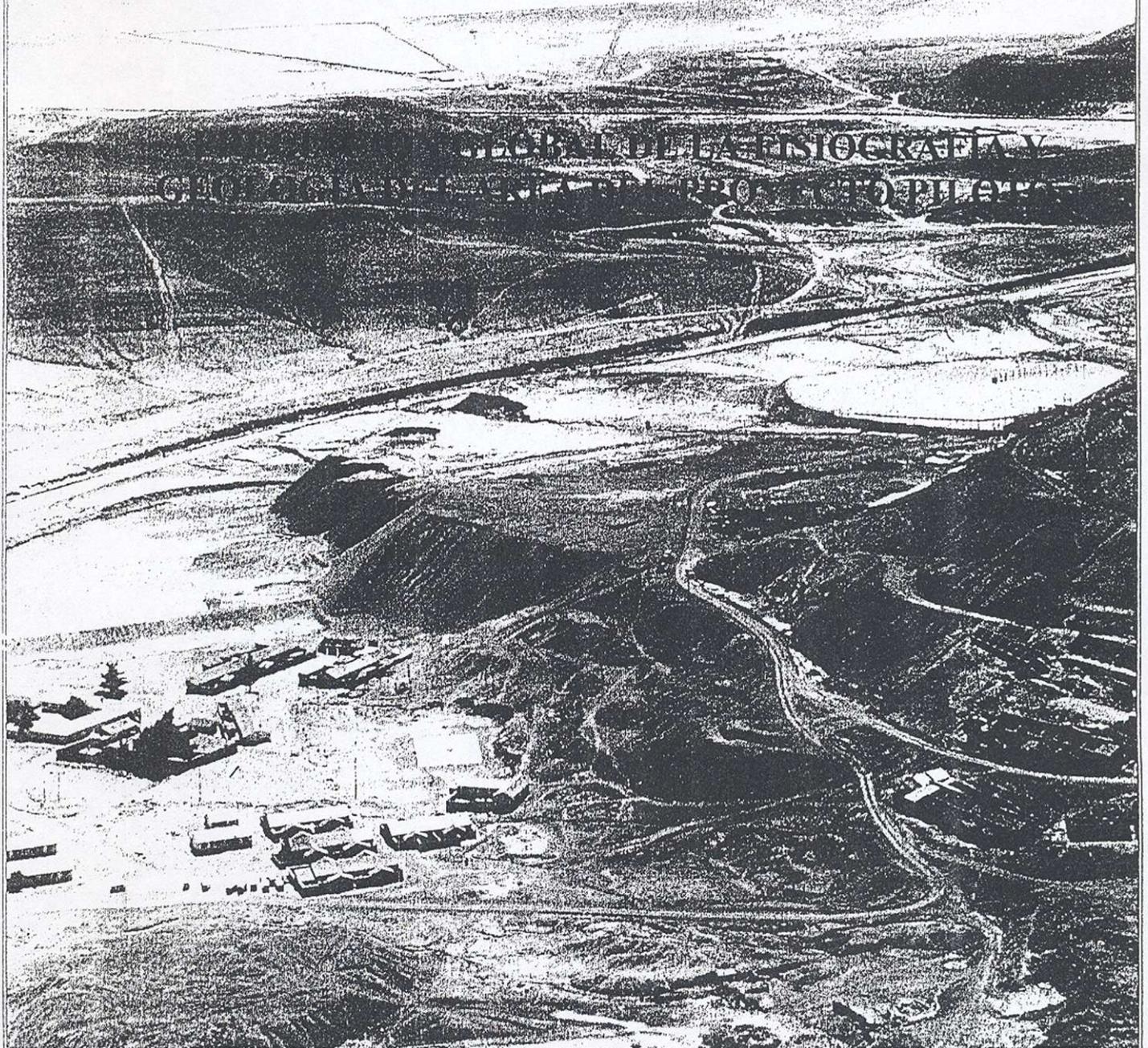


ORURO 2009

Ministerio de Desarrollo Sostenible
y Medio Ambiente

Secretaría Nacional de Minería

Proyecto Piloto Oruro



SWEDISH
GEOLOGICAL AB
ENVIRONMENTAL SERVICES

Date May 20, 1996
ID R-Bo-E-9 45-9605-PPO 9603

PANORAMA DE LA FISIOGRAFÍA Y GEOLOGÍA DEL ÁREA DEL PROYECTO PPO

Proyecto Piloto Oruro

Ministerio de Desarrollo Sostenible
y Medio Ambiente
Secretaría Nacional de Minería

Swedish Geological AB



Date: May 20, 1996
ID: R-Bo-E-9.45-9605-PPO 9603

ÍNDICE

ABSTRACTO	1
1. EL ÁREA DEL PROYECTO PPO	1
2. UNIDADES FISIAGRÁFICAS, OROGRAFÍA	2
2.1 Altiplano	2
2.2 Cordillera Occidental	3
2.3 Cordillera Oriental	4
2.4 Sistema hidrológico del área del proyecto	4
3. GEOLOGÍA	6
3.1 Panorama Regional	6
3.2 Geología Volcánica	8
Rocas volcánicas más antiguas	9
Ignimbritas	9
Estratovolcanes	9
3.3 Delineamiento de la evolución Cuaternaria del Altiplano	11
(a) El Lago Ballivián	12
(c) El lago Tauca	13
3.4 Desarrollo reciente del Lago Poopó	13
3.5 Unidades Cuaternarias y tipos de depósitos Cuaternarios hallados dentro del área del PPO	19
REFERENCIAS	21

ABSTRACTO

El área del proyecto del PPO, casi la mitad de la cuenca del Lago Poopó y un 17% de la parte Boliviana del Altiplano, cubre unos 22 000 km². El Altiplano es una planicie alta (3 660 a 3 805 m) y una cuenca endorreica, rodeada al este por la Cordillera Oriental y al oeste por la Cordillera Occidental, cuyas cumbres exceden los 6 000 m.

Geológicamente, el Altiplano puede ser caracterizado por una serie de cuencas intermontañas que recibieron sedimentos de fajas de plegamiento y corrimiento convergentes. La Cordillera Occidental contiene muchos volcanes grandes de época del Oligoceno posterior- Mioceno inferior a épocas recientes. La Cordillera Oriental está formada por sedimentos marinos siliclástico del Ordoviciano a Devoniano con sedimentos de plataforma continental endoplegados del Paleozoico Superior y sedimentos continentales del Cretáceo al Terciario. En las partes central y sur de la Cordillera Oriental, existen cuerpos y domos y grandes planicies ignimbríticas del Mioceno Superior. Sierras de montañas más pequeñas y cerros aislados también pueden ser hallados en el Altiplano, y la mayoría consisten de sedimentos Cretácicos/Terciarios y volcánicos, con raras ocurrencias de rocas Paleozoicas.

Durante el periodo Cuaternario, cinco episodios de glaciación ocurrieron en el Altiplano. El último episodio, Choqueyapu II, desde unos 18 000 a 12 000 B.P., coincidió con la última glaciación máxima global. Lagos extensos se desarrollaron en la cuenca del Altiplano durante los periodos interglaciales. Estos lagos fueron los antepasados de los actuales lagos Titicaca, Poopó, Uyuni y Coipasa.

El Lago Poopó actual ha sido sometido a frecuentes periodos de desecación. Por los menos siete periodos de desecación ocurrieron durante este siglo. Los periodos de desecación del lago están íntimamente relacionados con la variación del nivel del agua en el Lago Titicaca, pero no así a la precipitación pluvial dentro el área.

