perforación realizada en un valle glaciar ha permitido estimar en base a una función de transferencia diatomeas/altitud las grandes tendencias de la temperatura entre 10 000 y 2000 años AP aproximadamente. Se observa que las temperaturas próximas a los valores actuales al principio del Holoceno han disminuido durante los últimos 4000 años (Servant-Vildary & Roux, 1990). Un estudio más detallado mostrará que los últimos 4000 años se caracterizan por variaciones muy cortas que se superponen.

**Fluctuación de los glaciares** - La observación de las morrenas en muchos valles de las Cordilleras Oriental y Occidental ha llegado a tres principales resultados:

- 1) el último máximo glaciar se subdivide en dos oscilaciones positivas datadas en aproximadamente 20 000 y 14 500 años AP (Gouze *et al.*, 1987, Argollo *et al.*, 1995);
- 2) el retroceso de los glaciares después de 14 500 años ha sido accidentado por dos reavances que muestran una posición relativamente más baja del frente de los glaciares durante la última transición glaciar/interglaciar;

3) un retroceso muy abrupto de los glaciares tuvo lugar alrededor de los 10 000 años AP (Argollo *et al.*, 1987, 1995).

**Escurrecimientos superficiales** - Los levantamientos geológicos realizados en los valles fluviales han mostrado que fuertes modificaciones del régimen de escurrimiento han tenido lugar durante el Cuaternario reciente: los escurrimientos torrenciales que caracterizan el clima actual han existido durante cortos períodos, principalmente alrededor de 14 000 años AP y durante el último milenio. Estas modificaciones indican que los mecanismos atmosféricos de las precipitaciones han sido muy diferentes a los mecanismos actuales, principalmente durante la mayor parte del interglaciar actual.

El estudio palinológico (Ybert, 1984, 1987) de dos sitios Holocénicos ha permitido precisar el registro de las modificaciones de los escurrimientos por la vegetación local o regional.

**Fluctuaciones lacustres de las cuencas del Sud** - Una estimación de la composición química de los lagos de la última época glacial ha sido efectuado en una pequeña cuenca de sud Lipez (laguna Ballivián) sobre la base de una función de transferencia diatomeas/composición química de las aguas (Servant-Vildary & Roux, 1990; Roux *et al.*, 1991). Esta estimación ha sido completada por una evaluación de las variaciones del nivel lacustre (Servant-Vildary & Mello e Sousa, 1993).

Más de 40 dataciones por radiocarbono sobre los depósitos del borde de los salares de Uyuni y Coipasa son la base de una reconstrucción detallada de las variaciones de los niveles lacustres durante la última transición glacial/interglaciar (Servant *et al.*, 1995). Estos datos indican que el último máximo lacustre tuvo lugar entre 13 000 y 12 000 años AP y que una fase abrupta de descenso del nivel de las aguas es datado un poco antes de 11 000 años AP. Las cronologías por radiocarbono han sido asociadas a los análisis U/Th sobre las biohermas calcáreas y estromatolitos (Rondeau, 1990).

**Modificaciones de medios fluviales en las cuencas del Sud** - Una reconstrucción detallada de los ambientes del Holoceno se realizó en el sitio de Alianza en base a estudios sedimentológicos y diatomológicos. Los resultados indican que las lluvias torrenciales, características del clima actual, no han existido durante la mayor parte del Interglaciar actual entre 10 000 años y menos de 3000 años AP. Los escurrimientos estuvieron desprovistos de crecidas bien marcadas. Sin embargo, algunas variaciones significativas de corta duración han sido registradas por la flora de diatomeas.

## LAS GRANDES TENDENCIAS

**Precipitaciones** - En la actualidad está bien establecido que las regiones tropicales situadas a latitudes y altitudes diferentes se caracterizaron durante la parte superior de la última época glacial (20 000 - 10 000 años AP) por una evolución

similar de las precipitaciones. En cambio, se ha revelado que el clima ha evolucionado de manera diferente según las regiones durante el interglaciar actual (10 000 años AP).

**Temperatura** - La extensión de los taxones vegetales de montaña a revelado importantes cambios de la temperatura en bajas latitudes de las regiones ecuatoriales.

### **Principales resultados:**

1. Ha sido posible establecer la evolución de los balances de agua a través de las fluctuaciones lacustres que han sido reconstruidas de manera continua para los últimos 20 000 años AP:

- Las condiciones climáticas más secas que actualmente caracterizan el último máximo glacial.
- Las precipitaciones, superiores a sus valores actuales, caracterizan la última transición glacial/interglacial (15 000 - 10 000 años AP). Estas han alcanzado su máximo entre 13 000 y 12 000 años AP. Un evento seco muy abrupto se observa un poco antes de 11 000 años AP, que parece ser un poco anterior a la fase del Dryas reciente.
- Las condiciones secas han aparecido en el Altiplano un poco antes de 8000 años AP y se han mantenido hasta una época reciente (1500 años AP). Fuertes oscilaciones climáticas de corta duración, al igual que cambios bruscos, se superponen a esta evolución.

2. Las fluctuaciones glaciares mayores son comparables, en sus grandes líneas, a aquellas que han sido observadas en las montañas del Norte y Sud del continente americano. Sin embargo, el retroceso de los glaciares después de 15 000 años AP ha sido menos acentuado y solamente al final de la última transición glacial/interglacial han retrocedido bruscamente. No ha sido posible observar ningún avance glacial notable durante el Holoceno, con excepción del de la Pequeña Edad del Hielo (menos de 500 años AP).

3. Las modificaciones de los regímenes de escurrimiento superficiales han registrado cambios cualitativos del clima: el último interglacial se ha caracterizado por precipitaciones no tormentosas y de bajo poder erosivo hasta una época muy reciente (menos de 1500 años AP).

4. Los registros de la zonación altitudinal de las diatomeas indica que las grandes tendencias de la evolución de la temperatura después de 10 000 años AP han sido comparables a las observadas en latitudes medias y altas. Las temperaturas eran cercanas a los valores actuales entre 10 000 y 5000 años AP. Las temperaturas bajaron después de 5000 años AP; sin embargo, esta tendencia se complicó por variaciones de corta duración.

## **NUEVAS DIRECCIONES DE INVESTIGACIÓN**

### **Funcionamiento de grandes cuencas continentales.**

Las observaciones realizadas dejan ver la posibilidad de conocer la evolución de las grandes cuencas continentales tomando en cuenta todo los componentes (glaciares, escurrimiento y lagos).

Parece posible, realizar una simulación de los balances en agua para las diferentes épocas del Cuaternario reciente de estas grandes cuencas continentales.

### **Perspectivas de aplicación a los estudios biológicos y estudios pedológicos**

Considerando que los ambientes de bosques actuales han sido perturbado varias veces, inclusive durante el interglaciar actual, el proyecto proporciona nuevos elementos de reflexión al estudio de la biodiversidad.

Igualmente, los cambios climáticos observados por medio del análisis de los archivos sedimentarios, refuerzan las observaciones pedológicas que ya fueron detectadas en antiguas modificaciones ambientales. El interés es proporcionar un cuadro cronológico del estudio de los suelos.

### **Paleoecología cuantitativa**

Los trabajos de ecología realizados en Bolivia han mostrado que los parámetros físicos o químicos de los ambientes acuáticos pueden ser evaluados cuantitativamente por los métodos de la micropaleontología cuantitativa.

La realización de este objetivo pasa principalmente por un análisis profundo de las relaciones polen/vegetación/clima o microfósiles/clima.

## **PROGRAMAS PLURIDISCIPLINARIOS**

Los resultados del proyecto Plio-Cuaternario de Bolivia justifican una reorientación de las investigaciones sobre objetivos más interdisciplinarios.

Los geólogos del cuaternario encuentran la posibilidad de reforzar su colaboración con los pedólogos (comparación entre los registros sedimentarios y los registros pedológicos de las variaciones pasadas del clima) y los biólogos (estudio de la relación indicador biológico/clima).

Estas colaboraciones son indispensables para hacer progresar los métodos paleoclimáticos (que significa precisamente un indicador biológico o geoquímico en relación a la vegetación) e hidrólogos (estudio del ciclo del agua), así como para reforzar las evaluaciones cronológicas en el conocimiento de las variaciones climáticas a una resolución temporal de 50 años en los registros sedimentarios.

La relación de la historia del hombre con las modificaciones del ambiente es una abertura de la geología del Cuaternario que merece ser reforzada en los próximos años.

**PARTICIPANTES EN EL PROYECTO PLIO-CUATERNARIO ,  
(investigadores o tesistas)**

**Personal boliviano**

Luis A. Rodrigo  
Oscar Ballivian  
Marcelo Arduz  
Carlos Vargas  
Fernando Ortuño  
Mario Blanco  
Germán Rivera  
Yolanda Miranda  
Jaime Argollo  
Luis de Oliveira Almeida  
Gonzalo Quenta  
Leocadio Ticlla  
Sonia Perez  
Claudia Gonzales  
Silvia Estensoro  
Wilge Mansilla  
Eduardo Soria

**Personal francés (ORSTOM u Organismos asociados)**

Michel Servant  
Simone Servant-Vildary  
François Risacher  
Alain Lavenu  
Bruno Boulangé  
Jean-Pierre Ybert  
Denis Wirrmann  
Philippe Mourguiart  
Cécile Ostria  
Philippe Gouze  
Marc Fournier  
Florence Sylvestre  
Michel Pourchet  
Aïcha Badou  
Naïma Miskane  
Claude Hillaire-Marcel  
Pascal Rondeau

**BIBLIOGRAFIA**

- ARGOLLO, J., 1982. Evolution du piémont Ouest de la Cordillère Royale (Bolivie) au Quaternaire. *Unpublished PhD*, Univ. Aix-Marseille, 110p.
- ARGOLLO, J., GOUZE, Ph., SALIEGE, J-F. & SERVANT, M., 1987. Fluctuations des glaciers de Bolivie au Quaternaire récent. *Géodynamique*, 2 (2), 103-104.
- ARGOLLO, J., MOURGUIART, Ph., PINGLOT, J-F., POURCHET, M., PREISS, N. & WIRRMANN, D., 1994. Sedimentación reciente en el lago Titicaca (Bolivia). *7º Congreso Geológico Chileno, Actas Volumen 1*: 225-229.
- ARGOLLO, J. & SERVANT, M., 1995. La última transición Glaciar/Interglaciar de los Andes sud tropicales (Bolivia). *Seminario "Aguas, Glaciares y Cambios Climáticos en los Andes Tropicales"*, La Paz, 13-16 Junio 1995, p. 145-149.
- BALLIVIAN, O., BLES, J. L. & SERVANT, M., 1978. El Plio-Cuaternario de la región de La Paz (Andes Orientales, Bolivia). *Cahiers ORSTOM, Série Géologie*, 10 (1), 101-113.
- BOUYASSE, Th., MORLON, P., MOURGUIART, Ph. & WIRRMANN, D., 1992. Agricultura, sociedad y medio natural en la cuenca del Titicaca: tres mil años de relaciones. *Actas del VII congreso internacional sobre cultivos andinos*, D. Morales & J.J. Vacher (eds.), La Paz: 383-388.
- CARBONEL, P., MOURGUIART, Ph & PEYPOUQUET, J-P., 1990. The external mechanism responsible for morphological variability in Recent Ostracoda, seasonality and biotope situation: an example from Lake Titicaca. In: Whatley, R. & Maybury, C. (eds.), *Ostracoda and Global Events*, Chapman & Hall. London: 331-340.
- FOUCAULT, A., 1987. Mise en évidence d'une périodicité de 640 ans dans la variation de la température estimée dans la vallée d'Hichu Kkota (Bolivie). *Géodynamique*, 2 (2), 120.
- GOUZE, Ph., 1987. La cordillère orientale de Bolivie: glaciations plio-pléistocènes; essai de paléohydrologie (30 000 ans BP - Actuel) d'après les oscillations des glaciers et la composition isotopique des macrorestes végétaux. *Unpublished PhD*, Univ. Paris-Sud, 173p.

- 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. *C. R. Acad. Sc. Paris*, Série II, 303 (3), 219-224.
- GOUZE, Ph., FERHI, A., FONTES, J-Ch. & ROCHE, M-A., 1987. Composition isotopique ( $^{18}\text{O}$ ) de la matière organique des tourbières actuelles et holocènes en Bolivie. Résultats préliminaires et perspectives d'application en paléoclimatologie. *Géodynamique*, 2 (2), 113-116.
- ILTIS, A. & MOURGUIART, Ph., 1991. Repartición y biomasa. In: Dejoux, C. & Iltis, A. (eds), *El lago Titicaca. Síntesis del conocimiento limnológico actual*, 251-262, ORSTOM, Hisbol, La Paz.
- MARTIN, L., TURCQ, B., ABSY, M-L., LEDRU, M-P., MOURGUIART, Ph. & SIFEDDINE, A., 1991. Some different records of El Niño-like conditions in different south american regions during the last 6500 years. *XIII I.N.Q.U.A., Beijing*, 2-9 August 1991, p. 231.
- MARTIN, L., ABSY, M-L., FOURNIER, M., MOURGUIART, Ph., SIFEDDINE, A., TURCQ, B. & VOLKMER RIBEIRO, C., 1992a. In: ORTLIEB, L. & MACHARE, J. (eds), *Paleo-ENSO Records, international symposium, Extended Abstracts*, Some climatic alterations recorded in South America during the last 7 000 years may be expounded by long-term El Niño like conditions, 187-191.
- MARTIN, L., ABSY, M-L., FLEXOR, J-M., FOURNIER, M., MOURGUIART, Ph., SIFEDDINE, A. & TURCQ, B., 1992b. Enregistrements de conditions de type El Niño, en Amérique du Sud, au cours des 7000 dernières années. *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 315, Série II, 97-102.
- MARTIN, L., ABSY, M-L., FLEXOR, J-M., FOURNIER, M., MOURGUIART, Ph., SIFEDDINE, A. & TURCQ, B., 1993. Southern Oscillation signal in South American palaeoclimatic data of the last 7000 years. *Quat. Research*, 39, 338-346.
- MOURGUIART, Ph., 1987a. Les ostracodes actuels de l'Altiplano bolivien. Modèle de répartition. *Géodynamique*, 2 (2), 101-103.
- MOURGUIART, Ph. 1987b. Les ostracodes lacustres de l'Altiplano bolivien. Le polymorphisme, son intérêt dans les reconstitutions paléohydrologiques et paléoclimatiques de l'Holocène. *Unpublished PhD, Univ. Bordeaux I*, 263p.
- MOURGUIART, Ph., 1991. Los ostrácodos. In: Dejoux, C. & Iltis, A. (eds), *El lago Titicaca. Síntesis del conocimiento limnológico actual*, 345-352, ORSTOM, Hisbol, La Paz.
- MOURGUIART, Ph & ARGOLLO, J., 1992. Historias separadas de los lagos Huiñaimarca y Chucuito durante el Holoceno. *X Congreso Geológico Boliviano, La Paz*, 26-30 Octubre 1992, p. 107-110.
- MOURGUIART, Ph., ARGOLLO, J. & WIRRMANN, D., 1995. Evolution paléohydrologique du bassin du lac Titicaca au cours de l'Holocène. *Seminario "Aguas, Glaciares y Cambios Climáticos en los Andes Tropicales"*, La Paz, 13-16 Junio 1995, p. 161-169.
- MOURGUIART, Ph., ARGOLLO, J., SERVANT-VILDARY, S., YBERT, J-P. & WIRRMANN, D., 1991. Upper quaternary lake levels in Bolivia ( $16^{\circ}$ - $20^{\circ}$  S. Lat.) and climatic changes in tropical South America. *XIII I.N.Q.U.A., Beijing*, 2-9 August 1991, p. 247.
- MOURGUIART, Ph. & CARBONEL, P., 1994. A quantitative method of palaeolake-level reconstructions using ostracod assemblages: an example from the Bolivian Altiplano. *Hydrobiologia*, 288: 183-193.
- MOURGUIART, Ph., CARBONEL, P., PEYPOUQUET, J-P., WIRRMANN, D. & VARGAS, C., 1986. Late quaternary paleohydrology of Lake Huiñaymarca (Bolivia): scenarios based on ostracods fauna. *Hydrobiologia*, 143: 191-197.
- MOURGUIART, Ph. & 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, Ph., WIRRMANN, D., FOURNIER, M. & SERVANT, M., 1992. Reconstruction quantitative des niveaux du petit lac Titicaca au cours de l'Holocène. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 315, Série II, 875-880.

