

3. 地形・地質条件

3-1 地形

3-1-1 ボリビア国の地形

ボリビア国の地形は図Ⅳ-2に示すように4大別され、それぞれ地質条件を反映している。以下に各地形分類を示し、各地形の概要を述べる。

I アンデス地帯 (Los altos andes)

II 亜アンデス地帯 (La Faja subandina)

III 中央平原地帯 (Las bajas llanuras en el centro)

IV ブラジル楯状地帯 (Las colinas del Escudo Brasilenno)

(1) アンデス地帯

この地帯は、さらに次の3帯——西部山岳地帯 (Cordillera Occidental) ・高原地帯 (Altiplano) ・東部山岳地帯 (Cordillera Oriental) ——に分けられる。

①西部山岳地帯 ボリビアの西端に位置し、一般に火山帯に属し、高度は6,500mに達する。

②高原地帯 平均高度は約4,000mで中生代から新生代にかけての碎屑岩類が厚さ10,000m以上も堆積している一種の構造帯である。

③東部山岳地帯 層厚6,000mにおよぶ古生代の古期構成岩類を主とし、北部では火成活動がその脊梁部にいちじるしく、これを真正山岳地帯 (Cordillera Real) と名付けている。この東部山岳地帯の南部では古期岩類を上部白亜系が不整合におおっている。

(2) 亜アンデス地帯

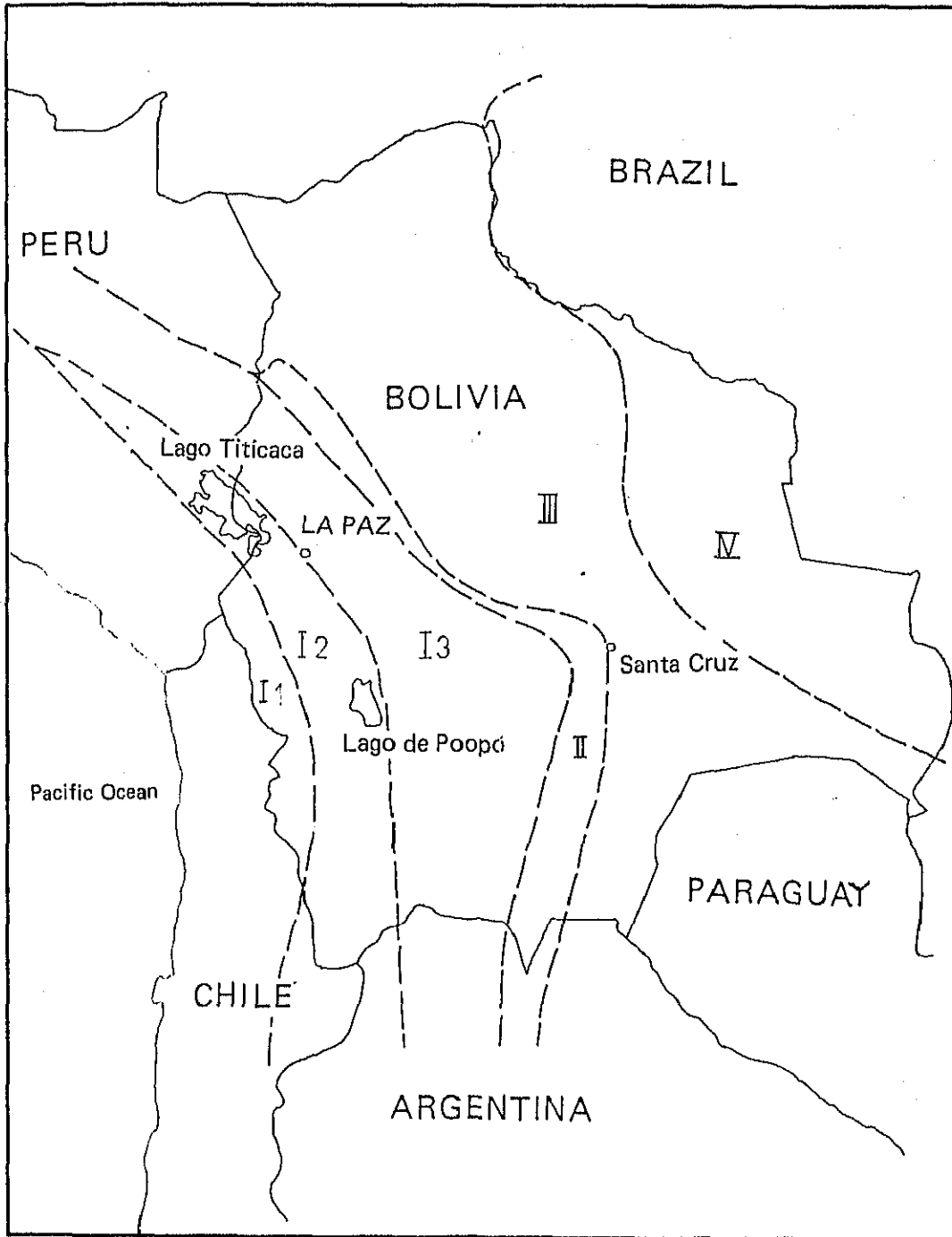
アンデス地帯の東側で高度1,000~2,500mの褶曲山脈帯が存在するが、これを亜アンデス地帯と呼んでいる。この地帯は一般に古生代の岩類と上部第三系からなりサンタ・クルス (Santa Cruz) 付近のコード (Codo) 地域でその幅が非常にせまくなっている。このコード地域より北部は南部に比べて高い地形を示している。

(3) 中央平原地帯

この地帯は亜アンデス地帯の東側に隣接し、第四系が主として発達する。北部のベニ (Beni) 平原は熱帯性の密林に蔽われ、沼沢も多く、またサバンナ地形を示すところもある。南部のグラン・チャコ (Gran Chaco) 平原では刺のある雑草が生い茂るが、この2つの平原の中間にあるサンタ・クルス付近では農耕地が存在する。

(4) ブラジル楯状地帯

ボリビアの北東部はゆるい起伏の丘陵地帯で、一般に高度は700m以下であり、先カンブリア系からなるがその上部で古生層の存在するところは突出した高地を形成している。



- I 1 : アンデス地帯 (Los altos andes)、西部山岳地帯
- I 2 : " (")、高原地帯 (Alti Plano)
- I 3 : " (")、東部山岳地帯
- II : 亜アンデス地帯 (La Faja subandina)
- III : 中央平原帯 (Las bajas llanuras en el centro)
- IV : ブラジル盾状地帯 (Las colinas del Escudo Brasileño)

図Ⅳ-2 ボリビア国の地形分類

3-1-2 調査対象地域の地形

本調査地域は、前述の地形区分のうち、Iアンデス地帯で②高原地帯（Alti Plano）の縁辺部に当たる。

エル・アルト地区周辺の地形は図Ⅳ-3に示すように六つに分けられる。

- (1) 山岳地帯
- (2) 溪谷地帯
- (3) 丘陵地帯
- (4) 山麓地帯
- (5) 扇状地
- (6) 沖積平地（高原平地）

エル・アルト周辺は、その東縁を溪谷地帯により画され、北半分は部分的に山岳地帯、北西部に山麓地帯及び北東部に扇状地が分布する。南半分はその大部分が沖積平地で、南東部の一部に丘陵地帯が分布する。

以下に各地形に対して述べる。

(1) 山岳地帯

アンデス山脈の一部を成し、地区北方に分布する。標高5,000～6,000mの山体が、西北～南東方向に連続する。古生界の堆積岩により形成される。

(2) 溪谷地帯

地区東方で Alti Plano に接して分布する。この地形は Rio Achachicala, Rio Orkolabuira, Rio Lapaz 等の河川が、基盤の軟質な新第三紀ラパス層を侵食して形成されたものである。ラパス市の市街地はこの地形の河川沿の緩傾斜地に存在する。

(3) 丘陵地帯

アンデス山脈の軸と同方向に連続する軸を持つ。本地形は古生層や、新第三紀層により形成されており、部分的にその上位に段丘砂礫が分布する。一般的に周辺の平地との比高は200～300mを有し、山腹傾斜は20～30°と山岳地帯に比較すると緩やかな傾斜を示す。