1. EL ÁREA DEL PROYECTO PPO

El área del proyecto del PPO cubre 22 000 km² y constituye casi la mitad de la cuenca del Lago Poopó y un 17% de la parte Boliviana del Altiplano.

El área se extiende desde S 17° 30' en el norte a S 18° 30' en el sur y W 68° 00' en el oeste a W 67° 30' en el este. El límite oriental del área está formado por la hoya tributaria entre la cuenca del Lago Poopó al oeste y otras cuencas que drenan al este. El límite occidental es la hoya tributaria al oeste del Lago Poopó. El límite norte está fijado arbitrariamente en el pueblo de Eucaliptus en el río Desaguadero. El límite al sur es la hoya tributaria al sur de la cuenca del Lago Poopó, al sur de Sevaruyo.

La ciudad de Oruro es el centro principal de población con 200 000 habitantes, es el centro económico de la región. Otras poblaciones grandes son Caracollo, Machacamarca, Huanuni, Poopó, Challapata, Huari, Sevaruyo y Toledo. La población total del área del proyecto es de unos 300 000.

Oruro está conectado al norte con La Paz mediante una carretera pavimentada de 230 km de largo, y al sur por caminos, tanto pavimentados como de tierra, con Challapata, continuando hacia Potosí, y con Sevaruyo, continuando hacia Uyuni. Hacia el oeste, existe una carretera de tierra que llega a la frontera con Chile, pasando por Toledo. Oruro también está conectado con La Paz mediante un ferrocarril, que también continúa de Oruro hacia el este, hacia Cochabamba, y al sur hacia Sevaruyo, con posteriores extensiones hacia Potosí, con las fronteras tanto de Chile como de Argentina.

2. UNIDADES FISIográfICAS, OROGRAFÍA

2.1 Altiplano

El Altiplano es una planicie alta a una altura de 3 805 m al norte (Lago Titicaca, 284 m de profundidad) y de 3 660 (Salar de Uyuni) al sur. Esta planicie es una cuenca endorreica que cubre un área de 191 000 km², y está situada en tres países, Bolivia (69%), Perú (27%) y Chile (4%). El Altiplano está limitado al este por la Cordillera Oriental y al oeste por la Cordillera Occidental, cuyas cumbres exceden los 6 000 m.

En contra de la creencia popular, el Altiplano no es una superficie completamente plana. Hay pequeñas cadenas montañosas y cerros aislados en toda el área. Estas montañas consisten principalmente de sedimentos Cretácico/Terciarios y volcánicos, con raras ocurrencias de rocas Paleozoicas. Desde Guaqui al norte hasta Corque en el sur, existe una cadena montañosa casi continua que se extiende en una dirección NE-SE. Consiste en rocas sedimentarias rojas y blancas, con cimas redondeadas y elevaciones que rara vez se levantan más de 1 000 m por encima de la planicie circundante. Las cimas más altas son el Pachakhala (4 842 m) y Jarrotani (4 795 m). Independientes de esta cadena montañosa hay estructuras aisladas como la de San Andrés, La Joya (4 169) y los cerros que rodean la ciudad de Oruro (San Felipe 4 032 m, San Pedro 4 012 m, Chutata 4 039 m, etc.). Hay una sierra curvada al sur del Lago Poopó y al este del Salar de Uyuni que normalmente no se levanta más de 300-400 m por encima de la planicie circundante.

Cuatro cuencas diferentes pueden ser distinguidas en el Altiplano. Al norte está la cuenca Titicaca, separada de la cuenca Jesús de Machaca por la serranía Tiahuanacu (4 800 m). La siguiente cuenca hacia el sur es la extensa cuenca de Oruro-Coipasa, incluyendo los lagos poco profundos de Uru Uru y Poopó. Esta cuenca está separada de la más sureña cuenca de Uyuni, por una serranía montañosa de este a oeste (La Serranía Intersalar). El Salar de Uyuni es el punto más bajo del Altiplano (3 660 m), (*Figura 1*).

El Lago Titicaca, 284 m de profundidad, es drenado por el río Desaguadero, que corre por el Altiplano y se vacía en los lagos Uru Uru y Poopó. Durante los periodos de niveles elevados de agua, el Lago Poopó es desaguado mediante el río Laca Jahuirá hacia el Salar de Coipasa.

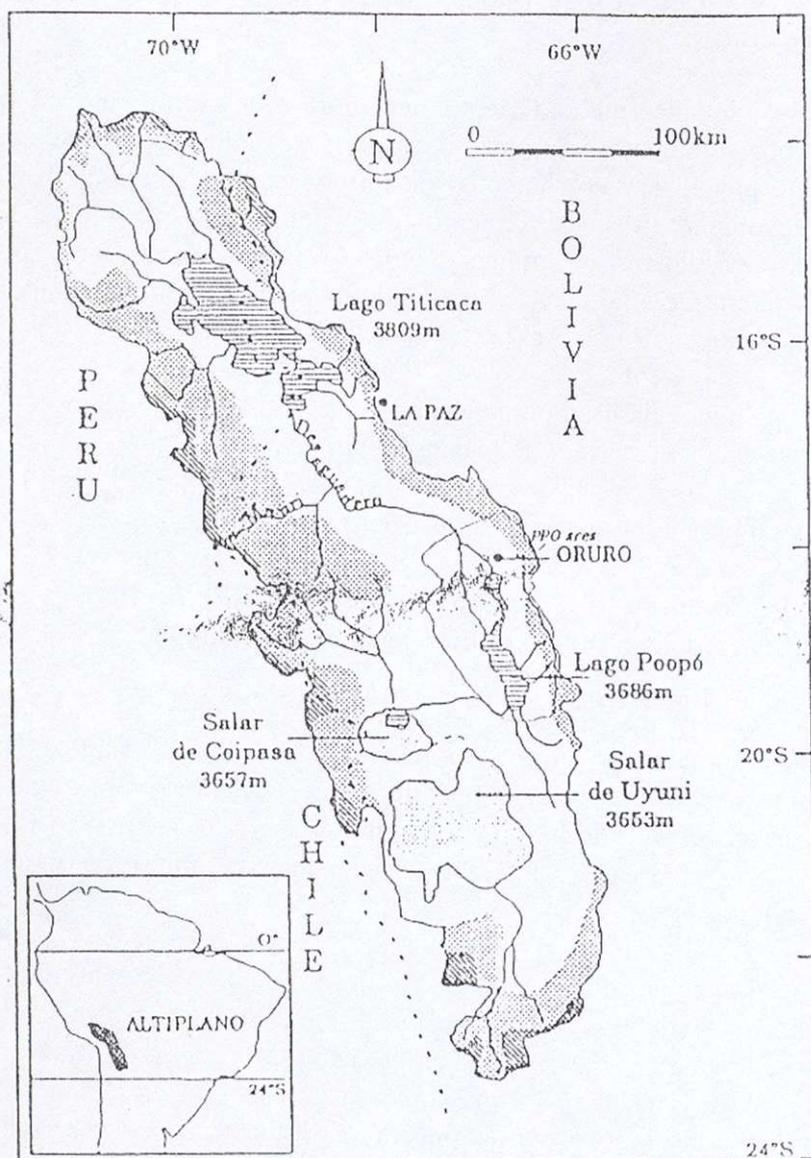


Figura 1 The Bolivian Altiplano. Locations of major basins and the Desaguadero river. Shaded areas are the Eastern and the Western Cordillera. (Ph. Mourguiart et al., 1995)

2.2 Cordillera Occidental

La Cordillera Occidental en la frontera con Chile y Perú tiene muchos grandes volcanes y puede ser dividida en tres secciones bien definidas: (1) norte, situada en las provincias de Pacajes (La Paz) y Carangas (Oruro), (2) central, y (3) meridional. En la sección norte, empezando en Jucuri en el norte y extendiendo hasta el río Sabaya en el sur, hay una cadena casi continua de volcanes con grandes serranías y planicies de lava ignimbrítica que están cortadas por el río Mauri. El pico más alto es el volcán Sajama (6 542 m).