- OSTRIA, C., 1987a. Végétation actuelle et fossile de haute altitude (exemple d'une vallée glaciaire: Hichu Kkota, Cordillère Royale des Andes de Bolivie). *Géodynamique*, 2 (2), 109-111.
- OSTRIA, C., 1987b. Phytoécologie et paléoécologie de la vallée alto-andine de Hichu-Kkota (Cordillère Orientale, Bolivie). Unpublished PhD, Univ. P. et M. Curie, 180p.
- OSTRIA, C., 1987c. La végétation d'une vallée alto-andine de Hichu-Kkota (Cordillère Orientale, Bolivie). I-Données générales. *Bull. Soc. Bot. Fr., Lettres bot.*, 134 (4/5), 385-397.
- PIERRE, J. F. & WIRRMANN, D., 1986. Diatomées et sédiments holocènes du lac Khara Kkota (Bolivie). *Géodynamique*, 1 (2), 135-145.
- PIERRE, J-F., 1987. Inventaire des diatomées de la carotte JK1 et implications paléoclimatiques à Hichu-Kkota. *Géodynamique*, 2 (2), 112-113.
- POURCHET, M., MOURGUIART, Ph., PINGLOT, J-F., PREISS, N., ARGOLLO, J. & WIRRMANN, D., 1994. Sédimentation récente dans le lac Titicaca (Bolivie). *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 319, Série II: 535-541.
- POURCHET, M., MOURGUIART, Ph., PINGLOT, J-F., PREISS, N., ARGOLLO, J. & WIRRMANN, D., 1995. Evaluation des vitesses de sédimentation récente dans les hautes vallées des Andes boliviennes. Son intérêt dans l'estimation des paléo-pollutions atmosphériques. *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 320, Série IIa: 477-482.
- RODRIGO, L. A. & WIRRMANN, D., 1991. Aspecto general de la sedimentación actual. In: Dejoux, C. & Ittis, A. (eds), *El lago Titicaca. Síntesis del conocimiento limnológico actual*. 39-43, ORSTOM, Hisbol, La Paz.
- ROUX, M. & SERVANT-VILDARY, S., 1984. Comparaisons statistiques de peuplement de diatomées fossiles et actuelles provenant des montagnes de Bolivie. *Cahiers ORSTOM, Série Géologie*, 14 (1), 3-13.
- ROUX, M., SERVANT-VILDARY, S. & MELLO E SOUSA, S., 1987. Diatomées et milieux aquatiques de Bolivie. Application des méthodes statistiques à l'évaluation des paléotempératures et des paléosalinités. *Géodynamique*, 2 (2), 116-119.
- 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., ARGOLLO, J. & FOURNIER, M., 1987. Dépôts fluviatiles en Bolivie. Variations du régime des écoulements au cours du Quaternaire récent. *Géodynamique*, 2 (2), 105-107.
- SERVANT, M. & FONTES, J-Ch., 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-Ch., 1984. Les basses terrasses fluviatiles du quaternaire récent des Andes boliviennes. Datations par le  $^{14}\text{C}$ . Interprétation paléoclimatique. *Cahiers ORSTOM, Série Géologie*, 14 (1), 15-28.
- SERVANT, M., FOURNIER, M., ARGOLLO, J., SERVANT-VILDARY, S., SYLVESTRE, 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. *C. R. Acad. Sci. Paris*, t. 320, série IIa, 729-736.
- SERVANT-VILDARY, S., 1978. Les diatomées des dépôts lacustres quaternaires de l'Altiplano bolivien. *Cahiers ORSTOM, Série Géologie*, 10 (1), 25-35.
- SERVANT-VILDARY, S., 1978. Les diatomées des sédiments superficiels d'un lac salé, chloruré, sulfaté sodique de l'Altiplano bolivien, le lac Poopó. *Cahiers ORSTOM, Série Géologie*, 10 (1), 79-89.
- SERVANT-VILDARY, S., 1984. Les diatomées des lacs sursalés boliviens. Sous-classe pennatophycidées. I - Famille des Nitzschiacées. *Cahiers ORSTOM, Série Géologie*, 14 (1), 35-53.



- SERVANT-VILDARY, S., 1986. Les diatomées actuelles des Andes de Bolivie (taxonomie, écologie). *Cah. Micropaléont.*, 1 (3-4), 99-124.
- SERVANT-VILDARY, S., 1991. Las diatomeas. In: Dejoux, C. & Iltis, A. (eds), *El lago Titicaca. Síntesis del conocimiento limnológico actual*, 181-191, ORSTOM, Hisbol, La Paz.
- SERVANT-VILDARY, S. & BLANCO, M., 1984. Les diatomées fluvio-lacustres plio-pléistocènes de la formation Charaña (Cordillère occidentale des Andes, Bolivie). *Cahiers ORSTOM, Série Géologie*, 14 (1), 55-102.
- VARGAS, C., 1982. La sédimentation lacustre subactuelle d'un bassin intramontagneux : la lac Titicaca (partie lac Huinamarca-Bolivie). *Thèse 3ème cycle*, Université de Bordeaux I, 91 p.
- WIRRMANN, D., 1982. Primeros resultados sobre el estudio de los testigos del lago Huiñaimarca. *Document ORSTOM*, La Paz, 34p.
- WIRRMANN, D., 1987. El lago Titicaca: sedimentología y paleohidrología durante el Holoceno (10 000 años BP - Actual). *Informe UMSA-ORSTOM*, La Paz, 6, 61p.
- WIRRMANN, D., 1990. The Lake Titicaca. Bolivia-Peru. In: Kelts, K., Gierlowski-Kordesh (eds), *Global geological record of lake basins*. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- WIRRMANN, D., 1991. Morfología y batimetría. In: Dejoux, C. & Iltis, A. (eds), *El lago Titicaca. Síntesis del conocimiento limnológico actual*, 31-37, ORSTOM, Hisbol, La Paz.
- WIRRMANN, D. & MOURGUIART, Ph., 1987. Oscillations et paléosalinités des lacs du Quaternaire récent en Bolivie. *Géodynamique*, 2 (2), 98-101.
- WIRRMANN, D. & MOURGUIART, Ph., 1988 - El lago Titicaca: ambiente actual. Relación con la distribución de los ostrácodos. *Actas del Congreso iberoamericano y del Caribe*. 17p.
- WIRRMANN, D. & MOURGUIART, Ph., 1995 - Late Quaternary spatio-temporal limnological variations in the Altiplano (South America). *Quaternary Research*, 43 (3).
- WIRRMANN, D., MOURGUIART, Ph. & de OLIVEIRA ALMEIDA, L-F., 1988. Holocene, sedimentology and ostracodes repartition in Lake Titicaca. Paleohydrological interpretations. In: Rabassa, J. (ed.), *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula*, 6, 89-127, Balkema, Rotterdam.
- WIRRMANN, D., YBERT, J-P. & MOURGUIART, Ph., 1991. Una evaluación paleohidrológica de 20 000 años. In: Dejoux, C. & Iltis, A. (eds), *El lago Titicaca. Síntesis del conocimiento limnológico actual*, 61-67, ORSTOM, Hisbol, La Paz.
- YBERT, J-P., 1981-1982. Analyse palynologique de la coupe holocène du río Chiarjahuira sur l'Altiplano bolivien. *Cahiers ORSTOM, Série Géologie*, 12 (2), 125-133.
- YBERT, J-P., 1984. Diagramme sporoplinique de la coupe holocène du río Chuquiaguillo sur l'Altiplano bolivien. *Cahiers ORSTOM, Série Géologie*, 14 (1), 29-34.
- YBERT, J-P., 1987. Spectres palynologiques de tourbières et de sédiments lacustre de la fin du Pléistocène et de l'Holocène des Andes de Bolivie. *Géodynamique*, 2 (2), 108-109.
- YBERT, J-P., 1988. Apports de la palynologie à la connaissance de l'histoire du lac Titicaca (Bolivie-Pérou) au cours du Quaternaire récent. *Inst. fr. Pondichery, Trav. sec. sci. techn.*, 25, 139-150.
- YBERT, J-P., 1991. Los paisajes lacustres antiguos según el análisis palinológico. In: Dejoux, C. & Iltis, A. (eds), *El lago Titicaca. Síntesis del conocimiento limnológico actual*, 69-79, ORSTOM, Hisbol, La Paz.
- YBERT, J-P. & MIRANDA, Y., 1984. Análisis palinológico de un corte del Sajama. *II Congreso geológico de Bolivia*, 691-695.
- YBERT, J-P. & MIRANDA, Y., 1984. Análisis palinológico de un corte del Sajama. Resultados preliminares. *Document inédit*.

# ESCENARIOS PALEOCLIMATICOS DE LOS ULTIMOS 25 000 AÑOS EN LOS ANDES BOLIVIANOS

ARGOLLO, J. & MOURGUIART Ph.

## INTRODUCCION

El Altiplano es un vasto conjunto endorreico (aproximadamente 190 000 km<sup>2</sup>) situado en el corazón de los Andes del Perú, de Bolivia y de Chile. Desde un punto de vista climático, es un sistema que presenta un fuerte gradiente Noreste/Suroeste, tanto en lo que se refiere a la temperatura media como a las precipitaciones (Roche *et al.*, 1992). La distribución de las precipitaciones (y de la evaporación) explica, en particular, la existencia al Norte de un gran lago permanente, el lago Titicaca, al centro un lago semi-permanente, el lago Poopó y, al Sur grandes lagos estacionales, los salares de Coipasa y de Uyuni. Parece como si el hidrosistema en su globalidad fuera muy sensible a las variaciones interanuales del clima: en 1983, el lago Poopó se deseca mientras que en 1986, solamente 3 años más tarde, el mismo lago inunda una superficie de aproximadamente 4000 km<sup>2</sup>.

Durante el Cuaternario, el clima de la Tierra sufrió una alternancia de ciclos climáticos llamados períodos glaciares/interglaciales. Los depósitos sedimentarios del Altiplano boliviano conservaron en su memoria estas oscilaciones de gran amplitud. Continuando los trabajos de Steinmann *et al.* (1904) y de Bowman (1909), Servant & Fontes (1978) propusieron un modelo de evolución de los grandes sistemas lacustres acoplados a las variaciones de extensión de los glaciares de la cordillera oriental de Bolivia (Figura 1). Esquemáticamente, el fin del Cuaternario está marcado por 3 grandes oscilaciones positivas de los balances en agua de los lagos tanto de las cuencas Norte (lago Titicaca) como de las cuencas del Sur (lagos Poopó, Coipasa y Uyuni). Si bien la más antigua, la fase "Ballivián", no está datada, las dos siguientes lo están, de < 27 000 años BP para la fase "Minchín" y de 12,5-10,5 ka BP para la fase "Tauca" (Servant & Fontes, 1978). Para estos autores, estas 3 fases lacustres mayores fueron alimentadas por el derretimiento de los glaciares y corresponden a las glaciaciones Sorata, Choqueyapu I y Choqueyapu II, de la más antigua a las más reciente (Figura 1).

Más tarde, otros autores van a cuestionar esta hipótesis (Hastenrath & Kutzbach, 1985; Kessler, 1988; Seltzer, 1992). En efecto, según ellos, el solo derretimiento de los glaciares no puede ser responsable de la creación de los inmensos lagos Minchín y Tauca (63 000 km<sup>2</sup> y 43 000 km<sup>2</sup>, respectivamente, según Hastenrath & Kutzbach, 1985). Su afirmación se basa en un cálculo aproximado del volumen de



hielos, y consecuentemente de aguas, almacenado en los glaciares en el máximo de su avance. El aporte mayor en agua se debería a una fase climática húmeda que ocasionó un aumento de las precipitaciones del orden del 30%, superior a los valores actuales.

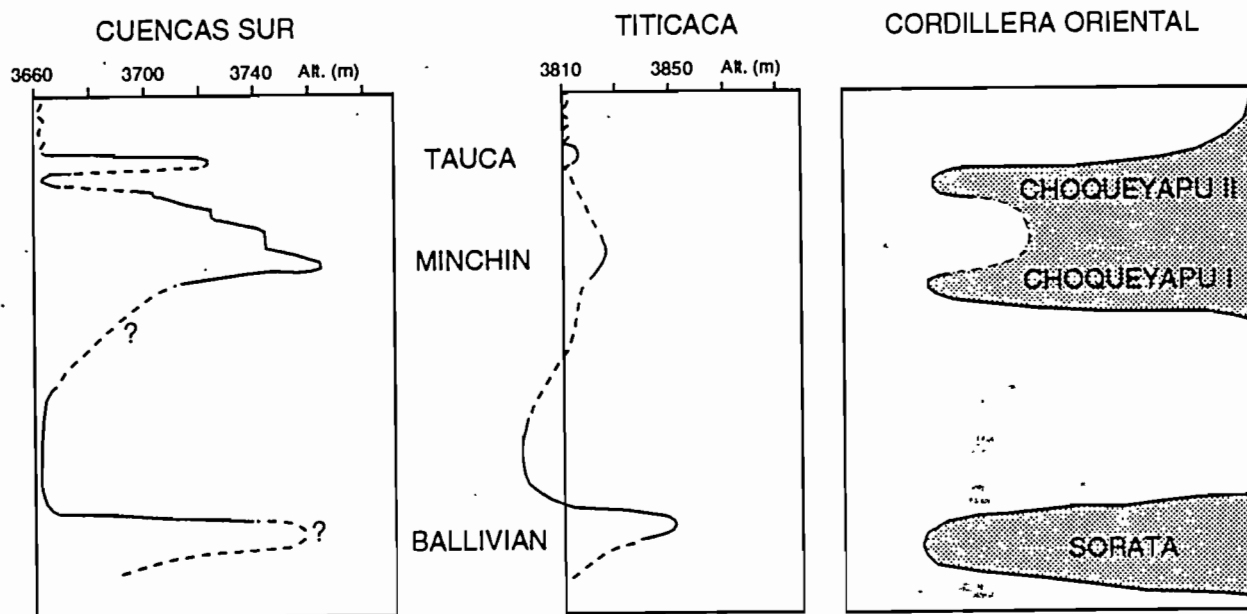


Figura 1. Correlaciones entre los niveles de los lagos y de los glaciares de Bolivia a fines del Cuaternario (según Lavenu *et al.*, 1984).

En el presente artículo, nos proponemos hacer el punto sobre los últimos datos de orden paleohidrológico obtenidos sobre los medios acuáticos *s.l.* que han caracterizado los paisajes del Altiplano boliviano. Las reconstituciones propuestas se apoyan en datos que provienen de 3 medios de sedimentación: el lago Titicaca, los salares de las cuencas Sur, así como los valles de la cordillera oriental.

### ZONA DE ESTUDIO Y CLIMA

El Altiplano de Bolivia, situado a 3650-3900 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 6000 m (Figura 2). Tres grandes cuencas lacustres caracterizan a esta vasta depresión en vías de terraplenamiento desde el Terciario (Lavenu, 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.

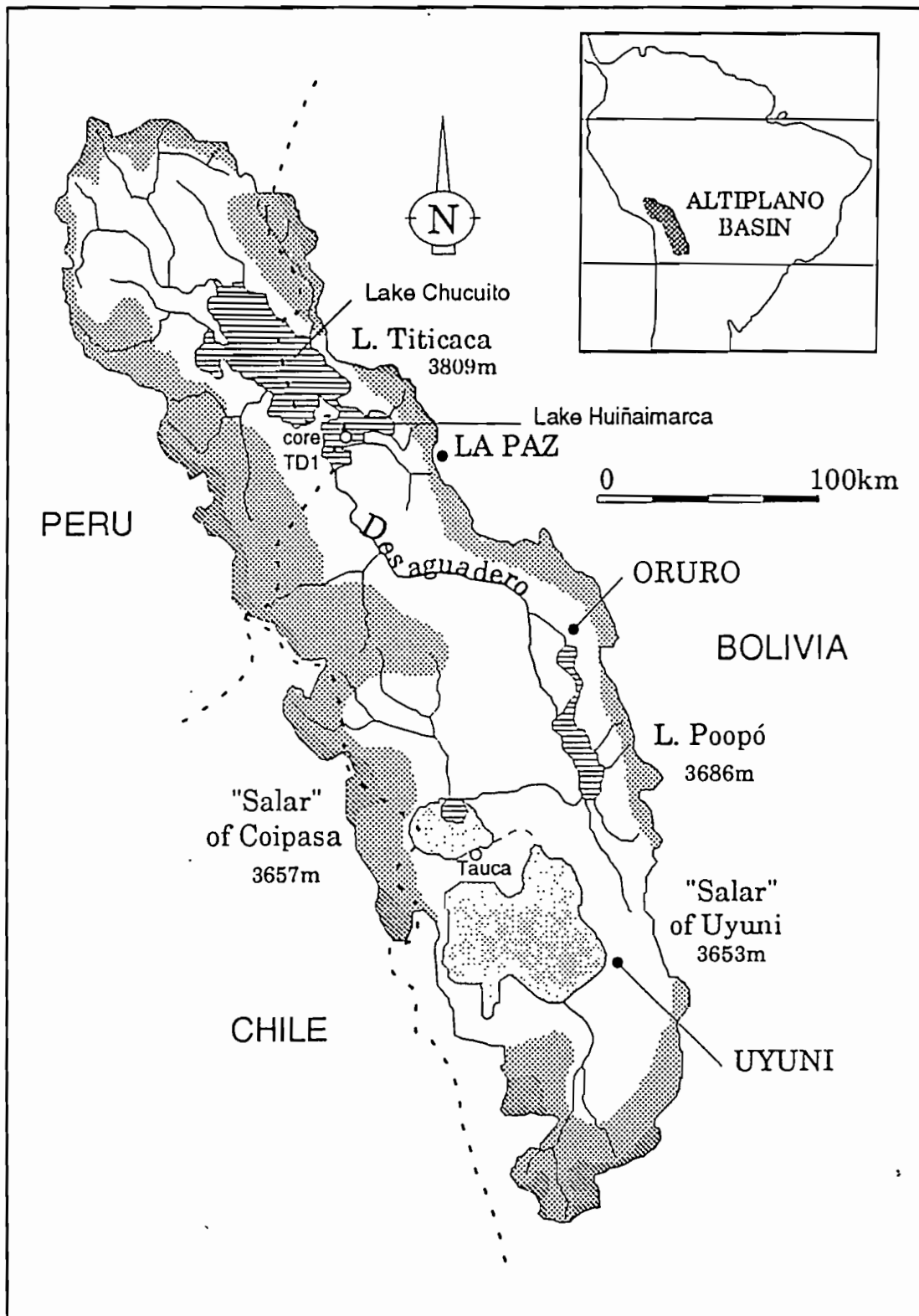


Figura 2. Localización de los principales lugares de estudio.

Los sedimentos son variados y están constituidos por depósitos arcillosos, limosos a arenosos incluso pedregoso de orígenes lacustre, eólico o fluvial, de depósitos carbonatados de origen biogénico... Esta variedad prueba condiciones de sedimentación muy diferentes. Desde el final del Terciario hasta el actual, una alternancia de depósitos, generalmente imputables a cambios climáticos, rellenan las cuencas del Altiplano. En particular, los cambios que intervinieron en el régimen pluvial ocasionaron precipitaciones de yeso hace aproximadamente 8000 BP en el lago Titicaca (Wirmann & Oliveira Almeida, 1987) o, por el contrario, se señalan por líneas de paleoribera datados de 13 790 años BP a alturas de 3770-3780 m, es decir aproximadamente 120-130 m arriba del 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.año<sup>-1</sup> a menos de 200 mm.año<sup>-1</sup>, mientras que la evaporación estimada pasaría de valores cercanos a 1500 mm.año<sup>-1</sup> al Norte a 2000 mm.año<sup>-1</sup> al 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 (Figura 3).