(4) 山麓地帯

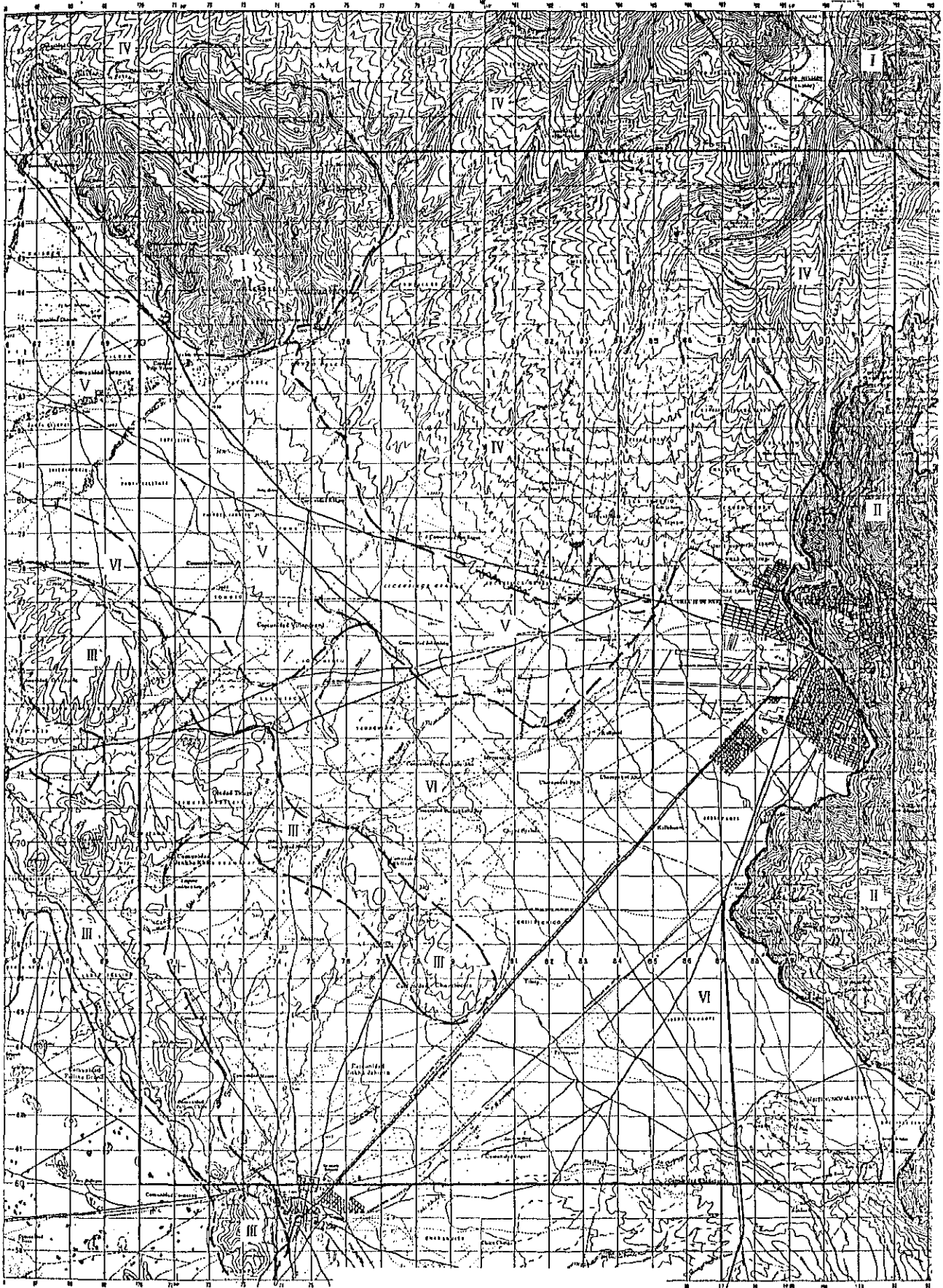
山岳地帯に連続して氷河の運搬堆積物（モレーン）が形成する緩傾斜の山麓地帯が分布する。この部分の斜面勾配は、山岳地帯付近で10°前後、平地に近い末端部で2～3°を示す。

(5) 扇状地

山麓地帯に連続して扇状地が分布する。この部分は砂礫を主体とした扇状地堆積物の分布地域に当たる。この部分の傾斜は1～2°を示し非常に緩勾配である。地形的な位置づけとしては山麓部と平地の中間ゾーンに当たる。

(6) 沖積平地（高原平地）

Alti Plano（高原台地）が大部分を占め、沖積層が堆積する。この部分はほとんど水平である



図Ⅳ—3 エル・アルト周辺の地形分類図

が、北東から南西方向に緩く傾斜し、Viacha ふきんで丘陵地をへだてて傾斜方向を転じ、チチカカ湖に向けて緩く傾斜するようにする。

(7) 河川

調査地区を流れる河川は、東方から Rio Seco, Rio Seque, Rio Solloni, Rio Pampasi 等がある。これらの河川はいずれも北東から南西方向に流下し、Rio Palina に合流してチチカカ湖沿岸の湿地帯へ注ぐ。これらの河川は乾期には涸川となり、山岳に近い部分のみに流水が認められる。雨期にはかなりの流量があると思われるが、Rio Palina に合流するまでに地下浸透する量が多く、中には合流するまでに流路不明となる河川もある。

本地区周辺に存在する河川は、本地区内に分布する各地層が基盤岩類を除いて、砂礫を主体とする透水性の良い地層であるため、地下浸透量が多く、地表水として平地を流下する量はわずかな量であると思われる。

3-2 地質

3-2-1 ボリビア国の地質

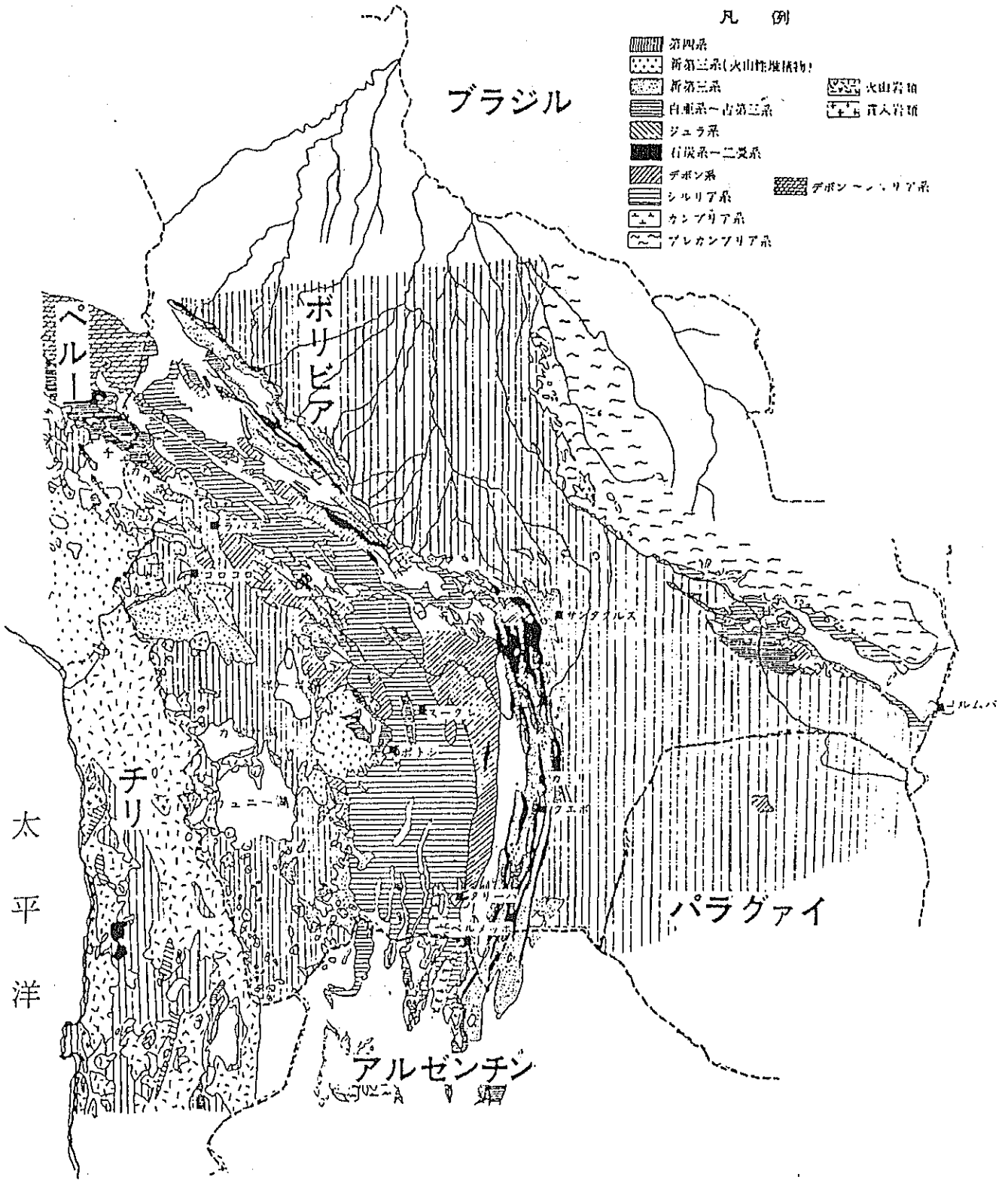
ボリビア国の地質は、アンデス山岳地帯と東側の大平原地帯で著しい差異が認められる。すなわち、東側では基盤にブラジル地塊（ブラジル楯状地）と称する先カンブリア系の岩層が胚胎し、これを覆って新第三系及び第四系の地層が広く発達しているが、西側山岳地帯では、古生界の地層がきわめて広く発達して、東アンデスの骨子をなしており、アルチプラーノは新生界の第三系及び第四系の分布地域となっている。古生界で最も発達しているのがデボン系で、そのほか各地にカンブリア系・オルドヴィス系・シルル系・二疊石炭系・二疊系の地層が見られ、中生界では北部地区に白亜系のみが露出している。