2.3 Cordillera Oriental

La cadena montañosa de la Cordillera Oriental tiene unos 1 000 km de largo y 400 km de ancho. Está formada por sedimentos marinos siliclásticos del Paleozoico que comprenden secuencias gruesamente plegadas y corrimientos de lutitas argílicas, siltitas y areniscas de edad Ordoviciana a Devoniana. Existen sedimentos de plataforma continental endoplegados del Paleozoico Superior y sedimentos continentales del Cretáceo al Terciario. En las partes central y sur de la Cordillera Oriental, hay cuerpos y domos del Mioceno y grandes planicies del ignimbrítico de edad Mioceno Superior (Los Frailes, Morococala).

La cadena montañosa tiene una gran influencia en el clima y la distribución de lluvia en la región. La línea de nieve está a una altura de unos 5 300 m.

La Cordillera Oriental puede ser dividida en dos sectores:

1. Cordillera Real con una tendencia NW-SE
2. Cordillera Central o Meridional en dirección N-S

La Cordillera Real contiene más de diez montañas con elevaciones de más de 6 000 m. Puede ser dividida en los siguientes sectores: Apolobamba, Muñecas, de La Paz, Tres Cruces y de Cochabamba. De estos sectores, solamente el de Tres Cruces, que empieza al sudeste del río La Paz y continúa hacia el sudeste hasta Ventillaque en la vía férrea Oruro-Cochabamba, tiene una influencia sobre el área del proyecto. La cadena montañosa contiene muchos yacimientos minerales importantes.

La Cordillera Central tiene un rumbo N-S, y su altura promedio es mucho más baja que la Cordillera Real. Puede ser dividida en varias secciones. La Cordillera de Azanaques empieza en el paralelo 18° y se extiende hacia el sur. Se caracteriza por una serie de "mesetas" de lava, eso es, la de Morococala y Livichuco. La más extensa de éstas, la meseta de Morococala, abarca un área de unos 1 000 km², y consiste en flujos de lava que cubren sedimentos del Paleozoico. Algunos picos altos de montaña tales como el Wila Kholu (5 144 m) y Azanaques (5 102 m) se elevan por encima de las mesetas. La Cordillera de los Frailes se extiende desde Challapata al sur hasta una línea formada por el río Mulatos y la línea férrea a Potosí, y contiene picos de montaña que exceden los 5 000 m (Jatun Mundo, 5 428 m, y Choque Huarani, 5 388 m).

2.4 Sistema hidrológico del área del proyecto

El río principal, el Desaguadero, que ingresa en área del proyecto en Eucaliptus, fluye desde el Lago Titicaca hasta el Lago Poopó, en una longitud de 350 km. La gradiente promedio del río es ligera (0.03%). Debe notarse que durante los años de sequía, alrededor de 1970, se observó un flujo reverso hacia el Lago Titicaca (desde el río Mauri). Esto fue muy similar al caso sucedido alrededor de 1940. El caudal promedio de salida del Lago Titicaca hacia el Desaguadero era de unos 16 m³/s durante el periodo 1956-1983, y de 110 m³/s

durante los siguientes años más lluviosos (Gutiérrez, 1991). El tributario principal al río Desaguadero es el río Mauri, con una confluencia en Calacoto.

El Desaguadero se divide en dos ramas en La Joya y la rama occidental fluye en una dirección sur pasando por el pueblo de Toledo desembocando en la parte noroeste del Lago Poopó. La rama oriental fluye en una dirección sureste e ingresa al Lago Uru Uru pasando por el pueblo de Challacollo. En Burguillos, un canal toma agua hacia el este, al ingenio de Itos y la laguna de Tajarita. El agua de esta laguna, que solamente existe durante la época de lluvias, desemboca mediante el río Tajarita, pasando por el Puente Español, en el Lago Uru Uru. El Lago Uru Uru, que, de acuerdo a algunas fuentes, solamente ha existido desde el inicio de este siglo, desagua mediante un canal de 20 km de largo, en el extremo norte del Lago Poopó.

Al sur, los ríos Márquez y Sevaruyo desembocan en el Lago Poopó. Desde la cuenca que contiene las minas de Bolívar-Totoral-Antequera, el río Antequera vierte sus aguas contaminadas en la planicie de Poopó en Pazña. Al sur de Machacamarca, el río de San Juan de Sora Sora vierte sus aguas contaminadas, que vienen de los ríos Huanuni y Santa Fe, en la parte del río Desaguadero que fluye del Lago Uru Uru hacia el Lago Poopó.