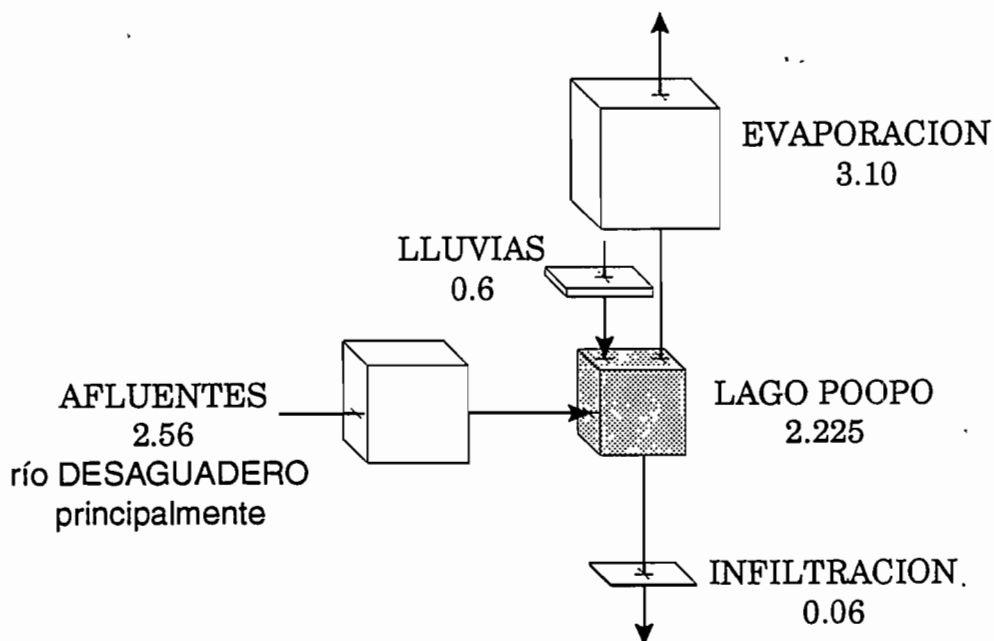


Figura 3. El equilibrio hídrico medio anual del lago Poopó (según Carmouze *et al.*, 1978).

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 del verano austral, de diciembre a marzo. Los vientos de sector Este y la anomalía térmica caliente que constituye el Altiplano en esta estación favorecen las penetraciones frecuentes del aire húmedo proveniente de la Amazonia. Esto ocasiona precipitaciones de carácter tempestuoso, cada vez más episódicas a medida que se aleja del Norte de la cuenca. Opuestamente, durante la estación seca (invierno austral), la ZCIT se desplaza hacia el Norte. Las fluctuaciones de los vientos de Oeste permiten solamente penetraciones esporádicas del aire húmedo amazónico, que provocan precipitaciones aisladas y de baja densidad (Taljaard, 1972).

## **METODOS**

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 los Andes.

**El lago Titicaca** ha proporcionado el registro más completo sobre aproximadamente 25 000 años BP. La muestra TD1, de 5,40 m de longitud, fue extraída por debajo de 19 m de altura de agua en el lago Huiñaimarca (Figura 2). 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 reconstitución de la paleohidrología de esta cuenca lacustre. De una manera sintética, las diferentes 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 también 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 béticos, depende, en el lago Titicaca, de la naturaleza del substrato, de la repartición de los macrofitos, de la energía, del tenor en oxígeno disuelto de la interfase agua-sedimento, etc., términos estrechamente correlacionados a la profundidad de agua (Mourguiart & Carbonel, 1994). Si bien los estudios sedimentológicos y palinológicos permitieron reconstruir cualitativamente incluso semi-cuantitativamente 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 reconstituciones paleohidrológicas (Mourguiart & Roux, 1990; Mourguiart *et al.*, 1992; Mourguiart & Carbonel, 1994).

**Las cuencas Sur** proporcionaron 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) se presentan esencialmente en forma de sedimentos carbonatados (costras microcristalinas induradas, biohermes vegetales impropriamente llamados "stromatolitos", horizontes ricos en Characeae, en moluscos, etc.) arcillosos o limosos ("diatomitas", niveles limosos a arenosos). Un número importante de dataciones fue obtenido en los depósitos calcarios en función de su posición altitudinal, dando así una idea de la evolución batimétrica de los planos de agua.

**Los valles andinos** conservaron la huella de las glaciaciones anteriores 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 enmarcar la edad en que apareció una morrena frontal correspondiente al máximo avance de un glaciar o el de un episodio de sedimentación detrítica espesa.

## RESULTADOS

**El lago Titicaca** - Los resultados de la muestra TDI se encuentran en la figura 4. Dos tipos de información fueron obtenidos y corresponden a las estimaciones relativas a la temperatura y a la altura de agua en el momento del depósito del sedimento. Las tendencias evolutivas mayores fueron fechadas con ayuda de 7 dataciones  $^{14}\text{C}$  (una convencional, laboratorio de Orsay, Francia, y 6 AMS, laboratorio Beta Analytic, Miami, Estados Unidos; Wirrmann & Mourguiart, 1995).

La parte inferior de la muestra (540-200 cm) se caracteriza por bajos niveles lacustres. El lago Huiñaimarca tiene un nivel que oscila entre 3790 y 3795 m de altura (Figura 4), valores que deben compararse con el nivel actual de 3809 m. La temperatura media atmosférica 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 360-300 cm de la Figura 4).

A ~ 200 cm de la punta 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 por ambas partes. Aproximadamente 3 milenios parecen faltar, entre 18 000 y ~ 15 000 años BP. Esta laguna sedimentaria es sinónimo de sequía marcada.

De 200 a 155 cm (~ 15 000 - 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  $13\ 180 \pm 130$  años BP. Este acontecimiento es aparentemente sincrónico de la fase llamada "Tauca" bien localizada en el Sur del Altiplano (Servant & Fontes, 1978; *cf. infra*). El inicio de este episodio lacustre está marcado por temperaturas más bajas que la Actual ( $-2^{\circ}\text{C}$ ). Más allá, la palinología no proporciona ninguna información respecto a las temperaturas medias atmosféricas porque, probablemente, las variaciones permanecieron bajas 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 (Wirmann & Oliveira Almeida, 1987; Wirmann *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; Figura 4). De 155 a 85 cm, los niveles lacustres permanecen muy bajos con oscilaciones importantes en la cima de esta ecozona. Hacia los 85 cm ( $\sim 3900$  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, fechado de  $\sim 2300$  años BP (Mourguiart *et al.*, 1992).

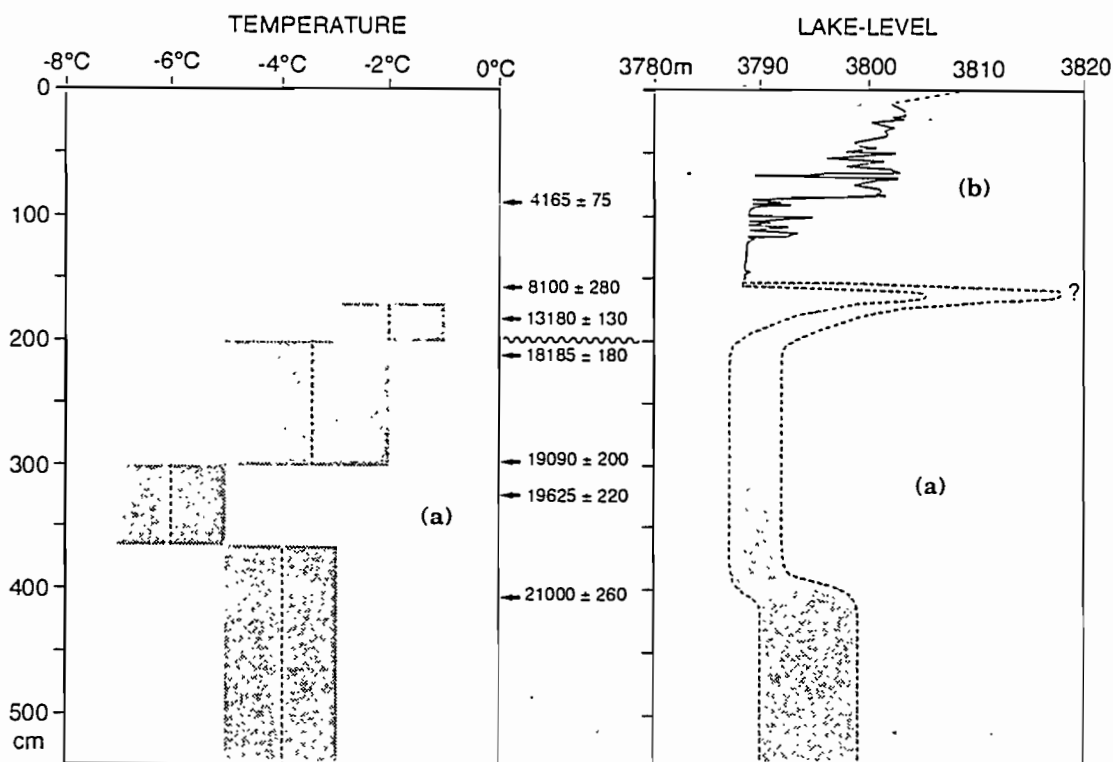


Figura 4. Paleotemperaturas y paleoniveles lacustres de los últimos 25 milenarios reconstruidos a partir (a) del análisis del polen (según Ybert, 1992); y (b) del análisis de las faunas de ostrácodos (Mourguiart *et al.*, 1992).



De 10 cm a la punta de la muestra TDI, 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 TDI. No obstante, podemos concluir que el lago apenas ha alcanzado su nivel actual recientemente.

**Las cuencas del Sur** - En la figura 5 aparecen las relaciones edades/altura. Las edades fueron establecidas a partir de organismos fosilizados y de depósitos carbonatados (moluscos, biohermes 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).

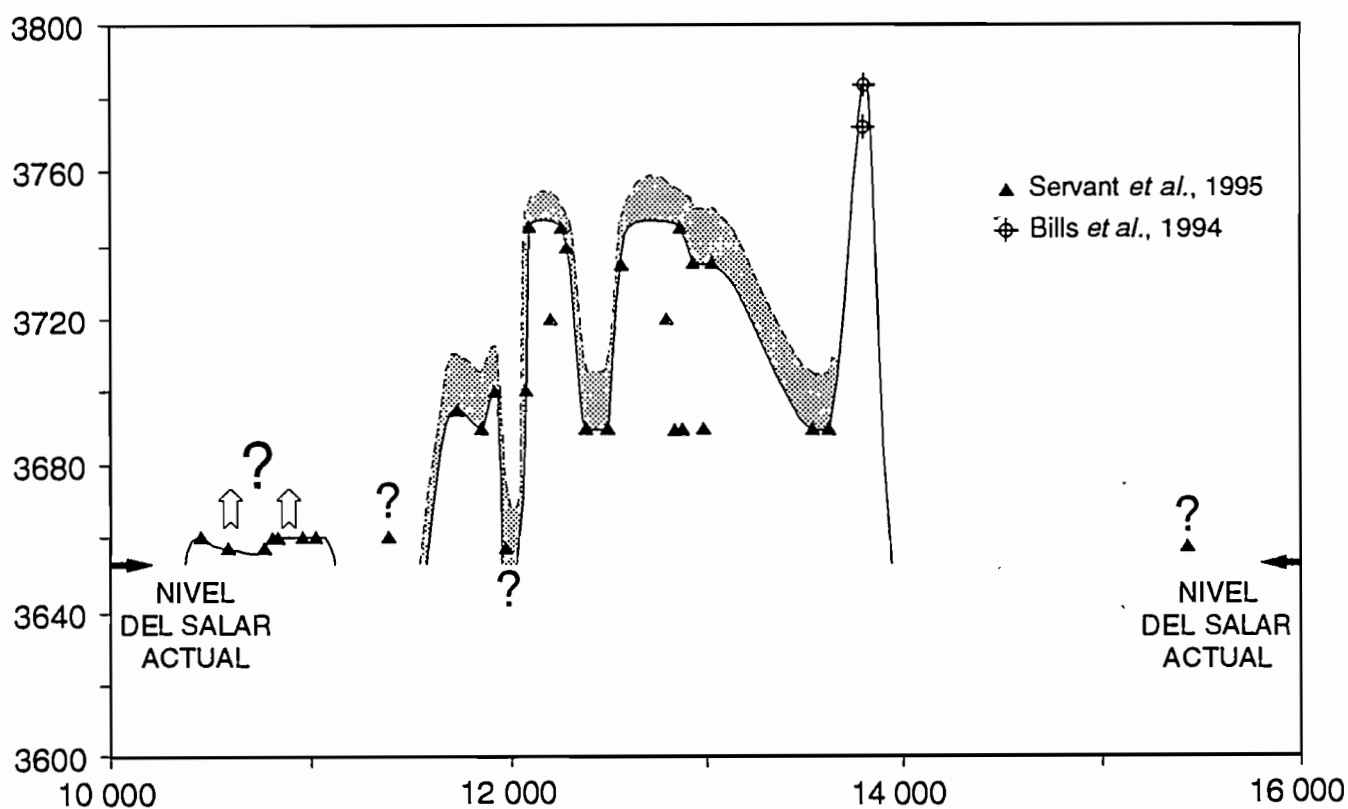


Figura 5. Fluctuaciones de los niveles del "lago Tauca" durante el Tardi-Glaciario según los datos de Servant *et al.*, 1995, y de Bills *et al.*, 1994.

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; Figura 5) y las obtenidas a partir de costras microcristalinas induradas (Servant *et al.*, in press; edades < 11 500 años BP de la figura 5), la mayoría de las dataciones  $^{14}\text{C}$  fue obtenida en macrofitos (characées o biohermes 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 7,5-8m 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-envoltura 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 (Figura 5).

La fase lacustre "Tauca" parece más compleja en su evolución de lo que se habían supuesto los primeros autores (Servant & Fontes, 1978; Figura 1). Los niveles alcanzados por los paleolagos Poopó, Coipasa y Uyuni en el paroxismo del 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.

**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 (Figura 6).

- 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 morrena M1a, está datado de 14 300 años BP. En ciertos valles, el avance glacial que corresponde a esta fase M1b retrabajó 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 llamado 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 las anteriores (2-3 km río arriba) y son datadas anteriores a 10 500 - 10 000 años BP. Existen fuertes conjeturas para decir que este acontecimiento, también localizado en los Andes del Perú, es sincrónico del *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 *Little Ice Age* (o Pequeña Edad de Hielo), período que data de los siglos XVI y XIX (Thompson *et al.*, 1986).

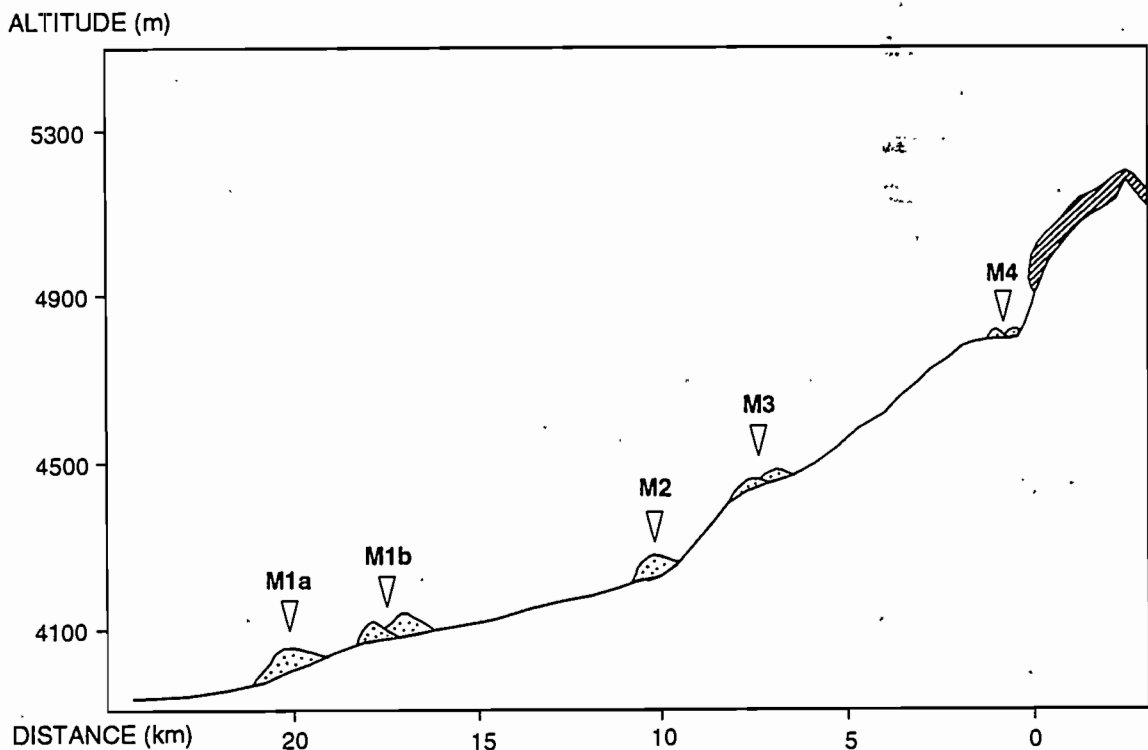


Figura 6. Diagrama sintético mostrando la posición de las morrenas en el glaciar y durante el neoglaciar (según Gouze *et al.*, 1986).

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 los bajos fondos. Así, fueron identificadas 3 fases de erosión generalizada y fechados cerca de 17 000 - 13 500 años BP, de 7500 - 6000 años BP y posteriormente a 1500 o 500 años BP (Servant & Fontes, 1984).