火成岩としては、東アンデスの西側に沿って第三紀中新期～鮮新期の貫入と思われる花崗岩・流紋岩・石英安山岩等の酸性岩類が多く、アルチプラーノでは石英安山岩・玄武岩その他の安山岩類の侵入が見られ、西アンデスの大部分は、第三紀末もしくは第四紀の各種安山岩類によって構成されている。

ボリビア国の地質図をⅣ-4に示す。

ボリビアのアンデス地域における造構運動としては、二疊期末に小造山運動があったが、地質変動はほとんどなく、その後第三紀初めに古生界の隆起運動が行われ、同紀末に第1回・第2回の大造構運動が相次いで起こり、これに伴われて岩漿活動も活発となり、さらに各種金属鉱床をもたらしている。

調査地区を含むアルチプラーノ（高原台地）地域では、古生界のシルル系やデボン系を基盤とし、古生界が形成した堆積盆地に新第三系の碎屑物質が堆積している。更にこれらの上位には、氷河期の融氷流水堆積作用による砂礫層が広く分布しており、アルチプラーノ中央部では氷河期末期に排水口のない湖が形成され湖成堆積物が堆積した。



図Ⅳ-4 ボリビア国の地質図

3-2-2 調査対象地域の地質

エル・アルト周辺の地質図を図Ⅳ-5に示す。(十万分の一地質図「ラパス」(ボリビア国, 鉱山・石油省, ボリビア地質調査所)より抜粋)また, 図Ⅳ-5に基づいて作成した模式地質断面図を図Ⅳ-6に示す。表Ⅳ-1にエル・アルト地区の地質層序を示す。

表Ⅳ-1 エル・アルト地区地質層序表

地質時代		地層名	岩相・岩質	
新 生 代	第 四 紀	完 新 世	沖積層	粘土, 砂, 礫
		}	崖錐堆積層	斜面崩壊物, 砂, 砂礫
			現河床堆積層	粘土, 砂, 砂礫
			段丘堆積層	砂礫, 岩塊
			扇状地堆積層	粘土, 砂, 砂礫
			第Ⅳ氷河堆積層	氷河粘土, 砂礫
			第Ⅲ間氷期礫層	砂礫, 黄土混り
		新 世	第Ⅲ氷河堆積層	氷河粘土, 砂礫
	氷河一河成末区分層		粘土, 砂, 砂礫	
第 三 紀	鮮 新 世	ラパス層	粘土, 砂, 礫 (主に花崗岩礫)	
古 生 代	デボン紀 } シルル紀	デボン系	泥岩, 珪岩	
		シルル系	粘板岩	

本地区における各層の概要を, 古い地質から述べる。

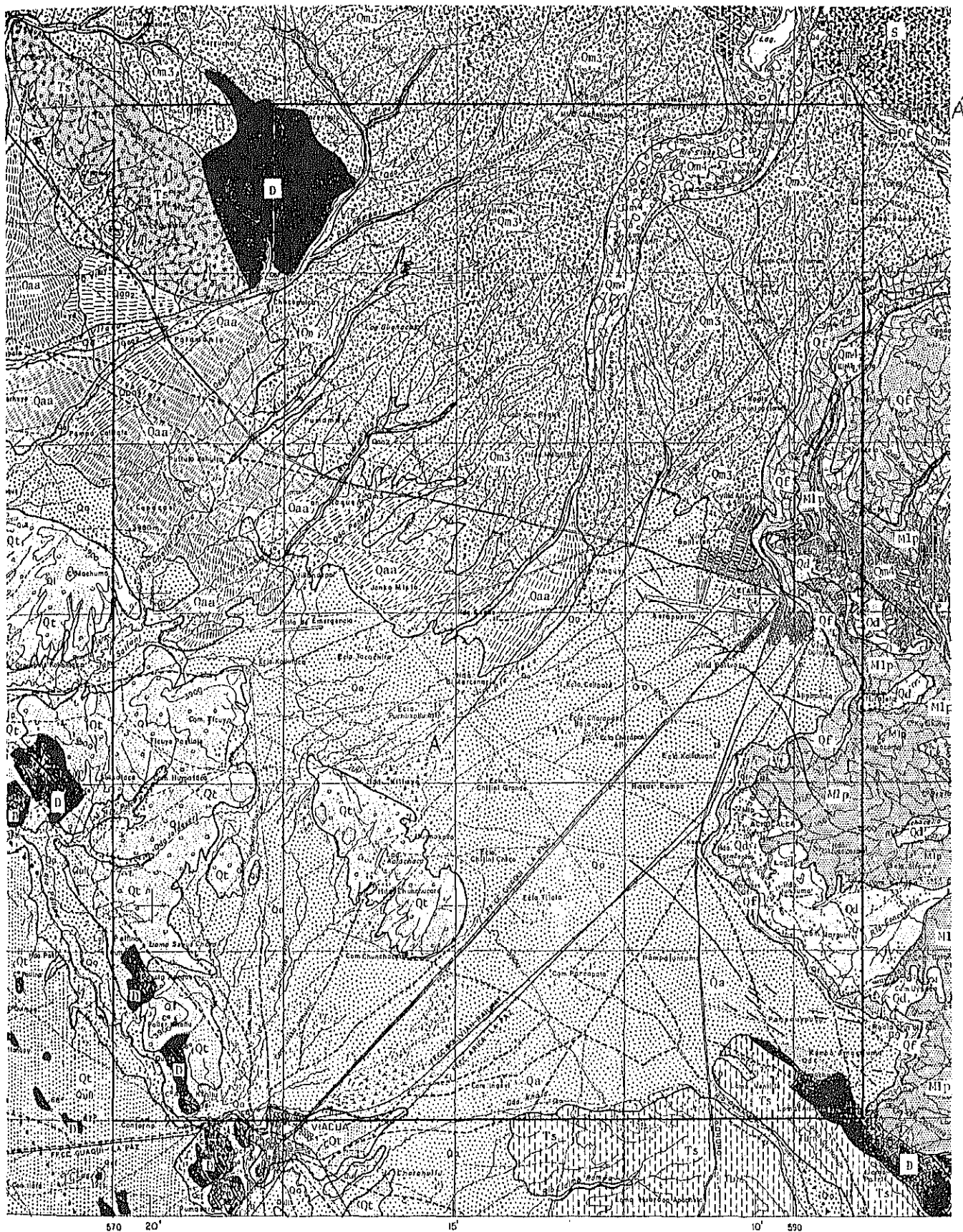
(1) 古生層

エル・アルト地区を含むアルチプラーノの基盤を成す地層で, 地区北東部はシルル系その他の部分ではデボン系の地層が分布している。シルル系はアンデス山脈の一部として露出しており, 概ね粘板岩から成る。デボン系は主として背斜構造の軸部が, 残丘状に北西から南東方向に連続して露出しており, 泥岩や珪岩等から成る。(写真Ⅳ-4)