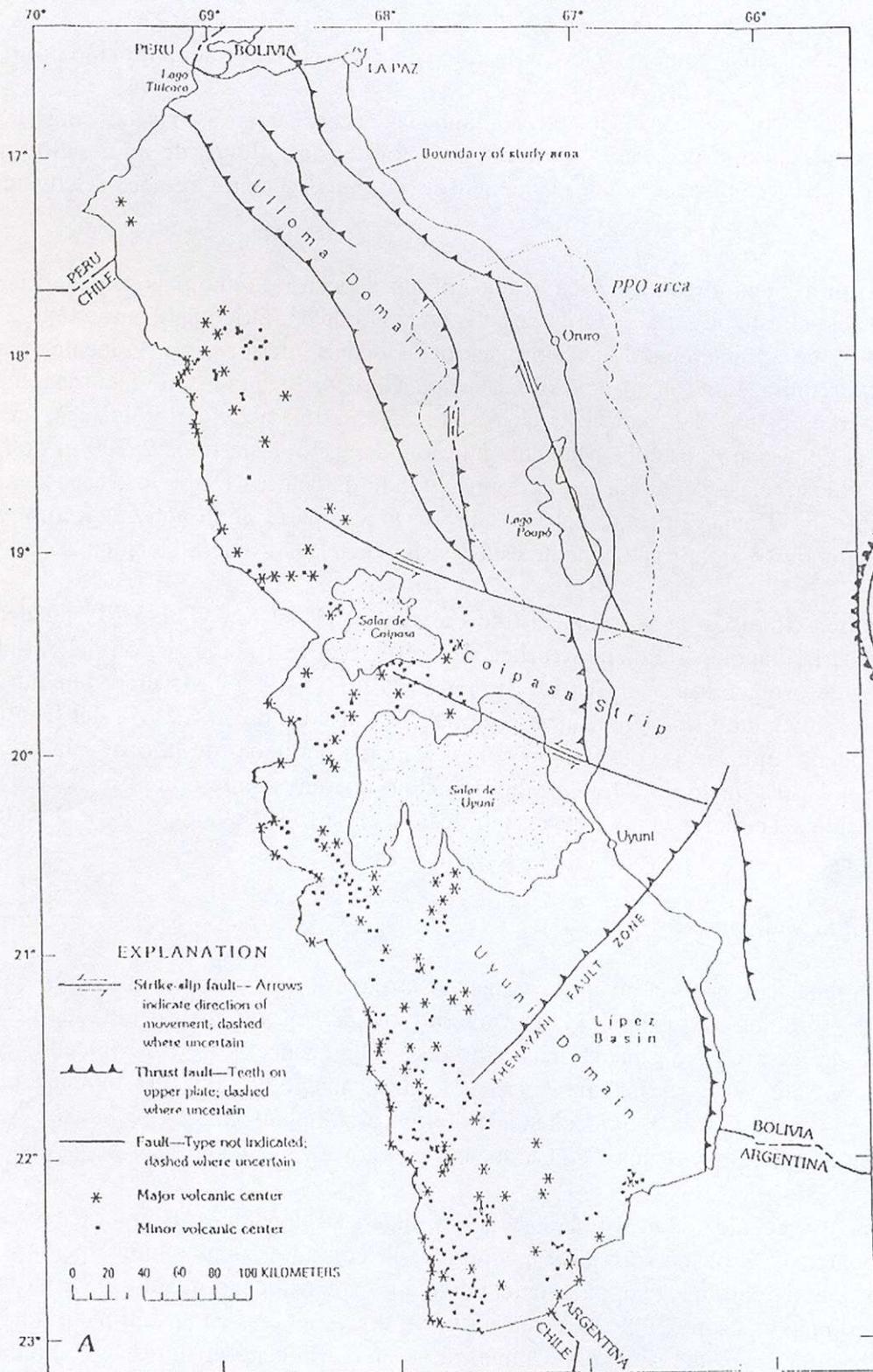


Figura 2. Mapa del Altiplano y de la cordillera Occidental mostrando algunos de los principales elementos estructurales y la distribución de centros eruptivos de los estratovolcanes del Mioceno posterior al Holoceno. (U.S. Geological Survey Bulletin 1975)

principal de deformación que afectó el entorno deposicional. Arena fluvial y lacustre, limo, arcilla, y grava (Formaciones de Charaña, Ulloma, y Umala) localmente intercaladas con unidades de toba volcánica regional, caracterizan los depósitos jóvenes del Altiplano norte.

Al sur, en las partes central y sur del Altiplano, las rocas Terciarias basales consisten en una serie de areniscas rojo-oscuro a rojo-púrpuras (Formación Potoco) de unos 1 300 m de espesor. Estas rocas suprayacen concordantemente sobre una sección Cretácea relativamente delgada.

El Potoco gira hacia el este sugiriendo que fue un depósito de antepaís asociado con el corrimiento hacia el este de estratos Ordovicianos en la Cordillera Oriental. Tanto como 2 600 m de arenisca y conglomerados de las Formaciones Quehua Inferior y San Vicente y, en la parte central, arenisca, lutita, limo y yeso del Grupo Corocoro suprayacen discordantemente sobre el Potoco en el sur. Siguiendo este ciclo sedimentario, una actividad volcánica, iniciada en tiempos del Oligoceno posterior-Mioceno anterior, depositó hasta unos 2 900 m de rocas volcánicas y volcanoclásticas de un número muy grande de centros eruptivos, especialmente en el Altiplano sur. Hacia el tiempo del Plioceno, la mayor parte de la actividad eruptiva se desplazó hacia el oeste, donde actualmente está restringida a la Cordillera Occidental.

Dos periodos extensos de acortamiento de corteza en 27-19 Ma y 11-5 Ma pueden ser responsables de la mayor parte de la deformación estructural en toda la región del Altiplano. Otros eventos deformacionales del Cenozoico en 42 Ma, 17-15 Ma y 2 Ma fueron de duración más corta y posiblemente sin significancia regional. El episodio de 27-19 Ma del Oligoceno posterior-Mioceno anterior es considerado como la marca del inicio de la orogenia principal Andina en Bolivia. El inicio de este episodio coincidió aparentemente con la iniciación de la actividad volcánica Terciaria en los Andes centrales y el desarrollo de la Cordillera Oriental.

3.2 Geología Volcánica

En el Altiplano sur, a lo largo de la franja de la cuenca de Lipez, la distinción entre el Altiplano y la Cordillera Occidental y la Cordillera Oriental se torna menos definida debido a la presencia de centros volcánicos más antiguos (Oligoceno posterior-Mioceno) y sus depósitos proximales y distales. Estas rocas volcánicas más antiguas, que también pueden subyacer mucho de la Cordillera Occidental, salen en el Altiplano norte (Formación Mauri), Altiplano central (Campo Volcánico de Carangas), y el norte y oeste del Salar de Uyuni.

La actividad volcánica en el Altiplano y la Cordillera Occidental de Bolivia empezó en el Oligoceno posterior-Mioceno anterior y ha continuado con unas cuantas interrupciones hasta el presente. La actividad más temprana, en el Oligoceno y el Mioceno, resultó en el desarrollo de grandes complejos eruptivos y actividad intrusiva concomitante en el Altiplano sur y a lo largo de ambos márgenes del Altiplano. Comenzando en el Mioceno posterior y continuando a través del Plioceno, grandes volúmenes de ignimbrita fueron erupcionados desde complejos caldera-escudo, mayormente en el Altiplano sur.

Estratovolcanes del arco Andino moderno, tan jóvenes como el Mioceno posterior (unos 7 Ma) son concurrentes con las etapas posteriores de la actividad ignimbrítica. Aunque no hay reportajes de actividad eruptiva histórica, siete de los estratovolcanes contienen fumarolas

activas y más de una docena muestran estructuras de descarga bien preservadas, flujos de lava, y domos.

Rocas volcánicas más antiguas

Las rocas volcánicas asociadas con los grandes complejos eruptivos del Oligoceno-Mioceno consisten en flujos de lava, brechas de flujo, lahares, rocas piroclásticas, domos, rocas intrusivas poco profundas principalmente de composición intermedia. Por lo menos nueve de estos complejos han sido identificados. (*Figura 3*). Adicionalmente, lavas más antiguas ocurren en buena parte de la Cordillera Occidental, tales como cerca a Carangas y este y sur de Berenguela, donde son parte de una secuencia estratigráfica subyaciendo lavas de los estratovolcanes más jóvenes. Rocas intrusivas subvolcánicas dacíticas a riolíticas, que no parecen estar obviamente asociadas con rocas extrusivas, ocurren principalmente a lo largo del límite Altiplano-Cordillera Oriental. La evidencia sugiere que calderas de colapso grandes estén asociadas con algunos de estos centros eruptivos más antiguos.

Ignimbritas

Ignimbritas, principalmente de composición dacítica, están expuestas en grandes áreas, mayormente en el Altiplano sur donde ellas subyacen, y están interpuestas con lavas de estratovolcanes del Mioceno-Holoceno posterior. Se estima que más de 100 000 km² de ignimbritas fueron erupcionadas en los Andes centrales durante este periodo de actividad volcánica. En el Altiplano sur han sido reconocidas por lo menos cuatro áreas fuente, siendo la mayor parte amplios escudos volcánicos con calderas de bajas cumbres de hasta 30 km de diámetro. Hacia el norte, la caldera Soledad en La Joya es el centro reconocido para ignimbritas más septentrional. La parte oeste del gran campo de ignimbritas de Los Frailes está expuesta a lo largo del margen este del Altiplano central. Su fuente yace en la parte principal del campo situado al este de la Cordillera Oriental.