## DISCUSION

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 sincrónicas de una oscilación positiva de los balances en agua del lago Titicaca (Figura 4). Con referencia al esquema hidroclimático actual (ver la figura 3), es totalmente legítimo pensar que el lago Titicaca ha fluctuado de manera importante entre ~ 14 000 y ~ 10 500 años BP a semejanza de las cuencas del Sur (Figura 5). Por otra parte, la limitación impuesta por la precisión relativa de las edades radiométricas no permite correlacionar los acontecimientos lacustres de la fase Tauca (Figura 5) a las pulsaciones de los glaciares de la Cordillera oriental de los Andes de Bolivia (Figura 6). 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 del 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 sur) se elevaba algunos metros (Wirrmann & 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.

## CONCLUSION

La evolución paleoclimática, deducida de la paleohidrología (Figuras 4, 5 y 6), 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 sur (Steinmann *et al.*, 1904; Servant & Fontes, 1978); avance glaciar hacia 19 000 años BP? (morrena M1a);

- de 18 000 a 15 000 años BP, ninguna información disponible, ni al Norte, ni al Sur del Altiplano; fase climática seca;

- de ~ 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 8000 años BP, nuevo desecamiento del lago Huiñaimarca acompañado de un retroceso rápido de los glaciares (Seltzer, 1992; Francou *et al.*, 1995);

- de 8000 a 3900 años BP, mejoramiento muy ligero de los balances en agua del lago Huiñaimarca;

- de 3900 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 concertada 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 recibir 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 deberían aproximarse a las estimaciones dadas por Grosjean (1994) para el extremo sur del Altiplano (salar de Atacama).

## REFERENCIAS CITADAS

- ARGOLLO, J., GOUZE, Ph., 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., EMENGER, 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.

- BOULANGE, B., VARGAS, C. & RODRIGO, L. A. 1981. La sédimentation actuelle dans le lac Titicaca. *Rev. Hydrobiol. trop.*, **14** (4), 299-309.
- BOWMAN, I. 1909. The physiography of the Central Andes. *Amer. Journ. Sci.*, **4** (28), 373-402.
- CARMOUZE, J.P., ARZE, C. & QUINTANILLA, J. 1978. Circulación de materia (agua - sales disueltas) através del sistema Pluvio-lacustre del Altiplano: la regulación hídrica é hidroquímica de los lagos Titicaca y Poopó). *Cahiers ORSTOM, Série Géologie*, **10** (1), 49-68.
- CLAPPERTON, C.M. 1993a. *The Quaternary Geology and Geomorphology of South America*. Elsevier, Amsterdam.
- 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. & GARCIA, E. 1983. Répartitions, biomasses et productions des macrophytes du lac Titicaca. *Rev. Hydrobiol. trop.*, **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. *Eos*, Fall meeting, 118-119.
- FRANCOU, B., MOURGUIART, Ph. & FOURNIER, M. 1995. Phase d'avancée des glaciers au Dryas récent dans les Andes du Pérou. *C. R. Acad. Sci. Paris*, **320**, 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. *C. R. Acad. Sc. Paris, Série II*, **303** (3), 219-224.
- 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, Ph. 1992. Higher plants: Distribution and biomass. In: C. Dejoux & A. Iltis (eds.), *Lake Titicaca. A synthesis of Limnological Knowledge, Monogr. Biol.*, **68**, 241-252, 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: C. Dejoux & A. Iltis (eds.), *Lake Titicaca. A synthesis of Limnological Knowledge, Monogr. Biol.*, **68**, 3-15, Kluwer Academic Publishers.
- LAVENU, A., FORNARI, M. & SEBRIER, M. 1984. Existence de deux nouveaux épisodes lacustres quaternaires dans l'Altiplano péruvo-bolivien. *Cahiers ORSTOM, Série Géologie*, **14** (1), 103-114.
- MOURGUIART Ph & CARBONEL P. 1994 - A quantitative method of palaeolake-level reconstructions using ostracod assemblages : an example from the Bolivian Altiplano. *Hydrobiologia* , **288**: 183-193.
- MOURGUIART, Ph. & 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, Ph., WIRRMANN, D., FOURNIER, M. & SERVANT, M. 1992. Reconstruction quantitative des niveaux du petit lac Titicaca au cours de l'Holocène. *C. R. Acad. Sci. Paris*, **315**, Série II, 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: C. Dejoux & A. Iltis (eds.), *Lake Titicaca. A synthesis of Limnological Knowledge, Monogr. Biol.*, **68**, 63-88, Kluwer Academic Publishers.
- RODRIGO, L. A. & WIRRMANN, D. 1992. General aspects of present-day sedimentation. In: C. Dejoux & A. Iltis (eds.), *Lake Titicaca. A synthesis of Limnological Knowledge, Monogr. Biol.*, **68**, 23-28, Kluwer Academic Publishers.
- SELTZER, G. O. 1992. Late Quaternary glaciacion of the Cordillera Real, Bolivia. *Journal of Quaternary Science*, **7**, 87-98.
- SELTZER, G. O. 1994. A lacustrine record of Late Pleistocene climatic change in the subtropical Andes. *Boreas*, **23**, 105-111.
- SERVANT, M. & FONTES, J. Ch. 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. Ch. 1984. Les basses terrasses fluviales du quaternaire récent des Andes boliviennes. Datations par le <sup>14</sup>C. Interprétation paléoclimatique. *Cahiers ORSTOM, Série Géologie*, **14** (1), 15-28.
- SERVANT, M., FOURNIER, M., ARGOLLO, J., SERVANT-VILDARY, S., SYLVESTRE, 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. *C. R. Acad. Sci. Paris*, **320**, 729-736.

- STEINMANN, G., HOK, H. & BISTRAM, A. 1904. Zür Geologie des suedestland Bolivien. *Zbl. Miner.*, 5, 1-4.
- TALJAARD, J.J. 1972. Synoptic meteorology of the southern hemisphere. In: *Meteorology of the Southern Hemisphere*, Newton, C.W. (ed.), *Meteorol. Monogr.*, 13, 139-213.
- THOMPSON, L.G., MOSLEY-THOMPSON, E.P., DANSGAARD, W. & GROOTES, P.M. 1986. The "Little Ice Age" as recorded in the stratigraphy of the Quelccaya ice cap. *Science*, 234, 361-364.
- WIRRMANN D. & MOURGUIART Ph. 1995. Late Quaternary spatio-temporal limnological variations in the Altiplano (South America). *Quaternary Research*, 43, 344-354.
- WIRRMANN, D., MOURGUIART, Ph. & de OLIVEIRA ALMEIDA, L. F. 1988. Holocene sedimentology and ostracodes repartition in Lake Titicaca. Paleohydrological interpretations. In: Rabassa, J. (ed.), *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula*, 6, 89-127, Balkema, Rotterdam.
- WIRRMANN, D. & de 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, Ph. 1992. A 20,000 years paleohydrological record from Lake Titicaca. In: C. Dejoux & A. Iltis (eds.), *Lake Titicaca. A synthesis of Limnological Knowledge, Monogr. Biol.*, 68, 40-48, Kluwer Academic Publishers.
- YBERT, J. P. 1992. Ancient lake environments as deduced from pollen analysis. In: C. Dejoux & A. Iltis (eds.), *Lake Titicaca. A synthesis of Linnological Knowledge, Monogr. Biol.*, 68, 49-60, Kluwer Academic Publishers.

## GENESIS DE LOS LAGOS SALADOS

François Risacher

Todos han escuchado hablar de esos lugares más o menos míticos como el mar Muerto, el Gran Lago Saldo, el Valle de la Muerte, y de manera más prosaica, de esos desiertos de sal donde se batieron los records de valocidad en el suelo. Estos son sólo algunos de los cincuenta mil lagos salados y costras de sal repartidos en todos los continentes incluyendo la Antártica. Su importancia económica y científica no tiene ninguna proporción con el lugar tan modesto que ocupan en los manuales de geología. Se sabe, por ejemplo, que estos sistemas contienen las mayores reservas de litio en el mundo y que son explotados para extraer diferentes sales como los boratos, el potasio o los carbonatos y sulfatos de sodio.

Para los científicos, los lagos salados son también registradores de las fluctuaciones climáticas, verdaderos laboratorios químicos naturales, e incluso reservas de seres vivientes capaces de adaptarse a condiciones extremas

Los depósitos formados por evaporación (evaporitas) en medio continental son explotados por ciertas sales desde la Antigüedad: el cloruro de sodio para la alimentación y los carbonatos de sodio como detergentes. Los Egipcios utilizaban el natron, un carbonato de sodio hidratado, para conservar las momias.

Algunos lagos son reservorios potenciales de energía térmica. Son los lagos estratificados donde una capa de salmuera de densidad elevada es recubierta por una capa menos densa. La interfase entre los dos deja penetrar la radiación solar en la capa inferior, pero no la deja salir, lo que ocasiona un recalentamiento de la salmuera profunda. Un ejemplo espectacular es el lago salado Vanda en Antártica. Helado en su superficie, su temperatura alcanza los 25 °C en profundidad. Este tipo de lago podría ser utilizado en un futuro lejano como fuente de energía.

Se encuentran lagos salados y costras de sal en todas las zonas áridas del globo donde la evaporación potencial (la altura de agua anual que puede evaporar la atmósfera) es superior a la pluviosidad. Esta condición climática fundamental reina en cuatro cinturones aproximadamente paralelos al ecuador: a lo largo de los trópicos de Cáncer y de Capricornio así como en las zonas polares, ártica y antártica. Así, contrariamente a una idea bastante expandida, la formación de las evaporitas no está relacionada con los climas calientes.

Debido al aislamiento de las evaporitas continentales en los desiertos, su análisis científico es bastante reciente. Los primeros estudios se remontan a la segunda mitad del siglo XIX. Se refieren a las cuencas americanas descubiertas durante la conquista del oeste, y sobre el mar Muerto. La atención de los primeros observadores se centró sobre todo en la presencia, alrededor de las cuencas y muy por debajo del nivel actual



de los lagos, de terrazas y de sedimentos lacustres que prueban la existencia de antiguos lagos mucho más extendidos que los lagos actuales. Por ejemplo, el Gran Lago Salado, en Utah, hoy en día una superficie de 2600 km<sup>2</sup> y una profundidad de 8 m. Pero durante el Cuaternario, hace algunas decenas de miles de años, su cuenca estaba ocupada por un lago de 50 000 km<sup>2</sup> de superficie y de 300 m de profundidad. Asimismo, un lago tres veces más extendido que el mar Muerto recubría en otros tiempos todo el valle de Jordania. Más tarde, parece que una gran parte de los lagos salados y costras de sal en el mundo eran las reliquias de vastos paleolagos del Cuaternario.

El récord de superficie pertenece tal vez al predecesor del actual lago Eyre en Australia, que se extendía sobre 100 000 km<sup>2</sup>. El salar de Uyuni, en el Altiplano boliviano, proviene del desecamiento de un lago de 45 000 km<sup>2</sup> de superficie. Allí donde hoy en día sólo se ve desierto, se encontraban, no hace mucho tiempo extensiones de agua de superficie aproximada a las de los más grandes lagos actuales del mundo, el Baikal o los Grandes Lagos americanos.

Muy pronto, se comprendió que el nivel de los lagos salados era un buen registrador de las fluctuaciones climáticas. Un lago salado permanente se caracteriza por su superficie de equilibrio y no por su volumen. Resulta que cualquier variación, por más mínima, de los parámetros climáticos, acarrea rápidamente una variación de la superficie del lago y por lo tanto de su nivel. El estudio de los antiguos lagos (paleolimnología) y la paleoclimatología fueron los primeros polos de interés en el estudio de las cuencas evaporíticas continentales. Los cambios climáticos actuales, como el posible recalentamiento de la Tierra y la desertificación de Sahel, han reactivado el interés de los lagos salados para estudiar los climas del Cuaternario.

Hacia fines de los años 1960, un nuevo dominio de investigaciones se abrió a los geoquímicos. Estos observaron primero que las evaporitas continentales eran mucho más variadas que las evaporitas marinas. Por una parte, todas las sales marinas se encuentran también en las cuencas continentales. Por otra parte, existe una familia de sales ausentes de sedimentos marinos: son los carbonatos de sodio, como el natrón, que precipitan, a partir de salmueras muy básicas, pH superior a 10. Asimismo, los sulfatos de sodio, los boratos y los silicatos de sodio son casi exclusivamente sales de evaporitas continentales. El catión mayor de las salmueras continentales es casi siempre el sodio (Na<sup>+</sup>). Hay pocas salmueras de magnesio (Mg<sup>++</sup>) o calcio (Ca<sup>++</sup>) dominante y no se conocen salmueras naturales donde el potasio (K<sup>+</sup>) sea el catión principal. Los aniones mayores son el cloruro (Cl<sup>-</sup>), el sulfato (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>) o el carbonato (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>). Así, hay numerosas combinaciones posibles en constituyentes mayores.

Por qué tal diversidad de composición química de las salmueras y de las sales que se derivan? Es sorprendente encontrar lagos carbonatados sódicos en cuencas casi enteramente constituidas de rocas cristalinas (granitos o basaltos) y desprovisto de rocas carbonatadas. Robert Garrells y Fred Mackenzie, de la Northwestern University,

establecieron en 1967 el balance geoquímico de un lago carbonatado sódico de Nevada -punto de partida del estudio geoquímico de los lagos salados- mostrando así que el origen de esta especie de lago era la trampa del gas carbónico del aire. En efecto, el agua de lluvia contiene ácido carbónico proveniente de la disolución del gas carbónico de la atmósfera. Esta ataca los silicatos de las rocas cristalinas de la cuenca de drenaje transformándolas en arcillas y liberando los cationes  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$  y del ácido silícico no disociado  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  en las aguas de las fuentes y de los ríos. El anión dominante que neutraliza las cargas eléctricas de los cationes no puede ser sino el bicarbonato  $\text{HCO}_3^-$  que proviene de la asociación del ácido carbónico del agua de lluvia. Cuando el agua diluida inicial se concentra por evaporación, sólo se precipitan minerales carbonatados: desde la calcita ( $\text{CaCO}_3$ , el menos soluble) hasta el natrón ( $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10 \text{H}_2\text{O}$ , el más soluble). La salmuera se vuelve alcalina y su pH se eleva durante la evaporación.

Pero aún no se encontraba explicación clara respecto a la gran diversidad química de las evaporitas continentales. El mérito fue para Laurence Hardie y Hans Eugster de la Johns Hopkins University en Baltimore, quienes presentaron, en 1970, un modelo de evolución de las aguas por evaporación que da cuenta de las principales variedades de salmueras y de sales encontradas en los lagos salados. Según este modelo, la composición de la salmuera final y la naturaleza de las sales (sales neutras o sales alcalinas) que resultan, dependen fundamentalmente de la composición inicial del agua dulce de partida, la cual depende en gran parte de la naturaleza de las rocas de la cuenca de drenaje (rocas eúptivas, sedimentarias, etc.). Una modificación muy baja de esta composición puede conducir a una salmuera final totalmente diferente. La evaporación puede así ampliar muy bajas variaciones de la composición de las soluciones durante interacciones con los sedimentos, lo que a cambio permite detectar tales reacciones.

El problema es calcular exactamente la evolución teórica de la composición química de un agua que se evapora, así como la secuencia y las masas de los minerales que se precipitan. Esto sólo puede hacerse por medio de programas informáticos bastante complejos. Harold Helgeson y sus colegas de la universidad Northwestern y luego de Berkeley, fueron los primeros en poner a punto tales programas al final de los años 1960. El desarrollo de la micro-informática al principio de los años 1980 permitió la gran difusión de los programas informáticos de hidroquímica.

Gracias a estos programas, se compara la evolución real de las soluciones que se concentran en la cuenca y las sales que se precipitan a partir de estas soluciones, con su evolución calculada por medio de la computadora. Las divergencias entre las dos evoluciones traducen reacciones no previstas por el modelo y muy a menudo difíciles de evidenciar a través de la observación directa. Es así como hemos podido detectar recientemente una contaminación por el azufre atmosférico en la mayoría de las pequeñas cuencas evaporíticas del sur de Bolivia .

El estudio de las evaporitas continentales nos ha llevado, entre otros, a estudiar en detalle la mayor costra de sal del mundo (10 000 km<sup>2</sup>): el salar de Uyuni en el Altiplano de Bolivia. Su superficie de 10 000 km<sup>2</sup>. Su estudio económico y científico fue realizado en el marco de un convenio entre el ORSTOM, la universidad de La Paz y el Ministerio de Minas de Bolivia. Aún protegido por el hombre -no ha sido explotado ni polucionado-, este salar representa un modelo de estudio ideal para comprender los mecanismos de formación de los depósitos evaporíticos continentales. Por otro lado, los resultados de orden económico están disponibles para la investigación científica, pero no sucede lo mismo con los estudios efectuados por las compañías mineras.

El salar de Uyuni ocupa, a 3 653m de altura, la depresión central del Altiplano entre las cordilleras occidental y oriental de los Andes. Es una zona desértica fría donde las temperaturas descienden hasta - 20 °C en invierno. El salar es una costra de halita (la sal de cocina, NaCl) muy plana y muy blanca impregnada, a partir de una quincena de centímetros de profundidad, de una salmuera intersticial muy rica en litio (en forma de catión Li<sup>+</sup>), potasio, magnesio y boro. Estos son elementos de gran interés económico que han motivado el estudio del salar de Uyuni. Se realizaron cuarenta sondeos, uno a 121 metros de profundidad, gracias a una pequeña sondeadora-saca muestras proporcionada por el ORSTOM. El espesor máximo de la costra de sal es de once metros. Se encuentra sobre sedimentos lacustres.

Las concentraciones de boro y de litio en las salmueras son las más elevadas del mundo -la concentración media en litio de la salmuera intersticial es de 550 mg/l con un máximo de 4700 mg/l (el agua de mar sólo contiene 0,1 mg/l y el litio explotado en el lago salado de Searles Lake en los Estados Unidos tiene tenores del orden de 80 mg/l). El boro del salar de Uyuni tiene una concentración media de 460 mg/l con un máximo de 4300 mg/l (el agua de mar contiene 4,7 mg/l). El mayor yacimiento de ulexita (borato de sodio y de calcio) de Bolivia se encuentra en el borde sur del salar. El potasio tiene tenores comprendidos entre 5 y 30 g/l. Las salmueras más concentradas del salar de Uyuni son, según nuestro conocimiento, las únicas cuyos dos cationes mayores son el magnesio y el litio.