(2) 新第三紀層

上記の基盤岩が形成した堆積盆には, 新第三系の地層が堆積している。調査地区内では主として鮮新世のラパス層が分布するが, 地区外ではアランジェス層・コニリ層・ウマラ層等が分布する。これらはいずれも古生層が形成する山岳地帯からの碎屑物により構成されており, 凝灰岩層を挟在する。調査地に主として分布するラパス層は, ラパス市周辺の渓谷地帯に露出しており, 固結度の低い粘土・ローム・砂・礫の互層から成り, ガラス質凝灰岩を挟む。全般に細粒分に富み, 難透水層の占める割合が多い。

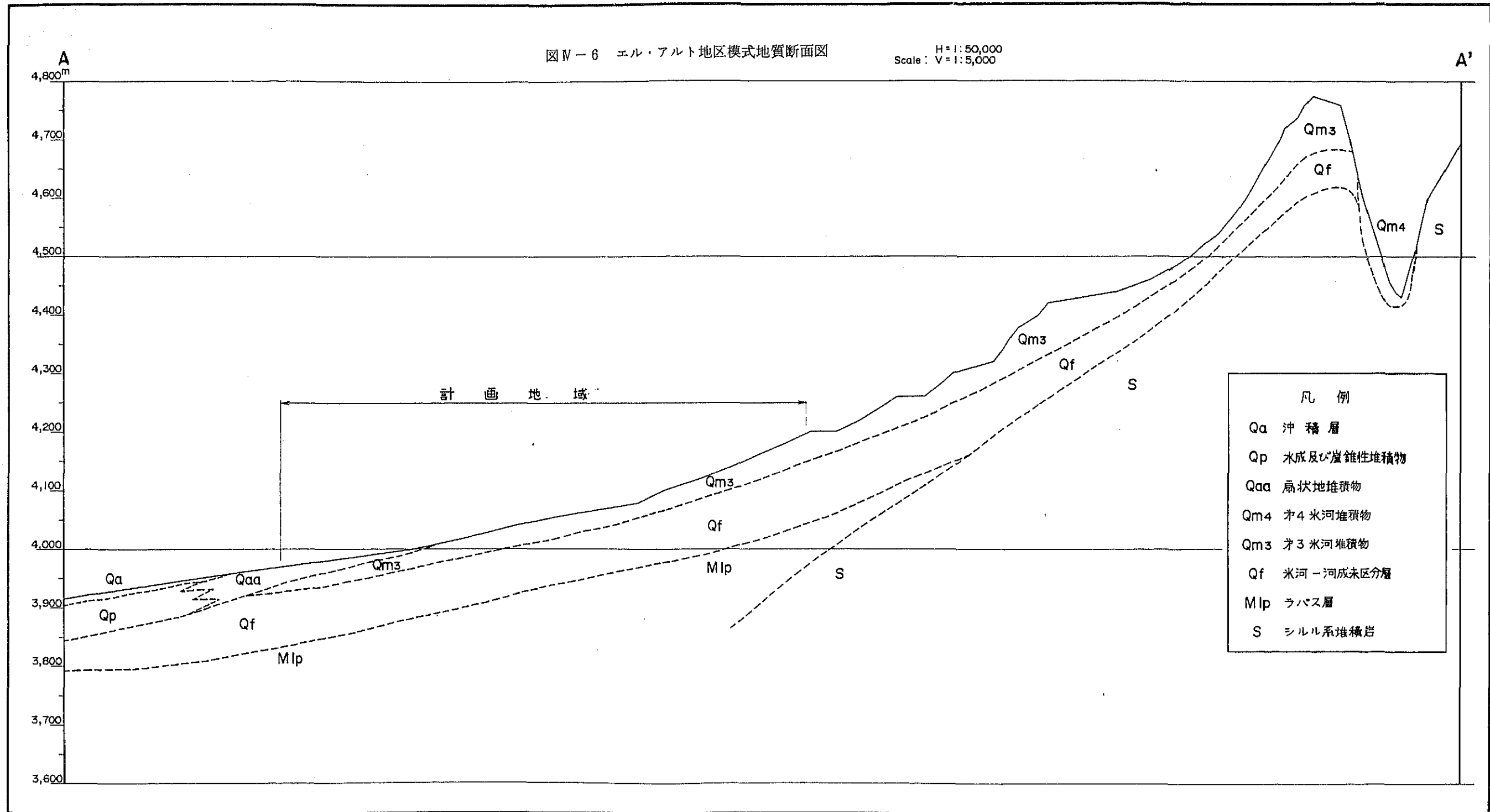
(3) 第四紀層 (更新世)



図IV-5 エル・アルト周辺地質図

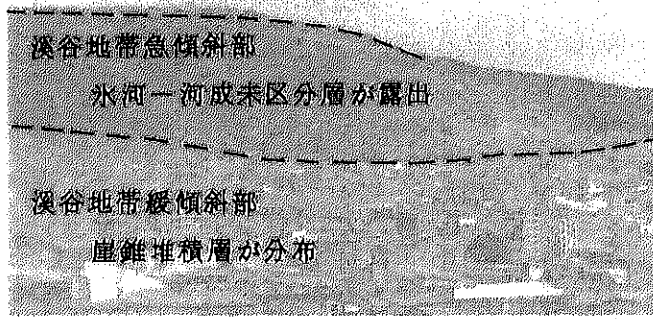
図Ⅳ-6 エル・アルト地区模式地質断面図

H=1:50,000
Scale: V=1:5,000



- 凡例
- Qa 沖積層
 - Qp 水成及び崖錐性堆積物
 - Qaa 扇状地堆積物
 - Qm4 オ4米河堆積物
 - Qm3 オ3米河堆積物
 - Qf 米河-河成未区分層
 - Mlp ラバス層
 - S シルル系堆積岩