Estratovolcanes

Los estratovolcanes del tiempo del Mioceno posterior al Holoceno cubren más de 24 000 km² en la parte de la Cordillera Occidental y del Altiplano sur con interés para el área del proyecto. El volumen promedio de los principales centros eruptivos es de unos 20-40 km³; los centros más grandes en la región, como los estratovolcanes de Sajama y Tunupa, pueden tener volúmenes de unos 90 km³.

Los mayores estratovolcanes están compuestos principalmente de flujos de lava andesítica a dacítica, brechas de flujo, lahares, y rocas piroclásticas menores. Efectos conspicuos de alteración hidrotermal y solfatárica son comunes y generalmente están confinados a áreas dentro del área inmediata de descarga.



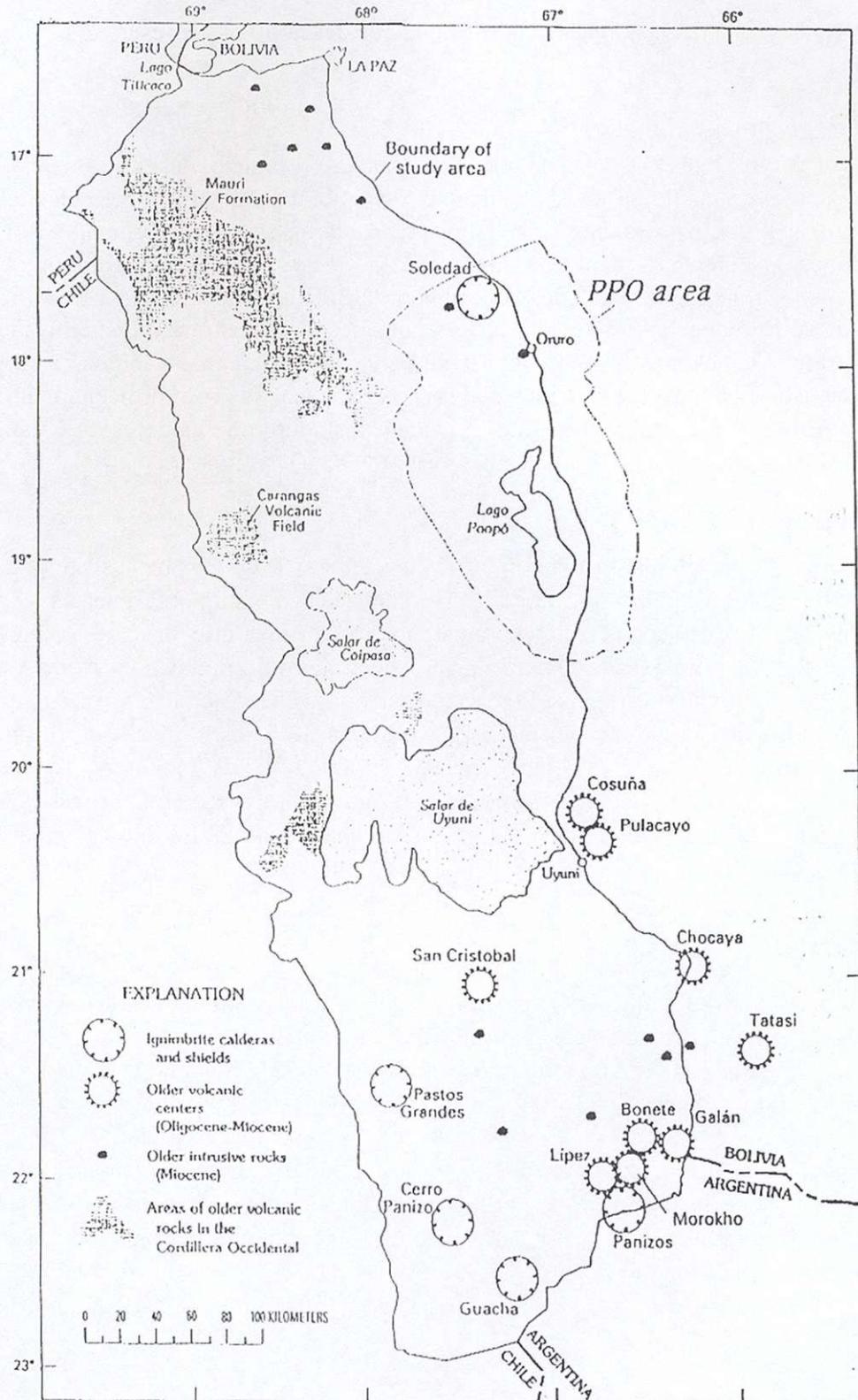


Figura 3. Mapa del Altiplano y de la Cordillera Occidental mostrando algunos elementos volcánicos asociados con las ignimbritas y con centros volcánicos más antiguos. (U.S. Geological Survey Bulletin, 1975)

3.3 Delineamiento de la evolución Cuaternaria del Altiplano

Una característica típica del periodo Cuaternario, en el Altiplano como en todas partes, son los episodios glaciales alternando con periodos interglaciales más cálidos. En el Altiplano han sido distinguidos cinco eventos glaciales (del más antiguo al más reciente): Calvario, Kaluyo, Sorata (c. 60 000-67 000 B.P.), Choqueyapu I (empezando c. 35 000 B.P.), y Choqueyapu II (c. 18 000-20 000, coincidiendo con la última glaciación global máxima).

Las morrenas inferiores relacionadas con la última fase de glaciación están situadas a la altura de 3 800-3 900 m, o unos 1 000 m por debajo de la elevación actual de los glaciares, e indican que durante ese periodo todo el Altiplano estaba cubierto de hielo.

Dos unidades de morrenas de las glaciaciones más antiguas, Patapatani y Calvario, con un espesor de más de 100 m, se identifican en el valle de La Paz. Las dos morrenas están separadas una de la otra por la Formación Purapurani de 100-200 m de espesor, compuesta de grava gruesa y redondeada. Esto sugiere una recesión importante de los glaciares.

Durante los periodos interglaciales, lagos proglaciales se desarrollaron en forma extensa dentro la cuenca del Altiplano: Lago Ballivián, a continuación del episodio Sorata, Lago Minchin durante el interglacial Choqueyapu I y II, y finalmente Lago Tauca después de Choqueyapu II (Servant *et al.*, 1978). La relación de los episodios glaciales y el desarrollo de los lagos está presentada esquemáticamente en la *Figura 4* (Servant *et al.*, 1978), y a continuación se da una breve descripción.

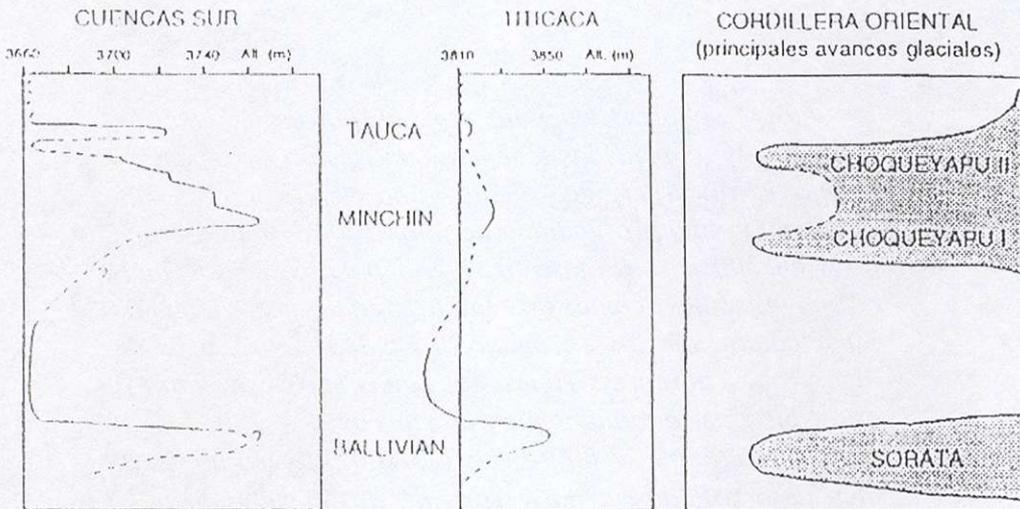


Figura 4 Correlation between the paleolakes and the evolution of the glaciers on the Bolivian Altiplano. (Servant *et al.*, 1978)