El litio y el boro provienen de la alteración de rocas volcánicas del Altiplano. Estas tienen tenores relativamente elevados en estos dos elementos, pero no excepcionales: 40 ppm (parte por millón) en litio y 60 ppm en boro, en promedio. Su concentración se explica por la fuerte aridez y las bajas temperaturas que limitaron el desarrollo de arcillas y suelos cuyo complejo absorbente, muy rápidamente absorbido, no pudo fijar suficientemente el boro y el litio. De esta manera, estos elementos se concentraron libremente en las aguas superficiales, luego en las cuencas sedimentarias. Por otro lado, no se conocen minerales de litio que puedan atrapar este elemento, y en cuanto al boro, los boratos que se cristalizan en estas cuencas sólo consumen una pequeña cantidad. Por los demás, la concentración de estos elementos prosigue aún hoy en día pues el salar de Uyuni es en parte fósil.

El estudio de las antiguas formaciones lacustres alrededor de la cuenca ha mostrado que el salar de Uyuni provenía del desecamiento, hace dos mil años, de un inmenso lago salado de 45 000 km<sup>2</sup> de superficie y de 80 m de profundidad, bautizado como el lago Tauca. ¿Entonces de dónde viene la sal que se encontraba disuelta en este paleolago? Se conoce la masa de todos los componentes de las sales y salmueras del salar de Uyuni. Por otro lado, se conoce el volumen del paleolago Tauca (1200 km<sup>3</sup>).

Por lo tanto se pudo reconstruir la composición química de este antiguo lago. Era un lago clorurado-sódico de 80 g/l de salinidad total, es decir un poco más de dos veces la del agua de mar. Ahora bien, esta composición es inhabitual. Las salmueras de todos los lagos salados del Altiplano contienen aproximadamente un 75% de cloruro de sodio y 25% de otras soluciones. El lago Tauca tenía 95% de sal ordinaria (halita) y solamente 5% de otras soluciones. Era muy pobre en constituyentes secundarios, o enormemente rico en cloruro de sodio.

El problema tiene una importancia económica. En efecto, en el caso en que esta anomalía se debiera a una pérdida de constituyentes secundarios, como el litio, habría que buscarlos en profundidad. Un sondeo de 121 m fue realizado en la zona central del salar. Se han descubierto otras once costras de sal separadas por sedimentos lacustres: una especie de enorme milhojas.

La conclusión es que una decena de lagos salados, por lo menos, han ocupado sucesivamente el Altiplano central durante el Cuaternario, reflejando tantas oscilaciones climáticas y episodios sedimentarios que han fosilizado los niveles de sal. Al desecarse, cada uno de estos lagos depositaba una nueva costra de sal. Cada vez que un nuevo lago se establecía en la cuenca, redisolvió una parte de la costra depositada por el lago anterior.

Eso significa que cada lago era enriquecido con cloruro de sodio y que esta anomalía se transmitía de lago en lago por medio de costras de sal. Imaginemos que un nuevo lago viniera a ocupar actualmente el Altiplano. Este redisolvería una parte del salar de Uyuni y su composición química presentaría un fuerte exceso de sal ordinaria en relación con las soluciones secundarias.

Por otro lado, las salmueras que impregnaban todo el perfil no muestran ningún aumento de sus tenores de litio, potasio, magnesio y boro, con la profundidad, lo que confirma que estos elementos no se infiltraron bajo la costra del salar de Uyuni.

La sal del salar de Uyuni proviene de disoluciones sucesivas de antiguas costras de sal. Pero esto sólo aplaza el problema en el tiempo. ¿De dónde proviene la sal de las costras más antiguas en la base del perfil? Se constata que numerosas subidas de yeso (diapiros) de edad terciaria afloran en todo el Altiplano. Son los restos de antiguos salares. La existencia de fuentes de salmueras cloruradas-sódicas en uno de estos diapirs sugiere que la sal de las costras profundas proviene del deslave de la sal de estas antiguas formaciones evaporíticas al comienzo de la historia lacustre del Altiplano, hace algunas centenas de miles de años. Hoy en día sólo queda yeso, mineral poco soluble.

Pero aquí también se ha diferido el problema en el tiempo. ¿De dónde viene la sal de los salares del Terciario? Para responder esta pregunta tan importante nuestros conocimientos sobre las evaporitas del Altiplano boliviano no bastan. Existen miles de kilómetros cúbicos de sal continental terciaria, en Chile y en Argentina. Algunos autores se inclinan por un origen volcánico del cloro y del sodio. O bien hubo en una época anterior al Terciario depósitos de evaporitas marinas que habrían sido recobradas más tarde en medio ambientes continentales? Se conocen efectivamente en Bolivia formaciones evaporíticas en el Cretáceo, en el Pérmico e incluso en el Cámbrico. Son éstas el origen primero de la sal?

Futuros estudios conjuntos de la geodinámica de las cuencas y de la geoquímica de las antiguas evaporitas proporcionarán tal vez una respuesta a esta pregunta.



#### 4. Lista de los participantes en el convenio \*

Investigadores permanentes, investigadores en misión temporal de apoyo y tesisistas.

##### Personal boliviano

Luis A. Rodrigo  
Oscar Ballivian  
Marcelo Arduz  
Carlos Vargas  
Fernando Ortuño  
Mario Blanco  
Germán Fernandez  
Germán Rivera  
Yolanda Miranda  
Eduardo Soria  
Luis de Oliveira Almeida  
Jaime Argollo  
Wilge Mancilla  
Edgar Vargas  
Hebert C. Chavez  
Adolfo Armendia  
Hugo Alarcon  
Elena Gorinova  
Fernando Blanco  
José Luis Lizeca  
Luis Pozzo  
Carlos Thompson  
Wilfredo Ramos  
José Luis Telleria  
Victor Ramirez  
Eddy Baldellon  
Ivan Monroy  
Gonzalo Quenta  
Leocadio Ticlla  
Sonia Perez  
Claudia Gonzales  
Silvia Estensoro  
Eduardo Soria  
Edwin Saavedra  
Felix Espinoza  
Marcelo Aldunate

##### Personal francés (ORSTOM u Organismos asociados)

Michel Servant  
Simone Servant-Vildary  
François Risacher  
Alain Lavenu  
Bruno Boulangé  
Jean-Pierre Ybert  
Jean-Charles Fontes  
Philippe Magat  
Michel Bonneton  
Philippe De Pachtere  
Denis Wirrmann  
Cécile Ostria  
Philippe Gouze  
Claude Martinez  
Thierry Sempéré  
Alain Labrousse  
René Marocco  
Gérard Laubacher  
Philippe Mourguiart  
Gérard Hérail  
Michel Fornari  
Jean François Dumont  
Laurent Bailly  
Catherine Dorbath  
Pierrick Roperch  
Pierre Soler  
Gabriel Carlier  
Bernard Francou  
Aïcha Badou  
Naïma Miskane  
Claude Hillaire-Marcel  
Pascal Rondeau  
Marc Fournier  
Mireille Delaune  
Michel Pourchet  
Michel G. Bonhomme  
Michel Bernat  
Florence Sylvestre

---

\* Visto el carácter interdisciplinario de las investigaciones algunas personas colaboraron en varios de los proyectos; también en ciertos casos participaron personales de otros Institutos como Químicos, Hidrólogos, etc.).





## 5. LISTA BIBLIOGRAFICA DE LOS TRABAJOS DE GEOLOGIA.

### 1976

- BOULANGÉ B., Y RODRIGO L., A. 1976 - Primeros resultados limnológicos del lago Titicaca parte boliviana del lago Huiñamarca. La Paz, convenio UMSA-ORSTOM 11 p. inedito.
- RISACHER F. y MIRANDA J., 1976 - Indicios de interés económico en los salares del Sud Lipez. Convenio UMSA-ORSTOM, La Paz, Inédito, 8 p., multigr.
- RISACHER F. y MIRANDA J., 1976 - Litio y potasio en las borateras del río Grande en los salares del Sud Lipez. Convenio UMSA-ORSTOM, La Paz, Inédito,
- FONTES J-C. SERVANT M., 1976 - Dataciones radiométricas sobre el Cuaternario reciente del Altiplano de Bolivia. 1° Congreso Nacional de Geología. Potosí, Bolivia.
- RISACHER F., 1976 - informe preliminar sobre los estudios realizados en algunos salares del Altiplano meridional boliviano La Paz, convenio UMSA-ORSTOM, 33p.
- RISACHER F., 1976 - Reconocimiento de algunos salares del Altiplano boliviano. Convenio UMSA-ORSTOM, La Paz, Bolivia Inédito, 6 p + mapas, multigr.

### 1977

- BALLIVIAN O, RISACHER F., ECHENIQUE A., 1977 - Estudio geológico-económico de la laguna de Collpa y de la laguna Hediona. Programa Multidisciplinario de Geodinámica y Limnología, Convenio UMSA-ORSTOM, La Paz.
- LAVENU A., 1977 - Neotectónica de los sedimentos plio-cuaternarios de la cuenca de La Paz Bolivia. Revista de Geociencias, UMSA 1, 1, pp. 31-56.
- RODRIGUEZ F. y ORTUÑO F., 1977 - perfiles sísmicos de refracción en la región del lago Titicaca. Revista de Geociencias, UMSA, 2, pp.159-186.
- RISACHER F., 1977 - Informe preliminar sobre los estudios realizados en algunos Salares del Altiplano meridional boliviano. Programa Multidisciplinario de Geodinámica y Limnología, Convenio UMSA-ORSTOM, La Paz, 33 p.
- RISACHER F., MIRANDA J. & CARLO L., 1977 - Litio y potasio en las borateras de Río Grande. Nota preliminar. 2 p. + mapa. multigr.
- SERVANT M., 1977 - El cuadro estratigráfico del Plio-Cuaternario del Altiplano de los Andes tropicales de Bolivia. Revista de Geociencias, 1 1, pp. 23-29.
- SERVANT M., 1977 - Le cadre stratigraphique du Plio-Quaternaire de l'Altiplano des Andes tropicales en Bolivie. Bull. AFEP. Suppl. INQUA. Recherches Françaises sur le Quaternaire 1, N° 50, pp. 324-327.

### 1978

- BALLIVIAN O., BLES J.L. & SERVANT M., 1978 - El plio-Cuaternario de la región de La Paz, Andes orientales, Bolivia . Cah. ORSTOM, sér. Géol., 10 1, pp. 101-111.
- BOULANGE B., RODRIGO L.A. & VARGAS C., 1978 - Morphologie, formations et aspects sédimentologiques du lac Poopó Bolivie. Cah. ORSTOM, sér. Géol., 10 1, pp. 69-78.

- BOULANGE B. & LITHERLAND M., 1978 - Surfaces d'aplatissements en zone amazonienne de Bolivie région de San Ignacio de Velasco-Santa Cruz. Cah. ORSTOM, sér. Géol., 10 1, pp. 145-151.
- CLOCHIATTI R., LE RIBAUT L. & RODRIGO L.A., 1978 - Endoscopie et exoscopie de grains de quartz des formations du Pliocène et du Quaternaire de La Paz Bolivie. Cah. ORSTOM, sér. Géol., 10 1, pp. 127-143.
- ECHENIQUE A., BALLIVIAN O. & RISACHER F., 1978 - Informe geológico-económico de la laguna de Coipa y de la laguna Hedionda. Convenio UMSA-ORSTOM, La Paz, Bolivia. Inédito, 13 p. + anexos.
- INSTITUT DE GEODYNAMIQUE ET LIMNOLOGIE, Convention UMSA-ORSTOM, 1978 - Le programme multidisciplinaire sur l'évolution récente des hauts plateaux andins Bolivie. Cah. O.R.S.T.O.M., sér. Géol., vol. X, n° 1, pp. 5-8.
- LAVENU A., 1978 - Néotectonique des sédiments Plio-Quaternaires du nord de l'Altiplano bolivien région de La Paz-Ayo-Umala. Cah. ORSTOM, sér. Géol., 10 1, pp. 115-126.
- RISACHER F., 1978 - Genèse d'une croûte de gypse dans un bassin de l'Altiplano bolivien. Cah. ORSTOM, sér. Géol., 10 1, pp. 91-100.
- RISACHER F., 1978 - Le cadre géochimique des bassins à évaporites des Andes boliviennes. Cah. ORSTOM, sér. Géol., 10 1, pp. 37-48.
- RISACHER F., BALLIVIAN O. & ECHENIQUE A., 1978 - Informe geológico-económico de la laguna Collpa y de la laguna Hedionda. ORSTOM-UMSA-QUIMBABOL, 13 p. + anexos inédito, multigr.
- RODRIGUEZ F. & ORTUÑO F., 1978 - Perfiles sísmicos de refracción en la región del lago Titicaca. Convenio UMSA-ORSTOM-GEOBOL, 21 p., multigr.
- SERVANT M. & FONTES J.C., 1978 - Les lacs quaternaires des hauts plateaux des Andes boliviennes. Premières interprétations paléoclimatiques. Cah. ORSTOM, sér. Géol., pp. 9-23.
- SERVANT-VILDARY S. 1978 - Les Diatomées des sédiments superficiels d'un lac salé, chloruré, sulfaté, sodique de l'Altiplano bolivien : le lac Poopó. Cah. ORSTOM, sér. Géol., 10 1, pp. 79-87.
- SERVANT-VILDARY S., 1978 - Les Diatomées des dépôts lacustres quaternaires de l'Altiplano bolivien. Cah. ORSTOM, sér. Géol., 11 1, pp. 25-35.

## 1979

- BADAUT D., RISACHER F., PAQUET R., EBERHART J.P. & WEBER F., 1979 - Néof ormation des minéraux argileux à partir des Diatomées : le cas des lacs de l'Altiplano Bolivien. C.R. Acad. Sci., Paris, t. 289, série D, pp. 1191-1193.
- LAVENU A. 1979 - Neotectónica de los sedimentos plio-cuaternarios del Norte del Altiplano. Anales de la VI Convención nacional de Geología, La Paz, Bolivia vol VI, tomo2, pp449-463.
- LAVENU A. & BALLIVIAN O., 1979 - Estudios neotectónicos de las cuencas de Cochabamba, Sucre y Tarija. Cordillera Oriental boliviana. Rev. Acad. Nac. Cien. de Bolivia, Año 2, N° 3, pp. 107-129.
- MANCILLA L., W. 1979 - Geología del Plio-Cuaternario de la cuenca de Sacaba-Cochabamba. tesis, 54p.

- ORTUÑO D., F., 1979 - Determinación del espesor cuaternario de la zona de Huarina y Batallas por el método de sísmica refracción. Tesis, 46p.
- RISACHER F., 1979 - El cuadro geoquímico de las cuencas evaporíticas del Altiplano boliviano. Anales de la VI Convención nacional de Geología, La Paz, Bolivia, 6 2, pp. 427-447.
- RISACHER F. & EUGSTER H.P., 1979 - Holocene pisoliths and incrustations associated with spring-fed surface pools, Pastos Grandes, Bolivia. *Sedimentology*, 26, pp. 253-270.
- RISACHER F., PAQUET H., EBERHART J.P. & WEBER F., 1979 - Sédimentologie.- Néof ormation de minéraux argileux à partir de frustules de Diatomées : le cas des lacs de l'Altiplano bolivien. C. R., 2e Semestre, T. 289, N° 16. pp. 1191-1193.
- RODRIGO L.A., ORTUNO F., VARGAS C.- Características geológicas, geomorfológicas y sedimentológicas de los lagos Khara Khotá y Khotia.
- SERVANT M. & VILLARROEL R., 1979 - Le problème paléoclimatique des Andes boliviennes et de leurs piedmonts amazoniens au Quaternaire, C.R. Acad. Sc. Paris. T 292, pp. 665-668.
- SERVANT M., 1979 - Paleolimnología del lago Khara Kkota. Cordillera Oriental de los Andes. Instituto de Geodinámica y Limnología. Convenio UMSA-ORSTOM, La Paz, 22 p. + mapas, multigr.
- VARGAS C., 1979 - Estudio sedimentológico de los lagos Huiñamarca (lago Titicaca) y Poopó. Tesis, 60p.
- VARGAS C., BOULANGE B., RODRIGO L.A., 1979 Sedimentación del lago Huiñamarca, 25p.
- 1980**
- ARGOLLO J., 1980 - Los piedemontes de la Cordillera real entre los valles de La Paz y de Tuni; estudio geológico, evolución plio-cuaternario. Tesis de grado, 81p.
- BLANCO CASAS M - Evolución plio-cuaternario de la cuenca de Charaña, Cordillera occidental, Bolivia). Tesis de grado, 104p.
- FERNANDEZ G., G., 1980 - Evolución cuaternaria de las cuencas lacustres del suroeste boliviano en la región de Mina Corina (Sud Lipez). Tesis de grado, 139p.
- HERAIL G., ARGOLLO J., FORNARI M., LAUBACHER G. & VISCARRA G., 1980 - El distrito de Tipuani, geología e historia. Ed. Khrysos. pp. 9-15.
- HERAIL G., FORNARI M. & LAUBACHER G., 1980 - Tipuani: Un placer d'or des Andes boliviennes. pp. 4-6.
- LAVENU A., SEBRIER M. & SERVANT M., Néotectonique des Andes Centrales : Pérou, Bolivie. Bull. of the INQUA. Neotectonique Comissions, N° 3, 3 p.
- MAGAT Ph., 1980 - Echantillonnage dans la zone boratée du río Grande. Convenio UMSA-ORSTOM. 10 p.
- MARTINEZ C., 1980 - Structure et évolution de la chaîne hercynienne et de la chaîne andine dans le nord de la Cordillère des Andes de Bolivie. Trav. Doc. ORSTOM, N° 119, 352 p., 2 cartes h.t.
- RETTING S.L., JONES B.F. & RISACHER F., 1980 - Geochemical evolution of brines in the salar of Uyuni, Bolivia. *Chemical Geology*, 30, pp. 57-79.