上面はアルチプレーノ

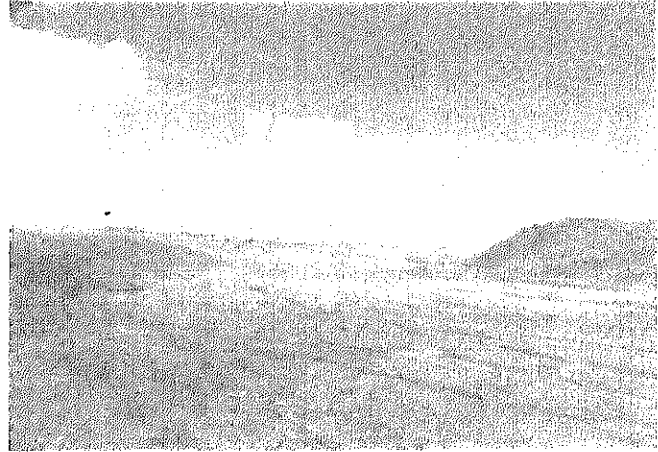


写真Ⅱ-1

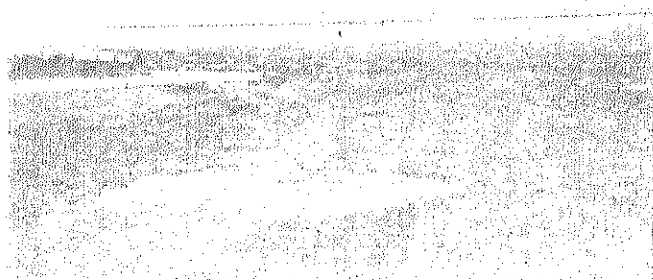
上流部より、RIO Secoの谷を流るる水

写真Ⅱ-2

RIO Secoの上流部山岳地帯との境を
下流へからも流水が見られる。



写真Ⅱ-3

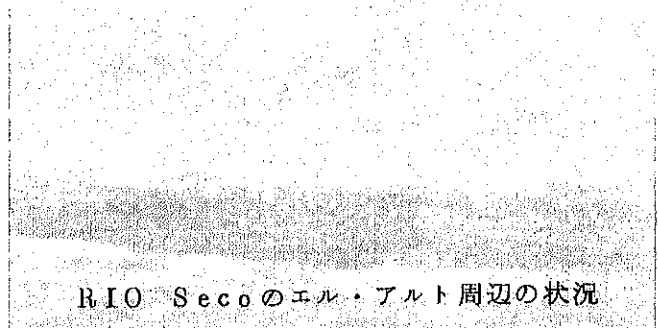


写真Ⅱ-3

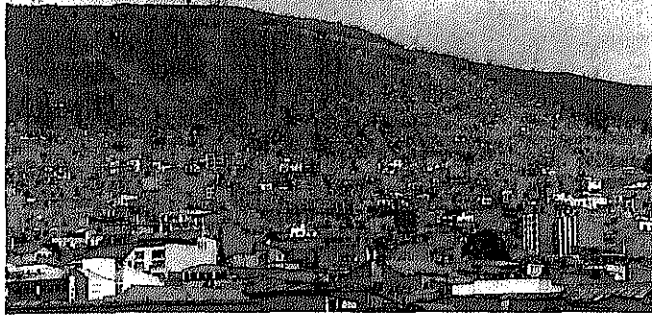
河幅も上流部より狭く、溜り水は見られ
るものの漏水は存在しない。

写真Ⅱ-4

RIO Secoの西方に山岳地帯との境
が残丘状に露出する。



RIO Secoのエル・アルト周辺の状況

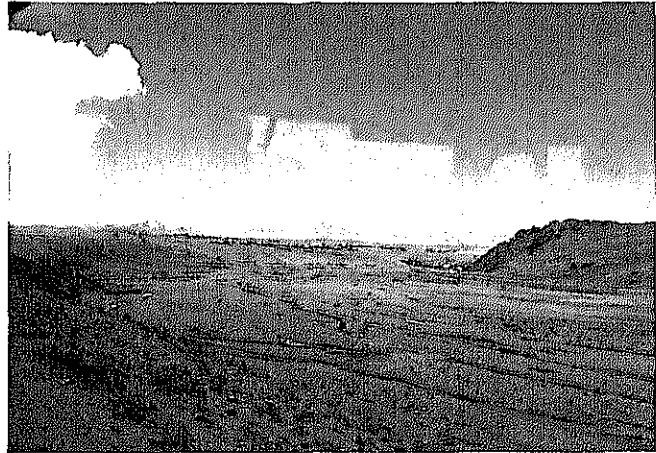


写真Ⅳ-1

ラパス市内から、エル・アルト空港方面を仰ぐ

写真Ⅳ-2

RIO Secoの上流部山岳地帯との境界付近、細いながらも流水が見られる。



写真Ⅳ-3

河幅も上流部より狭く、溜り水は見られるものの流水は存在しない。

写真Ⅳ-4

地区外 Lajaの西方 古生代デボン紀の泥岩が残丘状に露出する。



これらの第三紀層の上位は、第四紀更新世氷河期の氷河堆石物や融氷流水堆積物が分布し、本地区の地形の原形を形成する。本地区周辺において明瞭な氷河による堆積物は、第三氷期堆積物と第四氷期堆積物のみで、最下部には氷河―河成未区分層として第三氷期以前の堆積物が分布している。これらの堆積状況は図Ⅳ－6に示したように考えられる。

最下部の氷河―河成未区分層は、北東部山岳地帯に起源し、調査地区北東半分に分布するものと思われる。本層は円礫を主体とした砂礫層（写真Ⅳ－7参照）と、燐灰層及び粘土層（写真Ⅳ－5，6参照）の互層であり、砂礫層部分は帯水層を形成する。

第三氷期堆積物は、その堆積状況から融氷流水堆積物と考えられ、粘土、砂、砂礫等から成る。本層も山岳地帯を起源とし、エル・アルト空港周辺まで分布するものと考えられる。

第四氷期堆積物は、Rio Seco 及び Rio Kaluyo の兩岸部に分布しており、その分布状況から氷河堆積物と考えられる。この氷河堆積物は現在の河川の山岳地帯からの流出口を形成している。本層は氷河粘土や砂礫層から成り、本地区周辺での分布は現在の河川沿いに限られている。

第四紀更新世の堆積物としては上述の氷河堆積物以外に、山麓地帯に連続する扇状地堆積物と、アルチプレーノ中央部付近に分布する段丘堆積物がある。

扇状地堆積物は、第三氷期堆積物が形成する山麓地帯に連続して分布する。本層は雨期の地表水により運搬堆積された粘土、砂、砂礫であり、山麓地帯の末端からエル・アルト付近まで分布していると思われる。