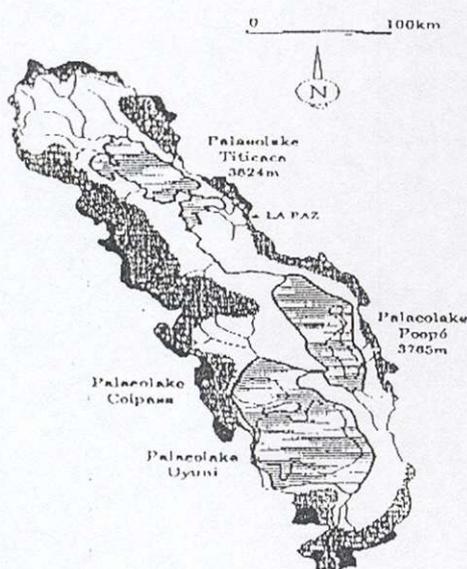
(a) *El Lago Ballivián*

La extensión del lago Ballivián es conocida alrededor del Lago Titicaca y en el valle del río Desaguadero (la Formación Ulloma). Los depósitos del lago Ballivián son desconocidos en las cuencas de Uyuni, Coipasa y Poopó.

La Formación de Ulloma consiste principalmente de arena fina bien laminada, localmente rica en nódulos calcáreos, e interestratificada con arcilla o capas de guijarros. Arcilla y arcilla fangosa se desarrolla en la parte superior de la Formación donde una capa de diatomita también ha sido encontrada. Los sedimentos situados más alto de la Formación Ulloma se encuentran a 3 880 m, aunque los sedimentos alrededor del Lago Titicaca nunca se elevan por encima de 3 850 m. La diferencia en altura puede ser debido a una perturbación tectónica, o a la existencia de dos cuerpos de agua separados, un lago correspondiendo al Lago Titicaca actual, y otro en el área del Desaguadero. El lago Ballivián aumentó el área del Lago Titicaca en un 50% por encima del área actual. El agua del lago era casi fresca.

Existen sedimentos lacustres desarrollados alrededor del salar de Coipasa que están relacionados con el periodo Ballivián. Los depósitos más importantes están situados alrededor del volcán Huachacalla cerca a Escara y a lo largo del río Lauca. La Formación Escara, 15 m de espesor, consiste de diatomitas, localmente argillicas o calcáreas. La línea de ribera más alta se encuentra a 3 780 m, implicando una vasta superficie de agua cubriendo todas las cuencas del Altiplano sur. Sin embargo, no se han encontrado hasta ahora depósitos de la Formación Escara alrededor del Lago Poopó, y parece que la elevación actual de la Formación Escara no corresponde a un nivel verdadero del antiguo lago. Los sedimentos de Escara han sido movidos por un evento tectónico.

(b) *El lago Minchin*



El lago Minchin se extendió por las partes del sur del Altiplano y cubrió las cuencas de Uyuni, Coipasa y Poopó. El nivel del agua alcanzó una elevación de 3 765 m, teniendo una profundidad de unos 100 m, y un área de unos 60 000 km² (Figura 5). Los depósitos de este lago están presentes como dos facies diferentes. La más espectacular son los estromatolitos calcáreos (esteras de algas) que cubren las riberas antiguas. Los estromatolitos están bien desarrollados en tres riberas a 3 740, 3 720 (fechados 26 000-27 000 B.P.), y 3 700 m, pero no están bien desarrollados en la terraza de 3 760 m, indicando que el nivel más alto no fue mantenido por mucho tiempo. Aparte de estas formaciones de la orilla, hay depósitos estratificados del lago de limo, arcilla y arena, en algunos lugares calcáreos, y a veces diatomáceos. El lago Minchin fue probablemente de una salinidad media (3-13 g/l)

Figure 5. The extension of the Minchin lake at about 35 000 B.P. (Wirrmann et al., 1995)

(c) *El lago Tauca*

Cuando llegó a su máxima extensión, el lago Tauca alcanzó una elevación de 3 720 m. La data de los sedimentos de la elevación más alta por C^{14} indica una edad de 10 640-12 360 B.P. Rastros del lago Tauca han sido hallados en todas las cuencas del Altiplano, pero menos en el área del Titicaca. En el sur del Altiplano, el lago Tauca cubría un área de unos 43 000 km² y tenía una profundidad de unos 60 m. El lago fue dividido en tres sub-cuencas casi independientes, los paleolagos Poopó, Uyuni, y Coipasa. Los lechos de los lagos consisten de depósitos diatomitas calcáreas o arcillosas de 2-5 m en espesor.

Se cree que el agua del lago Tauca tenía una salinidad alta (hasta 40 g/l). El lago Tauca se secó hace unos 10 000 años.

3.4 Desarrollo reciente del Lago Poopó

El comportamiento de los elementos principales del actual sistema hidrológico en la cuenca endorreica del Altiplano - Lago Titicaca, el río Desaguadero y el Lago Poopó - al observar los niveles de los lagos y el caudal en el río, están íntimamente ligados. Como se muestra en el informe PPO-9606, la descarga del río Desaguadero está altamente correlacionada al nivel del agua en el Lago Titicaca. El Lago Poopó es extremadamente sensible a la cantidad de suministro de agua del río Desaguadero, ya que representa aproximadamente el doble del aporte local (o sea, la precipitación en el área menos la evapo-transpiración). *Figura 6* muestra las variaciones en el nivel de agua del Lago Titicaca, la precipitación medida en Oruro y el caudal en el río Desaguadero alineados cronológicamente (para mayores detalles ver también *Figura 5.1* en el informe PPO-9606). El efecto de un bajo nivel de agua en el Lago Titicaca está claramente relacionado con la desecación del Lago Poopó. Una característica impactante de este diagrama es la regularidad de la desecación del Lago Poopó.

El nivel del agua en el Lago Titicaca aumentó intermitentemente desde 1944 hasta 1986/1987, que también fue el periodo del nivel de agua más alto documentado del Lago Poopó.