## 1981

- BALLIVIAN O. & RISACHER F., 1981 - Los salares del altiplano boliviano. Métodos de estudio y estimación económica. ORSTOM-UMSA. 246 p.
- BOULANGE B., VARGAS C., RODRIGO L.A., 1981 - La sédimentation actuelle dans le lac Titicaca. Rev. Hydrobiol. tropicale. 14 (4) pp. 299-309.
- BONNETON M., 1981 - Métallogénie des gisements à étain dominant de la région de Marococala Bolivie. Convenio UMSA-ORSTOM inédito, 20 p., multigr.
- DE PACHTERE Ph., 1981-82 - Le volcanisme effusif Tertiaire de la Meseta de Morococala Cordillère orientale bolivienne, département d'Oruro. Cah. ORSTOM, sér. Géol., XII, n° 2, pp. 117-124.
- FONTES J.C., BOULANGE B. & RODRIGO L.A., 1981 - Carbone 14, Carbone 13 et Oxygène 18 dans les sédiments carbonatés du lac Titicaca. Premières estimations des vitesses de sédimentation et essai de paléoclimatologie. C.R. Acad. Sc. Paris, 293, sér. II, pp. 53-56.
- LAVENU A., 1981 - Derniers résultats acquis concernant les études néotectoniques en Bolivie. Cah. ORSTOM, Sér. Géol., 12 1: 23-28.
- SERVANT M., FONTES J.Ch., ARGOLLO J. & SALIEGE J.F., 1981 - Variations du régime et de la nature des précipitations au cours des 15 derniers millénaires dans les Andes de Bolivie. C.R. Acad. Sc. Paris, t. 292, pp. 1209-1212.
- SERVANT-VILDARY S., 1981-82 - Les Diatomées fluviolacustres pliopléistocène de la formation Charaña. Cah. ORSTOM, sér. Géol., 14 1, pp. 55-102.
- YBERT J.P., 1981-1982 - Analyse palynologique de la coupe holocène du río Chiarjahuira sur l'Altiplano bolivien. Cah. ORSTOM, sér. Géol., 12 2, pp. 125-133.
- YBERT J.P., 1981 - Contribución al estudio del cuaternario del Altiplano Boliviano. Análisis palinológico del corte holoceno del río Chiarjahuira, Anales del II Congreso Latinoamericano de Paleontología. Vol. 2, 26-30 abril, Porto Alegre, Brasil, pp. 847-859.

## 1982

- ARGOLLO J., 1982 - Evolution du Piedmont Ouest de la cordillère Royale (Bolivie) au Quaternaire. These de 3° cycle . Université d'Aix Marseille II, 115 p., multigr.
- FORNARI M., HERAIL G. & LAUBACHER G., 1982 - El oro en la Cordillera Suroriental del Perú: El placer fluvioglacial de San Antonio de Poto Departamento de Puno y sus relaciones con la mineralización primaria de la Rinconada. Quinto Congreso Latinoamericano de Geología Argentina Acta VI, pp. 369-386.
- SERVANT-VILDARY S., 1982 - Altitudinal zonation of mountains diatom flora in Bolivia. Application to the study of the Quaternary. Acta Géol. Acad. Scient., Hungaria, 25 1-2, pp. 179-210.
- VARGAS C., 1982 - La sédimentation lacustre subactuelle d'un bassin intramontagneux: le lac Titicaca (partie lac Huiñamarca, Bolivie). Thèse Doctorat de 3° cycle, Université de Bordeaux I, 106p.
- WIRMANN D., 1982 - Premiers résultats sur l'étude des carottes du lac Huyñamarca. Mémoire d'élève, 30 p., multigr.

## 1983

- BADAUT D. & RISACHER F., 1983 - Authigenic smectite on diatom frustules in Bolivian Saline Lakes. *Géochim. Cosmochim. Acta*, 47, pp. 363-375.
- WIRRMANN D., SERVANT-VILDARY S. & FONTES J.C., 1983 - Oxygène 18, Carbone 13, Carbone 14 et Diatomées dans quatre carottes du lac Huiñaymarca Bolivie. *Doc. Mission ORSTOM La Paz*, 13 p., multigr.
- YBERT J.P., 1983 - Diagramme sporopollinique de la coupe Holocène du rio Chuquiaguillo sur l'Altiplano Bolivien. *Inf. interno*, 14 p., multigr.

## 1984

- LAVENU A., FORNARI M. & SEBRIER M., 1984 - Existence de deux nouveaux épisodes lacustres quaternaires dans l'Altiplano peruvo-bolivien. *Cah. ORSTOM, sér. Géol.* 16 1, pp. 103-114.
- RISACHER F., 1984 - Origine des concentrations extrêmes en bore et en lithium dans les saumures de l'Altiplano Bolivien. *C.R. Acad. Sc. Paris*, 299, sér. II, n° 11, pp. 701-706.
- RISACHER F. & FRITZ B., 1984 - Simulation de l'évaporation sur micro-ordinateur. *Sci. Géol. Bull.*, 37 3, pp. 239-251.
- RISACHER F. & FRITZ B., 1984 - Estimations des variations en fonction de la température des produits de solubilité des principaux sels des milieux évaporitiques. *Sci. Géol. Bull.*, 37 3, pp. 229-237.
- RISACHER F., SAMUEL J. & KREPP G., 1984 - Concentrations extrêmes en molybdène, tungstène et arsenic dans les saumures d'un lac de l'Altiplano de Bolivie. *Indications métallogéniques. C.R. Acad. Sc. Paris*, 299, Sér. II, 19, pp. 1325-1328.
- ROUX M. & SERVANT-VILDARY S., 1984 - Comparaisons statistiques de peuplements de Diatomées fossiles provenant des montagnes de Bolivie. *Cah. ORSTOM, Sér. Géol.*, 14 1, pp. 3-13.
- SERVANT M., 1984 - Les basses terrasses fluviales du quaternaire récent des Andes boliviennes. *Datations par le <sup>14</sup>C, interprétation paléoclimatique. Ch. ORSTOM, sér. Géol. vol. XIV, n° 1*, pp. 15-28.
- SERVANT-VILDARY S., 1984 - Les Diatomées des lacs sursalés boliviens. Sous-classe Pennatophycidées. I - Famille des Nitzschiacées. *Cah. ORSTOM, sér. Géol., vol. XIV, n° 1*, pp. 35-53.
- SERVANT-VILDARY S. & BLANCO M., 1984 - Les diatomées fluvio-lacustres plio-pléistocènes de la Formation Charaña Cordillère occidentale des Andes, Bolivie. *Cah. ORSTOM, sér. Géol., vol. XIV, n° 1*, pp. 55-102.
- YBERT J.P., 1984 - Diagramme sporopollinique de la coupe holocène du Río Chuquiaguillo sur l'Altiplano bolivien. *Cah. ORSTOM, sér. Géol.*, 14 1, pp. 29-34.
- YBERT J.P. & MIRANDA Y., 1984 - Análisis palinológicos de un corte del Sajama. *II Congreso geológico de Bolivia*. pp.691-695.
- YBERT J.P. & MIRANDA Y., 1984 - Análisis palinológicos de un corte del Sajama. *Resultados preliminares. Convenio UMSA-ORSTOM: 5 p., 1 pl., multigr.*

## 1986

- ARGOLLO J. & GOUZE P., 1986 - Etapas mayores de las oscilaciones glaciares en la Cordillera Oriental de Bolivia en los últimos 20 000 años. Interpretaciones paleoclimáticas. 1<sup>er</sup> Symposium de la Recherche Française en Bolivie, La Paz sept. 1986, pp. 65-69.
- FORNARI M., HERAIL G., LAUBACHER G., ARGOLLO J., MIRANDA V., VISCARRA G., 1986 - Informe preliminar sobre los yacimientos de oro de la cuenca de Tipuani. ORSTOM en BOLIVIE, 21p
- GOUZE P., ARGOLLO J., SALIEGE J.J. & SERVANT M., 1986 - Interprétation paléoclimatique des oscillations des glaciers au cours des vingt dernières millénaires dans les régions tropicales ; exemple des Andes boliviennes. C.R. Acad. Sci. Paris, t. 303, sér. 2 3, pp. 219-224.
- HERAIL G., ARGOLLO J., FORNARI M., LAUBACHER G. & VISCARRA G., 1986 - El oro en Bolivia. El distrito de Tipuani; geología e historia parte I. Khrysos La Paz, 2, pp. 9-15.
- HERAIL G., RUIZ A., ARGOLLO J., FORNARI M. & LAUBACHER G., 1986 - El oro en Bolivia. El distrito de Tipuani: Geología e historia parte II. Khrysos La Paz, 3, pp. 7-14.
- HERAIL G., FORNARI M. & LAUBACHER G., 1986 - Evolución geomorfológica y gitológica de las cuencas y piedemontes auríferos de la Cordillera Oriental Sur del Perú, Norte de Bolivia. "Coloquio sobre la geología de los yacimientos de oro de Bolivia", La Paz Bolivia, 7, CEDOMIN, pp. 16-30.
- HERAIL G., FORNARI M. LAUBACHER G., ARGOLLO J., MIRANDA V. & VISCARRA G., 1986 - Geodinámica de las cuencas andinas y substancias minerales asociadas: los yacimientos aluviales de oro del norte de Bolivia. 1<sup>er</sup> Symposium de la Recherche Française en Bolivie, La Paz sept. 1986, pp. 58-62 + poster.
- LABROUSSE B. & SORIA E., 1986 - Primeros resultados en el análisis de la cuenca de las formaciones Tiwanaku y Coniri, Oligoceno? del Altiplano Norte de Bolivia. 8<sup>o</sup> Congr. Geol. Bolivia, Boletín 23, Soc. Geol. Bol. La Paz, p 47.
- LAVENU A., 1986 - Etude néotectonique de l'Altiplano et de la Cordillère Orientale des Andes boliviennes. Thèse Université Paris Sud, 434 p., multigr.
- OLIVERA ALMEIDA L. F. de, 1986 - Estudio sedimentológico de testigos del lago Titicaca. Implicaciones paleoclimáticas. Tesis UMSA, La Paz, 136 p., multigr.
- PIERRE J.F. & WIRRMANN D., 1986 - Diatomées et sédiments holocènes du lac Khara Kkota Bolivie. Géodynamique 1 2, pp. 135-145.
- RISACHER F. & ARMENDIA A., 1986 - Primeros sondeos en el salar de Uyuni. 1<sup>er</sup> Symposium de la Recherche Française en Bolivie, La Paz Sept. 1986, pp. 56-57.
- SEMPERE T., 1986 - Las cuencas sedimentarias bolivianas desde 450 M.A., sus deformaciones y su interés petrolero. 1<sup>er</sup> Symposium de la Recherche Française en Bolivie, La Paz sept. 1986, pp. 63-64.
- SEMPERE T., 1986 - Contribución a la estratigrafía del mesozoico boliviano en el dominio andino. Informe N° 1 ORSTOM, La Paz, 34 p., multigr.
- SEMPERE T., CHAVEZ H. & PEREZ M., 1986 - Estudio sedimentológico preliminar de la parte superior de la formación Mondragón en las cercanías de Leñas Dpto. de Potosí. Consecuencias geodinámicas. 8<sup>o</sup> Congr. Geol. Bol., Boletín 23, Soc. Geol. Bol., La Paz, pp. 45 p.

SERVANT-VILDARY S., 1986 - Les Diatomées actuelles des Andes de Bolivie  
Taxinomie, écologie. Cahiers de Micropaléontologie, vol. 1 3 et 4, pp. 99-124.

VISCARRA G., 1986 - Geodinámica y distribución del oro en una cuenca intramontana  
andina, parte central de la cuenca Cangallí, región de Tipuani. Mariapo. Tesis UMSA.  
Facultad de Ciencias Geológicas, 66 p., 7 pl., 5 mapas, multigr.

WIRRMANN D., 1986 - Medios lacustres y estudio del cuaternario reciente en Bolivia. 1<sup>er</sup>  
Symposium de la Recherche Française en Bolivie, La Paz sept. 1986, pp. 70-74.

## 1987

ARGOLLO J., GOUZE P., SALIEGE J.F. & SERVANT M., 1987 - Fluctuations des  
glaciers de Bolivie au Quaternaire récent. In : Séminaire "Paléolacs-Paléoclimats en  
Amérique latine et en Afrique 20 000 ans B.P.-Actuel", vol. 1, ORSTOM, Bondy, pp.  
15-17, et dans Géodynamique 2 2, pp. 103-104.

ARGOLLO J., FORNARI M., HERAIL G., MIRANDA V. & VISCARRA G., 1987 -  
Estratigrafía de los depósitos glaciares en la Cordillera de Apolobamba Bolivia y su  
asociación con mineralizaciones auríferas. 10<sup>o</sup> Congr. Geol. Argentina, Tucuman.  
Actas t. II, pp. 67-70.

ARGOLLO J., BUFFETAUT E., CAPPETA H., FORNARI M., HERAIL G., LAUBACHER  
G., SIGE B. & VISCARRA G., 1987 - Découverte de vertébrés aquatiques présumés  
paléocènes dans les Andes septentrionales de Bolivie Rio Suches, Synclitorium de  
Putina. Geobios n° 20 1, pp. 123-127, 3 fig.

CHAVEZ FLORES H.C., 1987 - Interpretación geodinámica de las formaciones  
sedimentarias y estructuras tectónicas de la zona de Challapata. Tesis de grado UMSA.  
163 p.+ anexo, multigr.

FORNARI M., HERAIL G., LAUBACHER G., ARGOLLO J. & VISCARRA G., 1987 -  
Yacimientos de oro aluvial y fuentes primarias en el norte de la Cordillera Oriental de  
los Andes bolivianos. Décimo Congr. Geol. Argentina, Tucumán. Actas, t. II, pp. 189-  
191.

FORNARI M., HERAIL G., VISCARRA G., LAUBACHER G. & ARGOLLO J., 1987 -  
Sédimentation et structure du bassin de Tipuani-Mapiri : un témoin de l'évolution du  
front amazonien des Andes du nord de Bolivie. C.R. Acad. Sci. Paris, t. 305, sér. 2, pp.  
1303-1309.

FORNARI M., HERAIL G., LAUBACHER G., ARGOLLO J. & VISCARRA G., 1987 -  
Yacimiento de oro aluvial y fuentes primarias en el Norte de la Cordillera Oriental de  
los Andes bolivianos. Décimo Congr. Geol. Argentino, San Miguel de Tucumán, Actas,  
t. II, pp. 189-191.

GOUZE P., 1987 - La Cordillère Orientale de Bolivie : Glaciations plio-pléistocènes; essai  
de paléohydrologie 30 000 ans B.P.-actuel d'après les oscillations des glaciers et la  
composition isotopique des macrorestes végétaux. Thèse Université Paris-Sud N° 4103,  
177 p., 43 fig. multigr.

HERAIL G., FORNARI M., VISCARRA G., LAUBACHER G. & ARGOLLO J., 1987 -  
Geodinámica de una cuenca intramontana del frente andino: la cuenca de Tipuani-  
Mapiri. X Congr. Geol. Argentino, Tucumán. Actas t. II, pp. 93-96.

LABROUSSE B. & SORIA E., 1987 - Nouveaux résultats sur la formation Coniri entre les  
villages de Viacha, Corocoro et Tiwanaku Altiplano Nord de la Bolivie. Séminaire  
"Géodynamique des Andes Centrales", ORSTOM-Bondy, janvier 87, pp. 61-63.

LAUBACHER G., 1987 - Géodynamique des Andes Centrales. Séminaire  
"Géodynamique des Andes Centrales", ORSTOM-Bondy, janvier 1987, 22: 4 p.

- LAVENU A., 1987 - Etude tectonique et néotectonique de l'Altiplano et de la Cordillère Orientale des Andes boliviennes. Séminaire "Géodynamique des Andes Centrales", ORSTOM-Bondy, janvier 1987, 86 p.
- MAROCCO, R., SEMPERE Th., CIRBIAN M. & OLLER J., 1987 - Mise en évidence d'une déformation paléocène en Bolivie du Sud. Sa place dans l'évolution géodynamique des Andes centrales. Comptes rendus à l'Académie des Sciences de Paris, série II, 304, pp. 1139-1143.
- MOURGUIART Ph., 1987 - Les Ostracodes actuels de l'Altiplano bolivien. Modèle de répartition. In : Séminaire "Paléolacs-Paléoclimats en Amérique latine et en Afrique" 20 000 ans B.P.-Actuel", vol. 1, ORSTOM, Bondy: 9-14, multigr. et Géodynamique 2 2, pp. 101-103.
- MOURGUIART Ph., 1987 - Les Ostracodes lacustres de l'Altiplano bolivien. Le polymorphisme, son intérêt dans les reconstitutions paléohydrologiques et paléoclimatiques de l'Holocène. Thèse No 2191, Univ. Bordeaux, 294 p., 29 pl., multigr.
- OSTRIA C., 1987 - Phytoécologie et Paléoécologie de la vallée alto-andienne de Hichu-Khota Cordillère Orientale, Bolivie. Thèse Université M. Curie, Paris : 180 p., 45 fig., multigr.
- PIERRE J.F., 1987 - Inventaire des Diatomées de la carotte JK1 et implications paléoclimatologiques à Hichu Khota. Géodynamique 2 2, pp. 112-113.
- ROUX M., SERVANT-VILDARY S. & MELLO E SOUSA S., 1987 - Diatomées et milieux aquatiques de Bolivie. Application des méthodes statistiques à l'évaluation des paléotempératures et des paléosalinités. In: Séminaire "Paléolacs-Paléoclimats en Amérique latine et en Afrique 20 000 ans B.P.-Actuel", vol. 1, ORSTOM, Bondy, Géodynamique 2 2, pp. 116-119.
- SEMPERE T., 1987 - Caracteres geodinámicos generales del Paleozoico superior de Bolivia. Doc. mission ORSTOM, La Paz, 11 p., 1 fig., multigr.
- SEMPERE T., OLLER J., CHERRONI C., ARANIBAR O., BARRIOS L., BRANSA L., CIRBIAN M. & PEREZ M., 1987 - Un ejemplo de cuenca carbonatada en un contexto distensivo de retroarco: Paleogeodinámica del Cretácico Terminal en la República de Bolivia Formación El Molino y equivalentes. 2<sup>do</sup> Simp. PICG No 242, Tucumán, Argentina: 40 p., multigr.
- SERVANT M., ARGOLLO J. & FOURNIER M., 1987 - Dépôts fluviaux en Bolivie. Variations du régime des écoulements au cours du Quaternaire récent. Géodynamique 2 2, pp. 105-109.
- WIRRMANN D. & OLIVEIRA ALMEIDA L.F. de, 1987 - Late Pleistocene and Holocene lacustrine oscillations in the bolivian Altiplano. Proyecto IGCP 201 "Cuaternario de América del Sur"; reunión final Ushuaia, Argentina, 2-6 Diciembre 1987; CADIC, contrib. N° 4, 1 p., multigr.
- WIRRMANN D. & OLIVERA ALMEIDA L.F. de, 1987- Low Holocene level 7700 to 3650 year ago of lake Titikaka Bolivia. Palaeogeogr., Paleoclimatol., Palaeoecol., 59 4, pp. 315-323.
- WIRRMANN D. & MOURGUIART P., 1987 - Oscillations et paléosalinités des lacs du Quaternaire récent en Bolivie. In : Séminaire "Paléolacs-Paléoclimats en Amérique Latine et en Afrique 20 000 ans B.P.-Actuel", vol. 1, ORSTOM, Bondy: 3-8, multigr. et Géodynamique 2 2, pp. 98-101.