段丘堆積物は、アルチプレーノ中央部の古生層の分布地域に沿って分布している。本層は元来河川運搬物と考えられ、砂礫、岩塊等から成る。

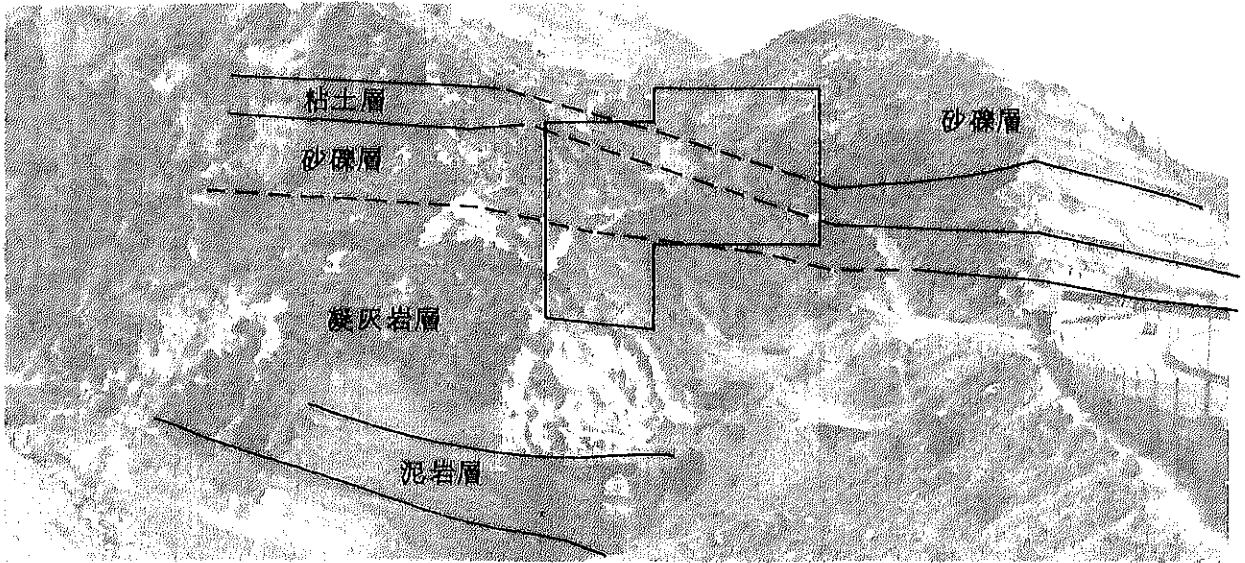
(4) 第四紀層（完新世）

本地区の最上位には第四紀完新世の堆積物である現河床堆積物、斜面の崩壊堆積物である崖錐堆積物及び水成又は崖錐性堆積物から成る沖積層が分布する。

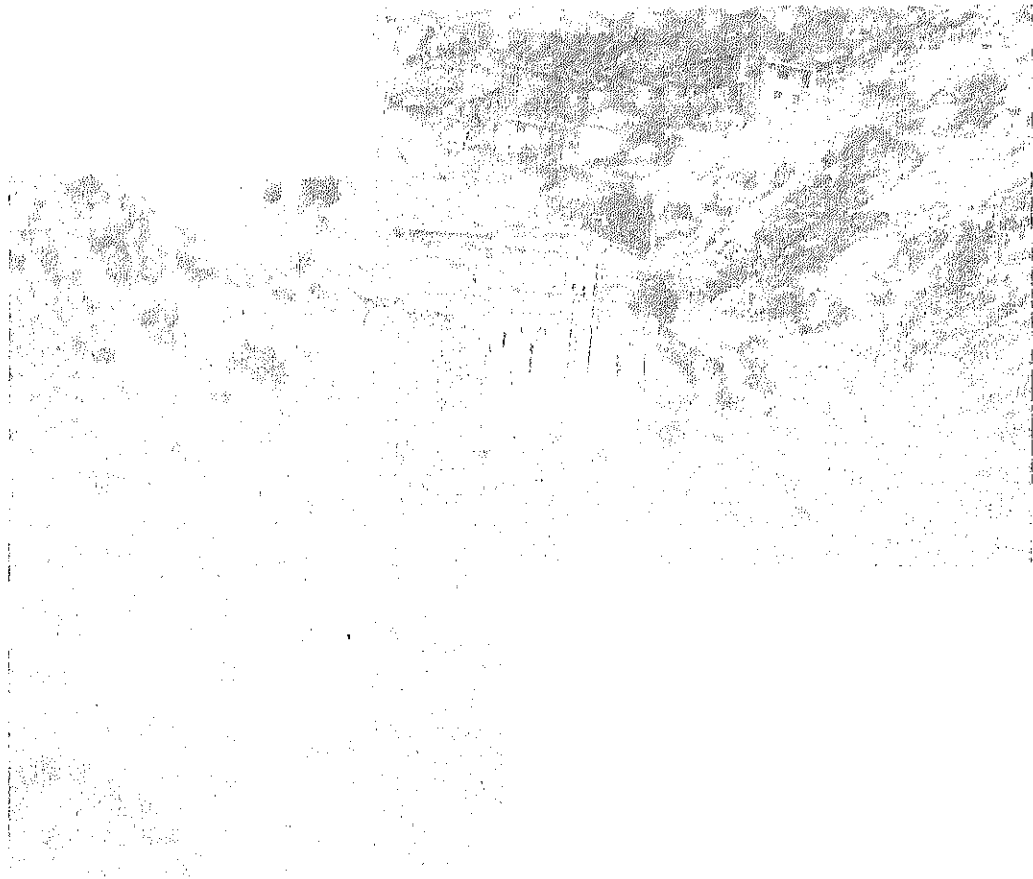
現河床堆積物は、河川の河床部に分布するもので、粘土・砂・砂礫等から成る。

崖錐堆積物は、急斜面の下部に分布しており、砂、砂礫等から成る。

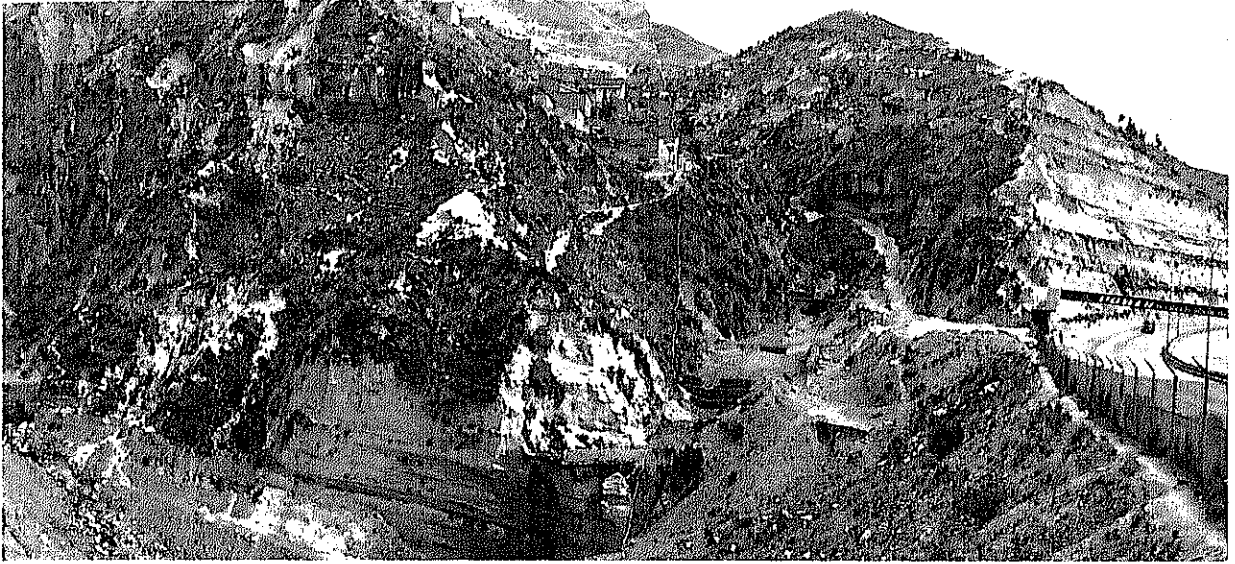
沖積層は、アルチプレーノの平坦部分に広く分布しており、水成堆積物や崖錐性堆積物が入り混った地層であり、砂、砂礫、粘土等から成る。



写真Ⅳ-5 山崎山麓からア・アルトに向う有料道路途中の水河一河成未区分層
中位の地層以下の写真部分、この写真の民家は産て違法建築



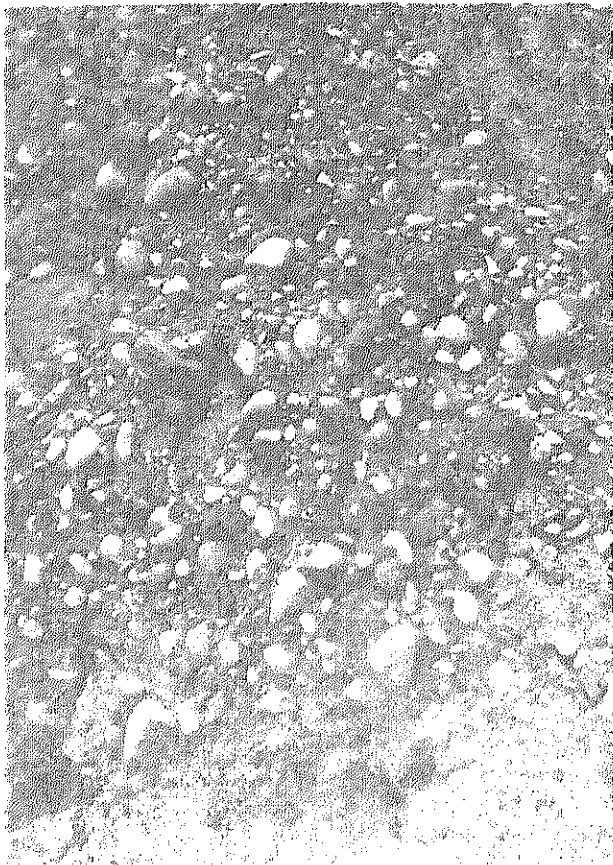
写真Ⅳ-6 山の湧水を利用する住民、炭灰岩層を築き上げて砂礫層を溜水層としている。



写真Ⅳ－5 ラパス市からエル・アルトに向う有料道路途中の氷河－河成未区分層
中央のワクは下の写真部分，この写真の民家は総て違法建築



写真Ⅳ－6 山腹の湧水を利用する住民，凝灰岩層を不透水層として砂礫層を滞水層としている。

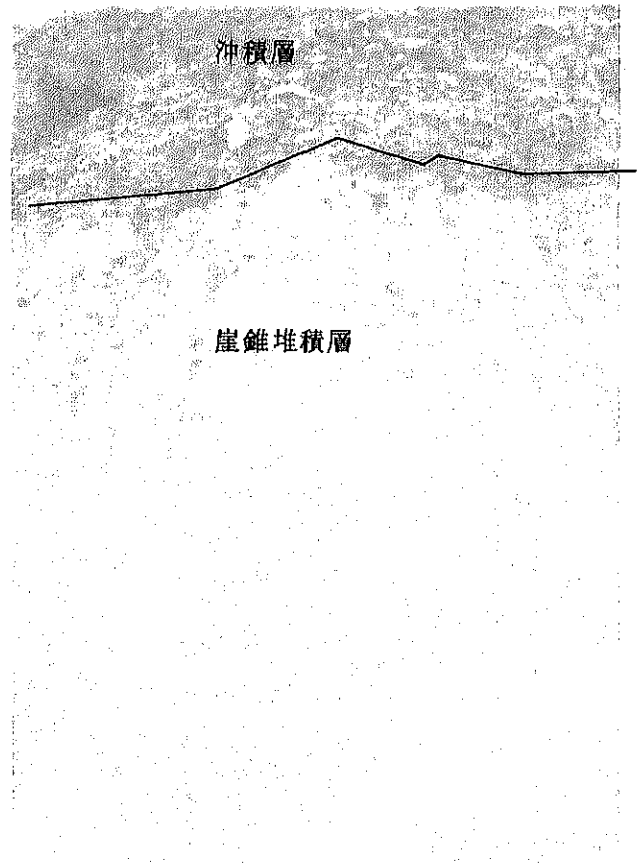


写真Ⅳ-8

本料道路ユル・ゾル土質の土質分析資料から、最上位の露頭
 ユルゾル土最上段は、写真Ⅳ-8の土質を水成～崖錐
 に堆積物が崖錐に堆積したものと推定される。

写真Ⅳ-7

水河一河成土の土質分析資料から、最上位の露頭
 礫種は花崗岩が大部分で、土質は写真Ⅳ-8の土質と
 写真Ⅳ-5の帯水層と重なっている。この土質は、写真Ⅳ-8
 土質に当る。