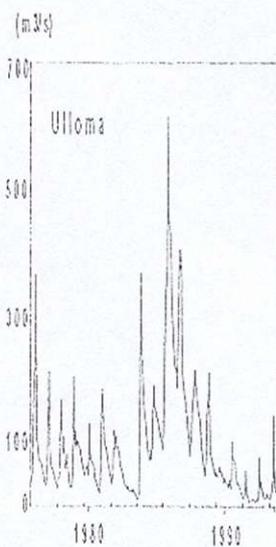
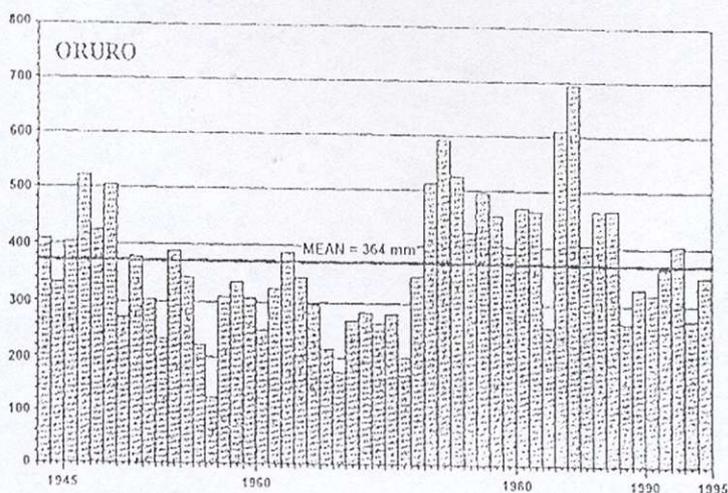
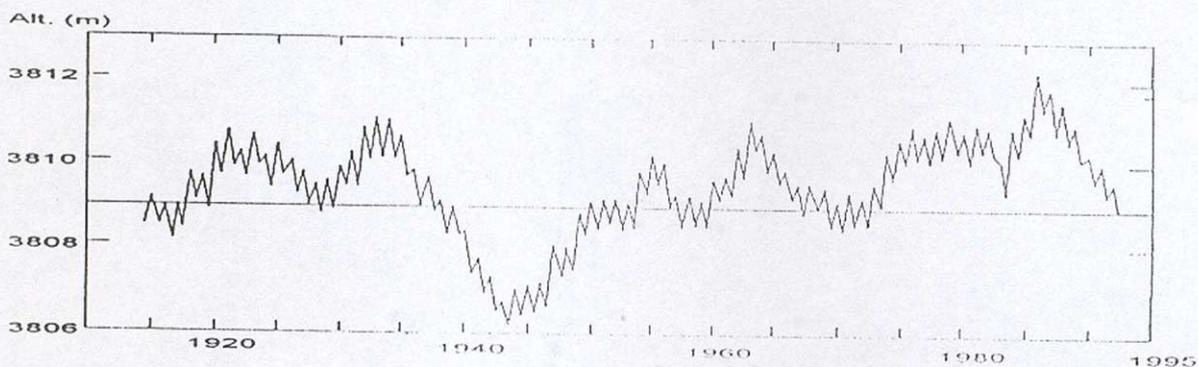
Antes de 1985, el río Desaguadero descargaba mediante el Lago Uru Uru, creando una zona amplia con una pampa inundada donde la materia en suspensión podía decantarse. El agua del Lago Uru Uru desemboca hacia el sur, mediante un canal angosto, en el lado norte del Lago Poopó. El Lago Poopó fue investigado en 1977 (Illis, 1977) con esta configuración de entrada de líquido, y la profundidad del agua fluctuó de 2.20 m para un nivel de agua alto a 1.60 m para un nivel de agua bajo. Dos grandes zonas pueden ser distinguidas: una región central de unos 1 500 km² donde la profundidad varió entre 0.50 m a 2.20 m, y una región periférica que podía alcanzar 1 000 km² de superficie pero que tenía una profundidad de <0.50 m (Boulangé et al., 1978). Las observaciones realizadas en 1979 indicaron una profundidad máxima de 2.90 m y una superficie de unos 2 700 km². En esta configuración, no había descarga del Lago Poopó, y existía una gradiente de salinidad significativa de norte a sur. Las aguas del norte llegaban con una salinidad de unos 5 g/l, pero las salinidades aumentaban hacia el sur, donde el lago acababa como una salina. En 1982 se observó una salinidad de 7.5 g/l en Pazaña, cerca al norte del lago, y 75 g/l cerca a Huarí en el sur.

El suministro de agua excepcionalmente grande del río Desaguadero durante 1986/1987 resultó en un gran incremento en el nivel del Lago Poopó. El río Desaguadero cambió el curso de sus tramos inferiores y descargó no al Lago Uru Uru sino directamente a la parte noroeste del mismo Lago Poopó. La profundidad máxima en el centro del lago llegó a 6 m, y la

superficie del lago era de unos 3 500 km². La desembocadura en el sur, el río Laca Jahuirá, fue reactivada y fluyó hacia el este hacia el salar de Coipasa. Una salinidad uniforme se desarrolló en todo el lago, entre 8 y 11 g/l. Observaciones entre 1987 y 1989 dan temperaturas de superficie entre 13.3 y 13.8 °C análogas a las temperaturas del Lago Titicaca. La conductividad variaba de 10 000 a 14 300 μ S/cm. El pH estuvo un rango de 8.2 a 9.

Las extensiones de los lagos Poopó y Uru Uru en tres diferentes años para los cuales se dispone de imágenes satelitales (1976, 1986 y 1994) se muestran en *Figura 7*, superpuestas a una imagen del satélite Landsat de 1994 (bandas 3, 2, 1 como rojo, verde, azul). Las fechas de la extensión de los lagos son, a grosso modo, similares, y caen entre el fin del invierno y antes de que la estación lluviosa vuelva a empezar en diciembre. La línea anaranjada (1975) muestra una extensión del lago Poopó relativamente grande, comparada con 1994, así como el lago Uru Uru. La línea amarilla (1986) indica aproximadamente la máxima extensión de los lagos en años recientes; el brazo oeste del río Desaguadero que echa sus aguas al norte del lago Poopó también tiene gran extensión. La línea magenta (1994) muestra una más típica extensión del lago. Cuando la imagen fue tomada: 1 de octubre, la mayor parte del lago estaba seca; para el lago Poopó la línea magenta indica la extensión de un área muy húmeda (y agua) derivada de la banda Landsat infrarroja 7. Esta área, húmeda probablemente estuvo cubierta por una delgada capa de agua corto tiempo atrás. Áreas con agua quedan solamente donde están visibles zonas muy oscuras en la imagen dentro de la línea magenta, al norte y a lo largo del borde oeste.