YBERT J.P., 1987 - Apports de la palynologie à la connaissance de l'histoire du lac Titicaca Bolivie au cours du Quaternaire récent. 10<sup>ème</sup> Symposium APLF "Palynologie, Ecologie, Paléocologie" Talence, pp. 122-123, 3 fig.

YBERT J.P., 1987 - Spectres palynologiques de tourbières et de sédiments lacustres de la fin du Pléistocène et de l'Holocène des Andes de Bolivie. *In*: Séminaire "Paléolacs-Paléoclimats en Amérique Latine et en Afrique 20 000 ans B.P.-Actuel", vol. 1, ORSTOM, Bondy: 31-34, multigr. et Géodynamique 2 2, pp. 108-109.

## 1988

HERAIL G., 1988 - Morphological evolution of supergenetic gold particles: Geological significance and interest for mining exploration. 5<sup>o</sup> Congr. Geol. chileno - Santiago, 1, pp. 165-180.

HERAIL G., FORNARI M., MIRANDA V. & VISCARRA G., 1988 - Découverte de nouvelles minéralisations primaires d'or dans la Cordillère Royale de Bolivie à partir de l'analyse morphoscopique de paillettes d'or prélevées en alluvion. C.R. Acad. Sci. Paris, t. 307, Série 2, pp. 63-69.

HERAIL G., FORNARI M., VISCARRA G. & MIRANDA V., 1988 - Evolución de las partículas de oro en el transcurso de la formación de un placer fluvial: el caso de los placeres de Tipuani Andes, Bolivia. Anales VII Congreso Lat. Am. Geol. Belem. Para, 1, pp. 127-138.

HERAIL G., MIRANDA V. & FORNARI M., 1988 - Los placeres de oro de la región de Mapiri y sus fuentes primarias. Informe N° 16, ORSTOM La Paz, 30 p., multigr.

HERAIL G. & VISCARRA G., 1988 - El "Cauce Antiguo" del río Tipuani: análisis sedimentológico y tectónico e implicaciones para la prospección minera. Informe N° 12, ORSTOM La Paz, 14 p + 2 mapas fuera de texto, multigr.

HERAIL G., FORNARI M., LAUBACHER G. & VISCARRA G., 1988 - Geodinámica y distribución del oro en la cuenca de Tipuani-Mapiri Bolivia. Bol. Soc., Geol. del Perú, V. 78, pp. 55-64.

HERAIL G., 1988 - Los yacimientos de oro de Bolivia: contexto geológico y genético. *In*: Actas del Segundo Simposio de la investigación francesa en Bolivia, pp. 10-16.

MIRANDA ANGLES V., 1988 - Geodinámica y distribución del oro en una cuenca intramontana andina: la cuenca "Cangalli" en la región de Mapiri. Tesis de grado UMSA, 98 p., multigr.

RISACHER F., 1988 - Ultimos datos sobre el Salar de Uyuni. Recursos económicos y origen de las concentraciones. *In*: Actas del Segundo Simposio de la Investigación Francesa en Bolivia. La Paz, abril 1988, pp. 19-26.

SAAVEDRA BOZO E., 1988 - Estudio palinológico de una turbera del valle de Hichu Khota. Interpretación de las variaciones climáticas en el Holoceno superior. Tesis de grado UMSA, 35 p., 25 pl., multigr.

SEBRIER M., LAVENU A. & FORNARI M., 1988 - Tectonics and uplift in the Andes of South Peru and North Bolivia from Oligocene to Present. Géodynamique, Vol. 3, 1-2, pp. 85-106.

SEMPERE T., HERAIL G. & OLLER J., 1988 - Los aspectos estructurales y sedimentarios del oroclino boliviano. V Congreso Geológico Chileno, T. I, pp. A127-A142.

SEMPERE T., 1988 - Desciframiento del registro sedimentario de los 500 millones de años en Bolivia: Modelización de la formación de los Andes y del entrapamiento de los hidrocarburos. In: Actas del Segundo Simposio sobre la Investigación Francesa en Bolivia, pp. 17-18.

YBERT J.-P., 1988 - Apports de la palynologie à la connaissance de l'histoire du lac Titicaca Bolivie-Pérou au cours du Quaternaire récent. Actes X<sup>e</sup> Symposium APLF Bordeaux. Inst. fr. Pondichéry, trav. sec. sci. tech., t. XXV, pp. 139-150.

## 1989

BABY P., HERAIL G., LOPEZ J.M., LOPEZ O., OLLER J., PAREJA J., SEMPERE Th. & TUFÍÑO D., 1989 - Structure de la Zone Subandine de Bolivie : influence de la géométrie des séries sédimentaires antéorogéniques sur la propagation des chevauchements. C.R. Acad. Sci. Paris, v. 309, pp. 1717-1722.

FORNARI M., HERAIL G., POZZO L., & VISCARRA G., 1989 - Los yacimientos de oro de los Lipez. Estratigrafía y dinámica de emplazamiento de las volcánitas del área de Guadalupe. Ortom en Bolivia, informe N° 19. 26p. + anexos

GUYOT J.L. & HERAIL G., 1989 - Placer mining operations and modification of the physical chemical nature on the waters of the rio Kaka drainage basin Andes, Bolivia. Third Scientific Assembly. IAHS. Publication N° 184, pp. 115-121.

HERAIL G., FORNARI M., VISCARRA G., LAUBACHER G., ARGOLLO J. & MIRANDA V., 1989 - Geodynamic and gold distribution in the Tipuani-Mapiri basin Bolivia. In: International Symposium on Intramontane basins : Geology and resources. Chang Mai Thaïlande, pp. 342-352.

LAVENU A., BONHOMME, M.G., VATIN-PERIGNON N., & De Pachtere P. 1989 - Neogene magmatism in the Bolivian Andes between 16° and 18°S. Stratigraphy and K-Ar geochronology. J. South Amer. Earth Sci., 2, 1, pp.35-47.

RISACHER F., 1989 - Estudio economico del salar de Uyuni. Informe 17, mission ORSTOM en Bolivie, La Paz, 67p.

SEMPERE T., HERAIL G. & BABY P., 1989 - Geological Structure and Tectonic History of Bolivian Orocline. 28th International Geological Congress, Abstracts, Vol. 3 of 3, Washington, D.C., 9-11 july, 1989. pp. 71-73.

## 1990

BABY P., HERAIL G., SEMPERE T. & SALINAS R., 1990. Modèle d'évolution cinématique de prismes intercutanés : la Zone Subandine du sud de la Bolivie, 13ème R.S.T., Grenoble, abstract, p. 8.

BABY P., HERAIL G., SALINAS R. & SEMPERE T., 1990 - Structural geometry and kinematic evolution of a foreland thrust system in the central Andes: the subandean zone of southern Bolivia, Final workshop: Structure and evolution of the central Andes in Northern Chile, Southern Bolivia and Northwestern Argentina, Berlin West, abstract, p. 48.

BABY P., SEMPERE T., OLLER J., BLANCO J., ZUBIETA D. & HERAIL G., 1990 - Evidence for major shortening on the eastern edge of the bolivian Altiplano: the Calazaya nappe, abstract, in *Symp Int. "Géodynamique Andine"*, ORSTOM, Colloques et Séminaires, Paris, pp. 163-165.

BABY P., SEMPERE Th., OLLER J., BARRIOS L., HERAIL G., & MAROCCO R., 1990 - Un bassin en compression d'âge oligo-miocène dans le sud de l'Altiplano bolivien. C.R. Acad. Sci. Paris, t. 311, Série II, p. 341-347.

- FORNARI M., 1990 - Yacimientos de oro emplazados en el Ordovícico de las Cordilleras de Apolobamba y Real: vetas de cuarzo asociadas a sulfuros macivos. *Revista de Geociencias UMSA*, La Paz, vol. 4, n° 1, pp. 49-68.
- FRANCOU B., 1990 - Stratification mechanisms in slope deposits in high subequatorial mountains. *Permafrost and Periglacial Processes*, Vol. 1, pp. 249-263.
- HERAIL G., FORNARI M., VISCARRA M. & MIRANDA M., 1990 - Morphological and chemical evolution of gold grains during the formation of a polygenic fluvial placer: The Mio-pleistocene Tipuani placer example Andes, Bolivia. *Chronique de la Recherche minière N° 500*, pp. 41-49.
- HERAIL G., FORNARI M., VISCARRA G., BABAY P. & SEMPERE T., 1990 - Rôle de la tectonique de chevauchement dans la formation de "placers géants d'or" : le cas des Andes du NE de la Bolivie, 13ème R.S.T., Grenoble, poster abstract, p. 67.
- HERAIL G., BABAY P., LOPEZ M., OLLER J., LOPEZ O., SALINAS R., SEMPERE T., BACCAR G. & TOLEDO H., 1990 - Structure and kinematic evolution of the Subandean thrust system of Bolivia abstract, In: *Symp. Int. "Géodynamique Andine"* 1990, ORSTOM, Colloques et Séminaires, Paris, pp. 179-182.
- MARTINEZ C., VARGAS E. & LAUBACHER G., 1990 - Evolution tectono-sédimentaire dans le Crétacé du synclinal d'Otavi-San Lucas Bolivie centre-sud. In : *Symp. int. "Géodynamique andine"*, ediciones del ORSTOM, Grenoble, Francia, pp. 241-244.
- MOURGUIART Ph. & 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'ostracodés. *Géodynamique* 5 2, pp. 151-165.
- SEMPERE T., HERAIL G., OLLER J. & BONHOMME H., 1990 - Late Oligocene-Early Miocene major tectonic crisis and related basins in Bolivia. *Geology*, vol. 18, No 10, pp. 946-949.
- SEMPERE T., HERAIL G., OLLER J., BABAY P., BARRIOS L. & MOROCCO R., 1990 - The Altiplano: a province of intermontane foreland basins related to crustal shortening in the bolivian oroclinal area abstract, in *Symp. Int. "Géodynamique Andine"* 1990, ORSTOM, Colloques et Séminaires, Paris, pp. 167-170.
- SEMPERE Th., 1990 - Cuadros estratigráficos de Bolivia. Propuestas nuevas. Informe N° 20, ORSTOM La Paz, 26 p., multigr.
- SERVANT-VILDARY S & ROUX M. 1990 - Multivariate analysis of distoms and water chemistry in Bolivian saline lakes. *Hydrología* - 197, pp. 267-290.
- SERVANT-VILDARY S & ROUX M, 1990 - Variations de température estimées à partir du déplacement en altitude des associations de diatomées dans une séquence holocène de la Cordillère Orientale de Bolivie. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 311, série II, pp. 429-436.

## 1991

- DELAUNE M., FORNARI M., HERAIL G., VISCARRA G. & MIRANDA V., 1991 - Heavy mineral suites in the gold placers from the Real Cordillera and the Tipuani-Mapiri basin. *International Symposium on Alluvial Gold Placers*, La Paz, Abstracts volume, pp. 35-37.
- DUMONT J.F., HERAIL G. & GUYOT J.L., 1991 - Subsistencia, inestabilidad fluvial y repartición de los placeres distales de oro. El caso del Río Beni Bolivia. In: *Actas del Simposio Internacional sobre yacimientos aluviales de oro*, La Paz, pp. 43-46.

- FORNARI M., HERAIL G. & RAMOS C.W., 1991 - El placer de Vilader, modelo genético. *In*: Simposio Internacional sobre yacimientos aluviales de oro, La Paz, Abstract volume, pp. 57-59.
- FORNARI M., HERAIL G. & RAMOS C.W., 1991 - Le placer de Vilader, modèle génétique. *In* :: Actas del Simposio Internacional sobre yacimientos aluviales de oro, La Paz, Proceedings, G. Hérail & M. Fornari, eds., ORSTOM, Série "Colloques et Séminaires", pp. 159-173.
- FORNARI M. & HERAIL G., 1991- Lower Paleozoic gold occurrences in the "Eastern Cordillera" of Southern Peru and Northern Bolivia: A genetic model. Proceeding of the Symposium Brazil Gold'91, Belo Horizonte/MG/13-17 may. pp. 135-142.
- FORNARI M., HERAIL G., POZZO L. & VISCARRA G., 1991 - Los yacimientos de oro de los Lipez Bolivia. Tomo I: Estratigrafía y dinámica de emplazamiento de las volcanitas del área de Guadalupe. Informe N° 19, ORSTOM La Paz, 28 p.
- HERAIL G. & FORNARI M. Eds. 1991. Gisement alluviaux d'or. Alluvial gold placers. Yacimientos aluviales de oro. Actes du Symposium international sur les gisements alluviaux d'or. La Paz, Bolivie, 3-5 juin 1991, 402 p.
- HERAIL G., 1991 - Evolution of the morphology and composition of gold grains from primary sources to supergene environment: general characteristics and applications to the knowledge of Bolivian placers. International Symposium on Alluvial Gold Placers, La Paz, Abstracts volume, pp. 71-73.
- HERAIL G. & FORNARI M., 1991 - Cambios en la composición química de las partículas de oro en la cuenca de Tipuani-Mapiri. *In*: Simposio sobre yacimientos aluviales de oro, Abstract volume, La Paz, pp. 75-76.
- HERAIL G., FORNARI M., VISCARRA G., RUIZ J.A., POZZO L. & DUMONT J.F., 1991 - Les placers d'or de Bolivie : milieux de formation et structure géologique. *In*: Actas del Simposio Internacional sobre yacimientos aluviales de oro, La Paz, G. Hérail & M. Fornari, eds., ORSTOM, Série "Colloques et Séminaires", pp. 115-143.
- LAVENU A. & MERCIER J.L., 1991 - Evolution du régime tectonique de l'Altiplano et de Cordillère orientale des Andes de Bolivie du Miocène supérieur à l'Actuel. Un effet des forces de gravité et des forces aux limites. Géodynamiques 6 1, pp. 21-55.
- MIRANDA V., HERAIL G. & FORNARI M., 1991 - Los placeres de oro de la región de Mapiri Bolivia y sus fuentes primarias. *In*: Simposio Internacinal sobre yacimientos aluviales de oro, Abstract volume, La Paz, pp. 125-127.
- RISACHER F. & FRITZ B., 1991 - Quaternary geochemical evolution of the salars of Uyuni and Coipasa, Central Altiplano, Bolivia. Chemical Geology, 90, pp. 211-231.
- RISACHER F. & FRITZ B., 1991 - Geochemistry of bolivian salars, Lipez, southern Altiplano: otigin of solutes and brine evolution. Geochimica et Cosmoch. Acta, Vol. 55, pp 687-705.
- SEMPERE Th., HERAIL G., BABY P., MOROCCO R., OLLER J. & BARRIOS L., 1991 - El Altiplano boliviano. Una provincia de cuencas intramontanas de antepaís relacionadas con el acortamiento cortical en la región del oroclino boliviano. Revista Técnica YPF, 122, pp. 225-227.
- SEMPERE Th., BABY P., OLLER J. & HERAIL G., 1991 - La nappe de Calazaya : une preuve de raccourcissements majeurs gouvernés par des éléments paléostrucutaux dans les Andes boliviennes. C.R. Acad. Sci. Paris, t. 312, Série II, pp. 77-83.
- SEMPERE T., 1991 - Evolución de la cuenca centro-andina 10° - 26° S del Cámbrico superior al Silúrico inferior. Revista Técnica de YPF, 12 2, pp. 221-223.

VISCARRA G., HERAIL G., THOMPSON C. & ORTUÑO F., 1991 - Prospección geofísica en el cauce antiguo del río Mapiri entre la Rinconada y Cangallí Tipuani-Bolivia. In: Simposio Internacional sobre yacimientos aluviales de oro, La Paz, Abstract volume, pp. 169-170.

## 1992

BABY P., SEMPERE Th., OLLER J. & HERAIL G., 1992 - Evidence for major shortening on the eastern edge of the Bolivian Altiplano: the Calazaya nappe. In: Tectonophysics 205. Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam, pp. 155-169.

BAILLY L., LEROY J., FORNARI M. & HERAIL G., 1992 - El distrito minero de los Lípez: Estudio de las alteraciones ligadas a las mineralizaciones hidrotermales Pb, Zn, Ag, Bi del Cerro Bonete. X Congreso Geológico Boliviano, La Paz, 26-30 de octubre 1992. Boletín N° 27, La Paz, pp. 28-35.

CARLIER G., SOLER P., FORNARI M. & HERAIL G., 1992 - Origen y significado tectónico del volcanismo shoshónico neógeno a cuaternario en los Andes. X Congreso Geológico Boliviano, La Paz, 26-30 de octubre 1992. Boletín N° 27, La Paz, pp. 173-174.