写真Ⅳ-7

氷河一河成未区分層の砂礫層

礫種は花崗岩が大部分でマトリックスは砂～粘性土
写真Ⅳ-5の帯水層となっている砂礫層と同一層
準に当る。

写真Ⅳ-8

有料道路エル・アルト側出口付近のアルチプレー
ノ最上位の露頭

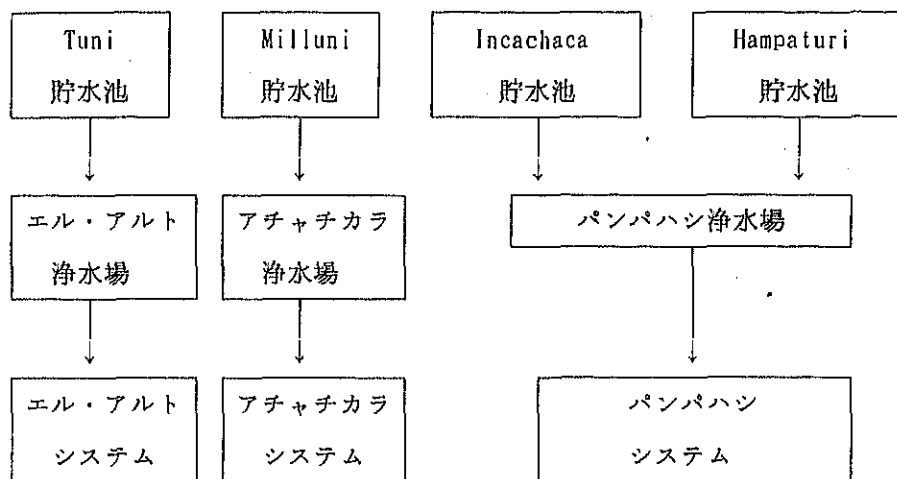
アルチプレーノ最上面は、このような水成～崖錐
性堆積物が複雑に堆積しているものと思われる。



4. 給水体制

4-1 給水一般

ラパス市およびエル・アルト地区の現在の給水はSAMAPA（上下水道公社）により実施されている。ラパス市の給水システムは三つに分かれており、その水源はいずれも地表水を貯水したダムから得られている。その三つのシステムは、エル・アルト、アチャチカラ、パンパハンであり、それぞれ次のような水源および浄水場を持っている。



これらのシステムのうち、本調査の対象地域に関連するものは、エル・アルトシステムである。他の二つのシステムは、ラパス市に属する。

エル・アルトシステムにおける給水は、約3.5k m³の範囲にわたり実施されている。給水サービスの範囲外では、個別に掘削された井戸や湧水により飲料水を得ている。また、給水車による給水も行われている。

以上のようなエル・アルト地区の現状に対して、水源開発および給水施設の整備が要求されているが、ボリビア国の経済状態からみて、早急には実施できない現状にある。

4-2 給水実施体制

エル・アルト地区をも含めたラパス市での給水実施機関は、ラパス市長の統括の基にあるSAMAPA (Servicio Autonomo Municipal de Agua Potable y Alcantarillado)；首都圏水道・下水道公社である。SAMAPAは1966年の政令により創立されており、制度的にはラパス市に属しているが、実質的には経営・業務は独立し、独自の権限を有している。運営は、ラパス市長、住宅省、監査院、技術者協会からなる理事会により行われ、理事長は市長である。

SAMAPAの主な業務は、飲料水の供給、水道料金の決定と収集、施設の建設等水源から住宅のメーターまでを対象とするが、メーター設置などの工事費は、住民の負担となる。

SAMAPAは、水道料金によって運営されているが、その料金は政策によって極端に抑制されているので、1982年以来継続的な財政欠陥となっている。(立方メートルあたり1,200,000ペソ、約100円、東

京都の水道料金120—375円)

4-3 給水計画

ラバス市は、1965年に給水計画のマスタープランをボリビア政府に提出した。このプランは、1985年までの飲料水供給計画を目的としていた。これをうけて、西ドイツ政府（KFWドイツ復興金融金庫）は第一段階の設計・施工を1966年—1971年にかけて行い、さらに第二段階、第一期の設計・施工を1974年—1980年にかけて行った。第二段階、第二期の設計・施工は、1980年—1985年の計画で国際開発協会（第二世銀）と石油輸出機構（OPEC）の資金により実施されている。

KFWが出資した第一段階及び第二段階、第一期の金額は20.5百万DMおよび49.0百万DMである。また、第二段階、第二期の第二世銀およびOPECの出資金は、23百万US\$と60万US\$である。

第一段階の設計・施工の概要は次のとおりである。

- ☆ アチャチカラ浄水場のリハビリテーション
- ☆ パンパハン浄水場の新設
- ☆ Milluni 水源のエル・アルト地区への利用
- ☆ 導水路の新設及び拡張

第二段階、第一期の設計・施工の概要は次のとおりである。

- ☆ エル・アルト浄水場の新設
- ☆ 導水路の新設および拡張

第二段階、第二期の計画は次のとおりである。

- ☆ アチャチカラ浄水場の拡張
- ☆ 貯水池類の拡張および新設
- ☆ 導水路の新設および拡張

調査・計画された供給量と受益人口は次のとおりである。

	1975年	1985年	2000年
人 口	636,000	875,000	1,210,000
供 給 量 (mcm/ann)	32.75	57.78	100.43

利用される水資源は、将来とも表流水が想定されている。2000年の目標達成時の水価は、1 m³当たり0.34ドイツマルクで、工事費の85%はクレジットを予定している。ラバス市の給水施設は、すでに拡張が必要とされているが、その資金の手立てはついていない。

第二段階、第三期の計画では、エル・アルト地区の下水道施設の調査が実施されている。

4-4 給水の現状

ラバス市の給水は、前述したように三つのシステムにより実施されている。これらのシステムに共通していることは、乾季の日常的な断水である。とくに、エル・アルト地区では、Tuni 貯水池

からパイプにより導水されているが、近年の人口増加による需要量の増加が供給量を上回るようになった。今後もこの地区の人口増加は継続する見込みで、現在の24万人は、2010年には80万人に達することが見込まれている。

近くに分布する表流水については、ほとんどがすでに利用されており、新たな開発の余地は少なく、資金の準備状態からも困難が予想されている。

三つに分かれたシステムの現況を示すと図のようになる。(図Ⅳ-7) これら三つのシステムでの給水率は80%程度と推定されているが、サービスレベルは共同栓を含んだものとなっている。一人当たりの給水量は、160 lit/day と報告されている。しかし、エル・アルト地区での給水量は一人当たり120 lit と他のシステムに比べて少ない。