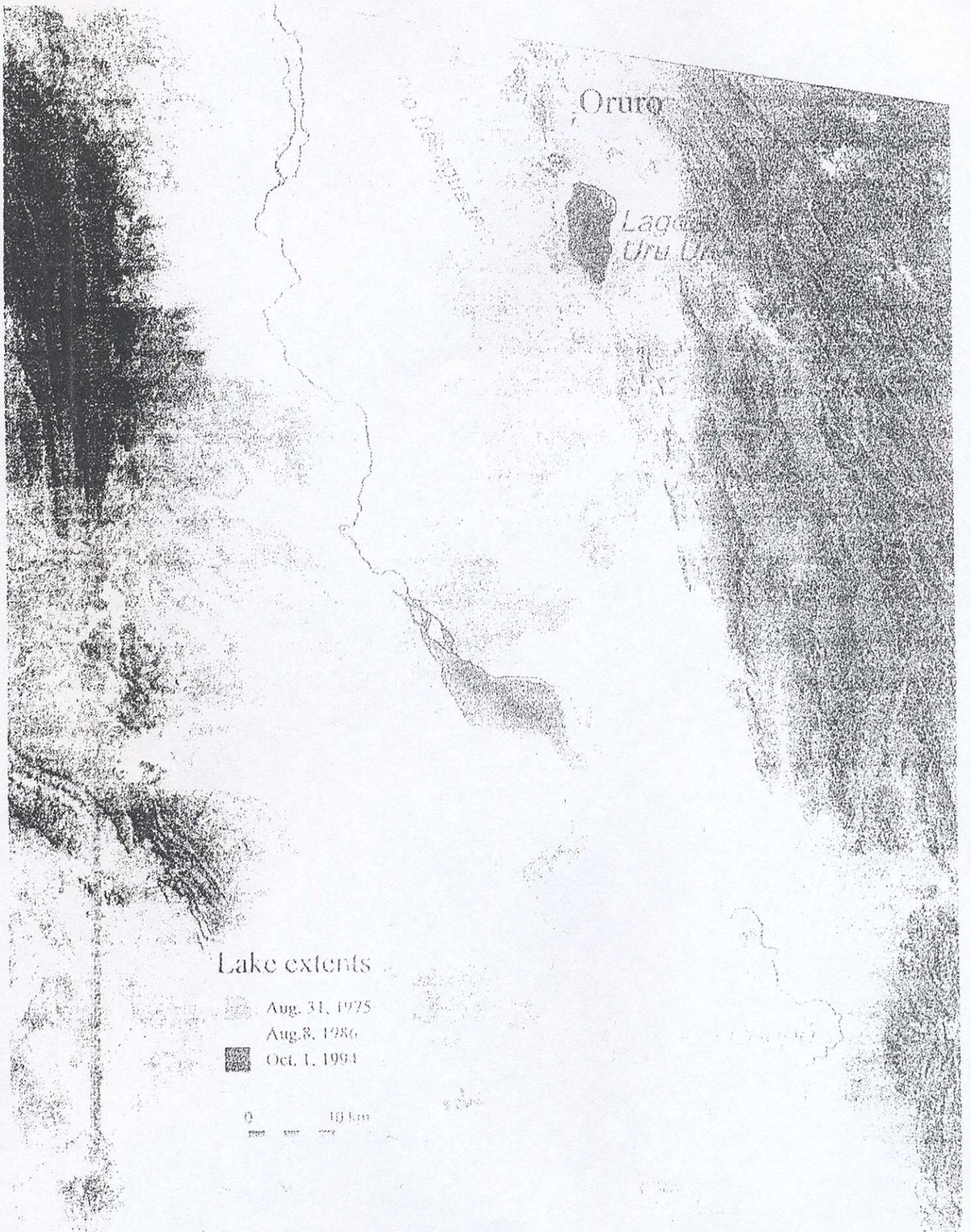
Durante la duración del proyecto PPO, casi no se ha registrado agua en el lago Poopó. El caudal del río Desaguadero medido en la estación de Eucaliptus para el periodo 1994-1995 fue de 14 m³/s, que debe ser comparado con el promedio a largo plazo de 94 m³/s medidos en Ulloma (1975 hasta 1994). Basados en estas mediciones, se puede asumir que el caudal de ingreso al Lago Poopó durante 1994/1995 fue menor al 15% del caudal de ingreso durante los últimos 20 años, o menos del 35% del caudal de ingreso normal desde 1988.



Estado del Lago Poopó

??	?	XXX	??	XX	X	XX
XX = Período Reportado de desecación				?? = Período probable de desecación		
1920	1930	1940	1950	1960	1970	1980

Figura 6. Variaciones observadas en el nivel de agua del lago Titicaca, datos de precipitación registrados en Oruro y flujos medidos en el río Desaguadero a la altura de Ulloma, cronológicamente alineados. Al pie se muestran los efectos reportados o posibles sobre el lago Poopó



3.5 Unidades Cuaternarias y tipos de depósitos Cuaternarios hallados dentro del área del PPO

Las siguientes unidades Cuaternarias han sido mapeadas dentro del área del proyecto:

Código	Tipo de depósito	Constituyentes principales	Frecuencia relativa
Qc	Depósito cólico	Arena de grano fino	XX
Qa	Depósito aluvial	Guijarros, grava, arena y arcilla	X
Qaa	Depósito abanico aluvial	Guijarros, grava, arena y limo	X
Qcf	Depósito coluvial-fluvial	Grava, arena, limo y arcilla	X
Qc	Depósito coluvial	Rodados y grava	X
Qt	Depósito de terraza	Guijarros, grava, arena, limo y arcilla	X
Qfl	Depósito Fluvio-lacustre	Grava, arena, limo y arcilla	XXX
Qfg	Depósito Fluvio-glacial	Gravas, arena y arcilla	XX
Qg	Depósito glacial	Rodados, grava y arcilla	X
Ql	Depósito lacustre	Limo, arcilla y arena	XXX
Qd	Deslizamiento	Rodados, arena y limo	X

XXX=Frecuente, XX=Menos frecuente, X=Existe

El efecto ambiental de estos tipos de suelos es, casi seguro, relacionado con la capacidad de amortiguamiento del suelo. Estos efectos serán tratados durante la evaluación de los datos existentes y a ser introducidos y serán discutidos en el informe final.

REFERENCIAS

- Boulangé, B., Rodrigo, L.A., and Vargas C., 1978, Morphologie, formation et aspects sédimentologiques du lac Poopó (Bolivie), ORSTOM
- Braniša, L., 1960, Geologia de Bolivia
- Colombo C., M., and Cunningham, C.G., 1993, Geologic model for mineral deposits of the La Joya district, Oruro, Bolivia., *Economic Geology*, Vol 88, 1993, p. 701-708
- Coudrain-Ribstein, A., Olive, P., Quintanilla, J., Sondag, F., and Caluaya, D., 1994, Salinity and isotopic dynamics of the groundwater resources on the Bolivian Altiplano, in Proc. AISH Symp TRACARID, Vienne, Autriche, Aofit 1994
- Gustavson Associates, Inc, Baker & McKenzie, Minería Técnica Consultores Asociados y Servicio Geológico de Bolivia, Compendio de Geología Económica de Bolivia.
- Gutiérrez, R., 1991, Río Desaguadero (su origen en el Lago Titicaca). Informe Sub-programa Estudios Titicaca-Desaguadero-Poopó-Salar, La Paz, Bolivia.
- Montes de Oca, I., 1989, Geografía y Recursos Naturales de Bolivia
- Mourguiart, P., Argollo, J., Carbonel, P., Corrège, T., and Wirmann, D., 1995, El Lago Titicaca durante el Holoceno: Una historia compleja, in *Cambios cuaternarios en América del Sur*, J. Argollo & Ph. Mourguiart (eds.), 1995, p. 173-188
- Pourchet, M., Mourguiart, P., Pinglot, J.-F., Preiss, N., Argollo, J., and Wirmann, D., 1994, Sédimentation récente dans le lac Titicaca (Bolivie), in *C.R. Acad. Sci. Paris*, t. 319, série II, 1994, p. 535-41
- Servant, M., and Fontes, J-Ch., 1978. Les lacs quaternaires des hauts plateaux des Andes boliviennes. Premières interprétations paléoclimatiques. *Cahiers ORSTOM, Série Géologie*, 10 (1), p. 9-23
- Swedish Geological AB, and Swedish Meteorological and Hydrological Institute, 1996, Hydrology of the project area and its surroundings: Proyecto Piloto Oruro, Report PPO-9606, 1996, 34 p.
- U.S. Geological Survey, 1975, Geology and Mineral Resources of the Altiplano and Cordillera Occidental, Bolivia, U.S. Geological Survey Bulletin
- Wirmann, D., and Mourguiart P., 1995, Late Quaternary Spatio-temporal Limnological Variations in the Altiplano of Bolivia and Peru., *Quaternary Research* 43, 1995, p. 344-354