COUDRAIN-RIBSTEIN A., HERAIL G., BERGERON M. & MARTINEZ J., 1992 - Análisis multielemental del agua: Una herramienta para explotación de oro. Revista Boliviana de Química, 47 p.

COUDRAIN-RIBSTEIN A., HERAIL G., MARTINEZ J., BERGERON M., VISCARRA G., RUIZ J.A. & THOMPSON C.J., 1992 - Estudio de la presencia de oro en las aguas de yacimientos de oro aluvial de Bolivia Tipuani y Suches. X Congr. Geológ. Boliv., La Paz 26-30 oct., pp. 217-220.

GAYET M., SEMPERE T. & CAPPETTA H., 1992 - A propos de l'environnement marin restreint du bassin centro-andin a Maastrichtien. C. R. Acad. Sci. Paris, t. 314, Série II, pp. 223-228.

HERAIL G., BABY P., DORBATH C., SEMPERE T., SOLER P., HERQUEL G., WITTLINGER G., OLLER J. & POUPINET G., 1992 - La estructura de los Andes del Noroeste de Bolivia. Acortamiento Cortical y Desarrollo de la Deformación, Primera Conferencia Internacional Cuencas Fanerozoicas del Gondwana, Santa Cruz Bolivia, abstracto, p. 17.

HERAIL G., OLLER J., BABY P., SEMPERE T., BLANCO J., BONHOMME M. & SOLER P., 1992 - Las cuencas de Tupiza, Nazareno, Estarca: sucesión de tectónica de transcurrencia y de cabalgamiento en la estructuración de los Andes de Bolivia. X Congreso Geológico Boliviano, La Paz, 26-30 de octubre. Boletín N° 27, pp. 81-83.

LAVENU A., 1992 - Formación geológica y evolución. In: "El Lago Titicaca". C. Dejoux y A. Iltis eds., ORSTOM e HISBOL, La Paz, pp. 19-27.

MARTIN L., ABSY M.L., FLEXOR J.M., FOURNIER M., MOURGUIART Ph., SIFEDDINE A. & TURQ B., 1992 - Enregistrements de conditions de type El Niño, en Amérique du Sud, au cours des 7 000 dernières années. C.R. Acad. Sci. Paris, t. 315, série II, pp. 97-102.

MOURGUIART Ph., WIRRMANN D., FOURNIER M. & SERVANT M., 1992 - Reconstruction quantitative des niveaux du petit lac Titicaca au cours de l'Holocène. C.R. Acad. Sci. Paris, t. 315, série II, pp. 875-880.

MOURGUIART Ph., 1992 - Los ostrácodos. In: "El Lago Titicaca". C. Dejoux y A. Iltis eds., ORSTOM e HISBOL, La Paz, pp. 345-352.

- MOURGUIART Ph. & ARGOLLO J., 1992 - Historias separadas de los lagos Huiñaimarca y Chucuito durante el Holoceno. X Congreso Geológico Boliviano, La Paz, 26-30 de octubre. Boletín N° 27, pp. 107-110.
- RAMIREZ V., 1992 - Geología, distribución y características del oro aluvial en el río Kaka entre Copacabana y Chamaleo. Su comparación con yacimientos aluviales de la Cordillera Oriental. Tesis de Grado, UMSA, La Paz, 75 p. + anexos, multigr.
- RAMIREZ V., VISCARRA G. & HERAIL G., 1992 - El oro de los placeres auríferos en la salida del piedemonte andino: El Río Kaka desde Teoponte hasta Chamaleo. X Congreso Geológico Boliviano, La Paz, 26-30 de octubre. Boletín N° 27, pp. 125-126.
- RAMIREZ V., THOMPSON C. & VISCARRA G., 1992 - Fauna vertebrada ordovícica en la parte Norte de la cordillera Oriental de Bolivia. X Congreso Geológico Boliviano, La Paz, 26-30 de octubre 1992. Boletín N° 27, pp. 127-128.
- RAMOS W., 1992 - El placer de Vilader. Un yacimiento aluvial de oro de la cuenca alta del río López. Tesis de grado, UMSA, La Paz. 151 p. + anexos, multigr.
- RAMOS W. & FORNARI M., 1992 - El oro detrítico y su relación con las fuentes primarias en la región de Vilader. X Congreso Geológico Boliviano, La Paz, 26-30 de octubre. Boletín N° 27, pp. 129-132.
- RODRIGO, L. & WIRRMANN D., 1992 - Aspecto general de la sedimentación actual. *In*: "El Lago Titicaca". C. Dejoux y A. Iltis eds., ORSTOM e HISBOL, La Paz, pp. 39-45.
- RISACHER F. & FRITZ B., 1992 - Mise en évidence d'une phase climatique holocene extrêmement aride dans l'Altiplano central, par la présence de polyhalite dans le salar de Uyuni (Bolivie). C. R. Acad. Sci. Paris t.314, sérieII, pp1371-1377.
- RISACHER F. 1992 - Géochimie des lacs salés et croûtes de sels de l'Altiplano bolivien. Bull. Sciences Géologiques, T.45, 3-4, Strasbourg. 213p.
- RISACHER F. 1992 - Les salars de l'Altiplano de Bolivie. La vie des sciences Comptes rendus, série générale, tome 9, 1, pp.39-62.
- ROPERCH P., FORNARI M. & HERAIL G., 1992 - Estudio paleomagnético del Altiplano boliviano. X Congreso Geológico Boliviano, La Paz, 26-30 de octubre 1992. Boletín N° 27, pp. 137-141.
- RUIZ J.A. & HERAIL G., 1992 - Geología y distribución de oro detrítico en el placer glaciogénico de Suches-Antaquilla. X Congreso Geológico Boliviano, La Paz, 26-30 de octubre. Boletín N° 27, pp. 141-144.
- SEMPERE Th., 1992 - Evolución de la Cuenca Centro-Andina 10-26 S del Cámbrico Superior al Silúrico Inferior. ORSTOM, La Paz, pp. 221-223.
- SEMPERE T., 1992 - El cretácico de Bolivia: Un registro sedimentario distal de la evolución tectónica temprana de los Andes centrales. X Congreso Geológico Boliviano, La Paz, 26-30 de octubre 1992. Boletín N° 27, pp. 148-151.
- SEMPERE T., 1992 - Algunas aclaraciones necesarias en cuanto a las llamadas "Fases" tectónicas cenozoicas en Bolivia. X Congreso Geológico Boliviano, La Paz, 26-30 de octubre. Boletín N° 27, pp. 152-162.
- SEMPERE T. & SOLER P., 1992 - Estratigrafía y geoquímica de las rocas volcánicas básicas mesozoicas de los Andes boliviano. Implicaciones paleotectónicas. X Congreso Geológico Boliviano, La Paz, 26-30 de octubre 1992. Boletín N° 27, pp. 163-167.

- SEMPERE T., AGUILERA E., DOUBINGER J., JANVIER P., LOBO J., OLLER J. & WENZ S., 1992 - La Formation Vitiacua Permien moyen à supérieur Trias ? inférieur. Bolivie du Sud : stratigraphie, palynologie et paléontologie. N. jb. Geol. Paläont. Abh., 185, 2, pp. 239-253.
- SERVANT-VILDARY S., 1992 - Las diatomeas. *In*: "El Lago Titicaca". C. Dejoux y A. Ittis eds., ORSTOM e HISBOL, La Paz, pp. 181-191
- SOLER P., HERAIL G., LIZECA J.L. & BONHOMME M., 1992 - Tectónica, magmatismo y erosión al contacto entre el Altiplano y la cordillera oriental al Norte de Oruro. Implicaciones sobre la orogénesis andina en Bolivia. X Congreso Geológico Boliviano, La Paz, 26-30 de octubre 1992. Boletín N° 27, pp. 168-172.
- VARGAS C., E., 1992 - La fotografía aérea y su aplicación a estudios geológicos y geomorfológicos. Principios de percepción remota, Tomo I y II, UMSA-ORSTOM, La Paz, 436 p.
- WIRRMANN D., 1992 - Morfología y batimetría. *In*: "El Lago Titicaca". C. Déjoux y A. Ittis eds., ORSTOM e HISBOL, La Paz, pp. 31-37.
- WIRRMANN D., YBERT J.P. & MOURGUIART Ph., 1992 - Una evaluación paleohidrológica de 20.000 años. *In*: "El Lago Titicaca". C. Dejoux y A. Ittis eds., ORSTOM e HISBOL, La Paz, pp. 61-67.
- YBERT J.P., 1992 - Los paisajes lacustres antiguos según el análisis palinológico. *In*: "El Lago Titicaca". C. Dejoux y A. Ittis eds., ORSTOM e HISBOL, La Paz, pp. 69-79.

### 1993

- AITCHESON S.J., HARMON R.S., MOORBATH S., SCHNEIDER A., SOLER P., SORIA-ESCALANTE E., STEELE G., SWAINBANK I. & WÖRNER G., 1993 - Pb-isotopics reveal basement domains of the Altiplano, Central Andes. *In*: Second Symposium International, Géodynamique Andine, ISAG, Oxford, 21-23 septembre, Extended abstracts, ORSTOM, collection colloques et séminaires, pp. 3-6.
- BAILY L., LEROY J. & FORNARI M., 1993 - Volcanism and polymetallic ore deposits from Southern Bolivia. The Cerro Bonete mineralizations. *In*: Second Symposium International, Géodynamique Andine, ISAG, Oxford, 21-23 septembre, Extended abstract, ORSTOM, collection colloques et séminaires, pp. 469-472.
- COUDRAIN-RIBSTEIN A., HERAIL G., BERGERON M., MARTINEZ J., VISCARRA G., RUIZ J.A. & THOMPSON C.J., 1993 - Análisis multi-elemental de agua: una herramienta para exploración de oro. Ejemplo de yacimientos de Bolivia. IV Congr. Boliviano de Química, La Paz, 14-16 abr. p. 33.
- DORBATH C., GRANET M., POUPINET G. & MARTINEZ C., 1993 - A seismic study of the Altiplano and the Eastern Cordillera in: Northern Bolivia. New constraints on a lithospheric model. *In*: Second Symposium International, Géodynamique Andine, ISAG, Oxford, , Extended abstract, ORSTOM, collection colloques et séminaires, pp. 3-6
- FORNARI M. & HERAIL G., 1993 - Sources of the detrital gold mineralizations in the Bolivian Altiplano. Second Biennial SGA Meeting, Society for Geology applied to mineral deposits. Granada, España, 9-11 septiembre 1993, 4 p.
- FORNARI M., POZZO L. SOLER P., BAILLY L., LEROY J. & BONHOMME M., 1993 - Miocene volcanic centers in the Southern Altiplano of Bolivia. The cerro Morokho and Cerro Bonete Area Sur Lipez. *In*: Second Symposium International, Géodynamique Andine, ISAG, Oxford, , Extended abstract, ORSTOM, collection colloques et séminaires, pp. 363-366.

- HERAIL M., FORNARI M. & POZZO L., 1993 - Emission d'or particulaire au cours des phases de volcanisme explosif du Miocène du Sud de l'Altiplano de Bolivie. C.R. Acad. Sci. Paris, t. 316, Série II, pp. 1431-1438.
- HERAIL G., OLLER J., BABY P., BLANCO J., BONHOMME M.G. & SOLER P., 1993 - The Tupiza, Nazareno and Estarca basins Bolivia: strike-slip faulting and thrusting during the Cenozoic evolution of the southern branch of the Bolivian Orocline. *In*: Second Symposium International, Géodynamique Andine, ISAG, Oxford, Extended abstract, ORSTOM, collection colloques et séminaires, pp. 191-194.
- HERAIL G., SOLER P., BONHOMME M. & LIZECA J.L., 1993 - Evolution géodynamique de la transition entre l'Altiplano et la Cordillère Orientale au Nord d'Oruro Bolivie. Implications sur le déroulement de l'orogénèse andine. C. R. Acad. Sci. Paris, t. 317, Série II, pp. 515-522.
- MARTIN L., FOURNIER M., MOURGUIART Ph., SIFEDDINE A. & TURCQ B., 1993 - Southern oscillation signal in south american paleoclimatic data of the last 7 000 years. *Quaternary Research*, 39, pp. 338-346.
- ROPERCH P., FORNARI M. & HERAIL G., 1993 - A Peleoamagnetic study of the Altiplano. *In*: Second Symposium International, Géodynamique Andine, ISAG, Oxford, Extended abstract, ORSTOM, collection colloques et séminaires, pp. 241-244.
- SOLER P. & SEMPERE T., 1993 - Stratigraphie, géochimie et signification paléotectonique des roches volcaniques basiques mésozoïques des Andes. C.R. Acad. Sci., t. 315, série II Paris, pp. 777-784.
- SOLER P., CARLIER G., BONHOMME M. & FORNARI M., 1993 - Field observations and K-Ar dating of the cerro Chiar Kkollu Southern Altiplano, Bolivia. *In*: Second Symposium International, Géodynamique Andine, ISAG, Oxford, Extended abstract, ORSTOM, collection colloques et séminaires, pp. 443-446.
- SOLER P. & JIMENEZ C., 1993 - Magmatic constraints upon the evolution of the Bolivian Andes since Late Oligocene times. *In*: Second Symposium International, Géodynamique Andine, ISAG, Oxford, Extended abstract, ORSTOM, collection colloques et séminaires, pp. 447-452.
- 1994**
- ALARCON H. & FORNARI M., 1994 - Análisis de oro por microsonda E.P.M.A. en depósitos primarios de oro de la provincia metalogenética andina de Bolivia y su significado genético. *Memorias del XI Congreso Geológico de Bolivia*, pp. 304-312.
- ARGOLLO J., 1994 - Geología del Plió-Cuaternario en Bolivia. UMSA-ORSTOM, La Paz, 285 p., multigr.
- ARGOLLO J., MOURGUIART Ph., PINGLOT J-F, POURCHET M., PREISS N. & WIRRMANN D., 1994 - Sedimentación reciente en el lago Titicaca Bolivia. 7° Congreso geológico chileno. Universidad de Concepción, Departamento de Concepción, Departamento de Ciencias de la Tierra, Concepción-Chile, 17 al 21 de octubre, Vol. 1, pp. 225-229.
- BAILLY L., 1994 - Le secteur minéralisé du Cerro Bonete (sud ouest Bolivie): Etude du magmatisme, des minéralisations et de altérations associées. Essai de localisation des métaux. These Dr de l'Univercite de Nancy 1. 301p.
- BALDELLON E., FORNARI M., ESPINOSA R. F. & SOLER P., 1994 - Sucesión estructural de la zona serranía de las minas. *Memorias del XI Congreso Geológico de Bolivia*. pp. 238-247.



- DUMONT J.F., 1994 - Neotectonic of subsiding basins. Case studies from Marañón and Beni basins, Peru and Bolivia. *Memorias del XI Congreso Geológico de Bolivia*. pp. 226-230.
- ESPINOSA R. F., SOLER P., BALDELLON P. E. & FORNARI M., 1994 - Observaciones de campo, análisis petrográfico y geoquímico de las lavas Tambillo. *Memorias del XI Congreso Geológico de Bolivia*. pp. 248-259.
- HERAIL G., SHARP W., VISCARRA G. & FORNARI M., 1994 - La edad de la Formación Cangallí: Nuevos datos geocronológicos y su significado geológico. *Memorias del XI Congreso Geológico de Bolivia*. pp. 361-365.
- MONRROY I., GORINOVA E., ALARCON H., FORNARI M. & SOLER P., 1994 - Geología y petrografía de la zona de esquentaque-La Joya. *Memorias del XI Congreso Geológico de Bolivia*. pp. 330-339.
- MOURGUIART Ph. & CARBONEL P., 1994 - A quantitative method of palaeolake-level reconstruction using ostracod assemblages: an example from the Bolivian Altiplano. *Hydrobiologia* 288, pp 183-193.
- POURCHET M., MOURGUIART Ph., PINGLOT J.F., PREISS N., ARGOLLO J. & WIRRMANN D., 1994 - Sédimentation récente dans le lac Titicaca Bolivie. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 319, série II, pp. 535-541.
- RAMOS W. & FORNARI M., 1994 - Problemática de la presencia de oro en los Lípez. *Memorias del XI Congreso Geológico de Bolivia*. pp. 248-259.

## 1995

- ERARD O., 1995 - 20 ans de données glaciologiques au sommet du Sajama, Cordillère Occidentale, Bolivie. *Projet de Fin d'Etude, Option Géologie, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne*, 26 p. + 35 figures et 6 photos.
- FRANCOU B., MOURGUIART Ph. & FOURNIER M., 1995 - Phase d'avancée des glaciers au Dryas récent dans les Andes du Pérou. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 320, série II a, pp. 593-599.
- POURCHET M., MOURGUIART Ph., PINGLOT J.F., PREISS N., ARGOLLO J. & WIRRMANN D., 1995 - Evaluation des vitesses de sédimentation récente dans les hautes vallées des Andes boliviennes. Son intérêt dans l'estimation des paléo-pollutions atmosphériques. *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 320, série II, pp. 477-482.
- WIRRMANN D. & MOURGUIART Ph., 1995 - Late Quaternary Spatio-temporal Limnological Variations in the Altiplano of Bolivia and Peru. *Quaternary Research*, 43, pp. 344-354.
- MONRROY M., I., 1995 - Consideraciones geológicas, petrológicas y geoquímicas de las rocas volcánicas comprendidas entre Soledad y La Joya, provincias Barron y Cercado. Oruro, Bolivia.. *Tesis de grado*. 193 p.
- BALDELLON E., 1995 - Geología y etapas de deformación de la zona de la Serranía de las Minas. *Tesis de grado*, 160p. + anexos.
- ESPINOZA R.F., 1995 - Geología del área al NE del salar de Uyuni. Petrología de las rocas ígneas de la Formación Tambillo. *Tesis de grado*, 142p + anexos.
- ALDUNATE M. 1995. Estudio sismológico a partir de telesismos: tomografía de la parte centro-andina de Bolivia.. *Tesis de grado*.