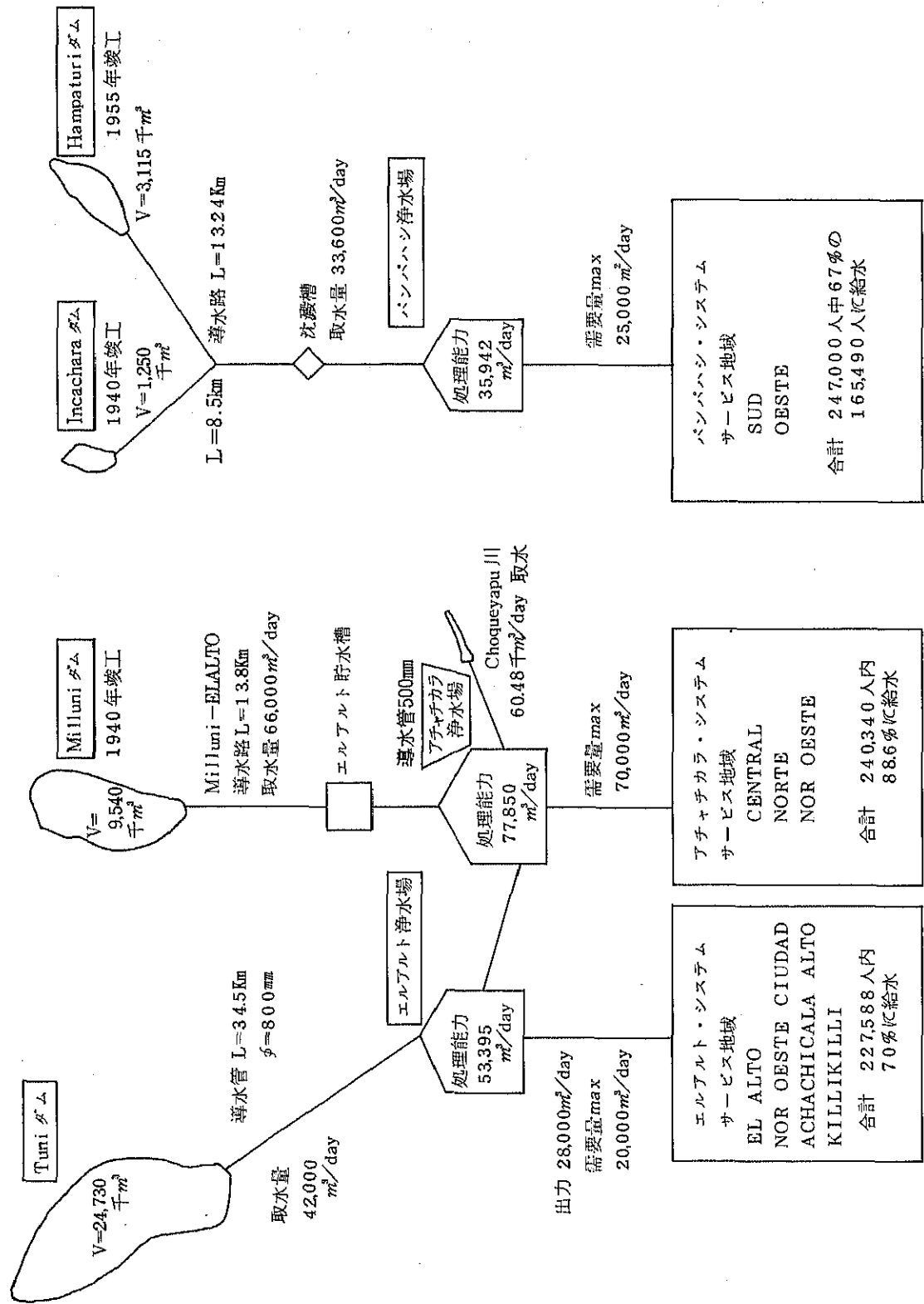
これらの給水システムで大きな問題となっているのは水源の水質である。山地から流出する表流水の水質そのものは極めて良好であるが、山地に分布する鉱山の精練所から出る排水が、極めて強い酸性を呈しており (PH 2 - 3)、この排水が水源に流れ込み水質を酸性化している。とくに、ラパス市の水源となる Milluni ダムの周辺には錫の鉱山が分布しており、酸性化した排水をダムに流入させている。このため、浄水場では大量の石灰を投入してこれを中和させている。

エル・アルト地区の水源となっている Tuni ダムの水質は良好であるが、この水源を乾季にラパス市のシステムに補充するため、Milluni 水源の水と混ぜる必要があるので、エル・アルト浄水場ではあらかじめ石灰を投入し、PH 9 前後の水をエル・アルト地区に給水している。

下水道については、ラパス市にのみ下水道管が敷設されているが敷設率は都市化されている 39 km²のうち約50%である。しかし、これらの下水道の水は、処理されずに排水されている。

エル・アルト地区には下水道施設は存在しない。

図 V-7 SAMAPA 給水システム概要図 (1984 年現在)



V 地 下 水

1. 既往の地下水調査

調査対象地域となるエル・アルト地区をも含めた高原台地（ALTIPLANO）、ラパス市周辺での地下水に関する調査は、ボリビア地質調査所（GEOBOL）と、ラパス市の2つの機関により実施されている。

ボリビア地質調査所は、UNDP（国連開発計画）の協力を得て、北部高原台地とオルロ（ORURO）の地下水資源についての調査を行い、1973年に「LOS RECURSOS DE AGUA DEL ALTIPLANO NORTE Y DEL AREA DE ORURO」を刊行している。この報告書は、高原台地を6つの地下水盆地に区分して、各々についての地形、地質、水質、地下水について記述がなされ、とくに地下水については帯水層の性質、地下水挙動、広域水収支等についての記述に努力が払われている。

ラパス市による地下水調査は、フランス地質調査所（BRGM）の協力を得て、全16巻にわたるラパス市及びその周辺の地質環境についての報告書を1977年に刊行している。（表V-1参照）この報告書に記述されている地下水に関する調査結果は、前述したUNDPの報告書と重複する部分が多いが、地形発達史や、ラパス市周辺の地すべりや斜面崩壊に関する調査についてはすぐれた内容をもっている。

このほか、1965年にUNDPによる高原台地の水文地質調査報告書が刊行されている。

2. 水文・気象環境

エル・アルト地区を含む北部高原台地は、チチカカ湖に流出する河川系流域に属している。これらの河川系は、「図V-1、ALTI PLANO 地域地下水ポテンシャル線図」に示したように、西部より Khullu Cachi, Sehuena, Huancane, Pamasí, Seco の河川が北部山地から南西方向に流出している。これらの河川のほとんどは、その下流部で北西方向に流れる Rio Catari に合流して、チチカカ湖に流出している。すなわち、高原台地の水文状況は、次に述べる特徴を持っている。

・ 北方山地から南西方向に向かう水系

河川は、山地の氷河、万年雪の融水や降雨より供給され、通年にて流量を保っている。しかし、平野部に入ると表流水は地下に伏流して涸沢となる。

・ 北西方向に向かう水系

河川の方法は、第三紀層や古生層の地質構造に規制されている。河川は、降水や地下水により供給され、通年して流出している。

エル・アルト地区の給水水源となっている Tuni 貯水池での河川流出量と降水量を示すと図V-2の様になる。また、エル・アルト及び北部山地の Milluni, Tuni, Condoriri 貯水池で観測された降水量を表V-2に示した。

LISTA DE LOS INFORMES DIRIGIDOS POR EL BUREAU DE RECHERCHES
GEOLOGIQUES ET MINIERES CON LA COLABORACION DE LA HONORABLE

ALCALDIA MUNICIPAL DE LA PAZ

Y DE PRUDENCIO, CLAROS Y ASOCIADOS

ESTUDIO ECOGEOLOGICO DE LA CUENCA DE LA PAZ Y SUS ALREDEDORES

- 1 Presentación general del trabajo
- 2 Cuadro geológico general
- 3 Síntesis fotogeológica de la cuenca de La Paz y alrededores
- 4 Investigación geofísica por sondeos electricos. Zona del Altiplano entre Viacha y las cuencas de La Paz y Achocalla
- 5 Características litoestratigráficas de la cuenca de La Paz y alrededores
- 6 Características geomorfológicas de la cuenca de La Paz y alrededores
- 7 Neotectónica y sismicidad de la región de La Paz
- 8 Características climatológicas de la cuenca de La Paz
- 9 Condiciones hidrológicas de la cuenca de La Paz
- 10 Vegetación de la cuenca de La Paz y alrededores
- 11 Características hidrogeológicas de la región de La Paz (I)
- 12 Características hidrogeológicas de la región de La Paz (II)
- 13 Riesgos naturales encontrados en la cuenca de La Paz y sus alrededores
- 14 Los Suelos de la ciudad de La Paz. Características geotécnicas
- 15 Características geotécnicas de la cuenca de La Paz y sus alrededores
- 16 Aplicaciones del mapa de constructibilidad en la cuenca de La Paz y sus alrededores

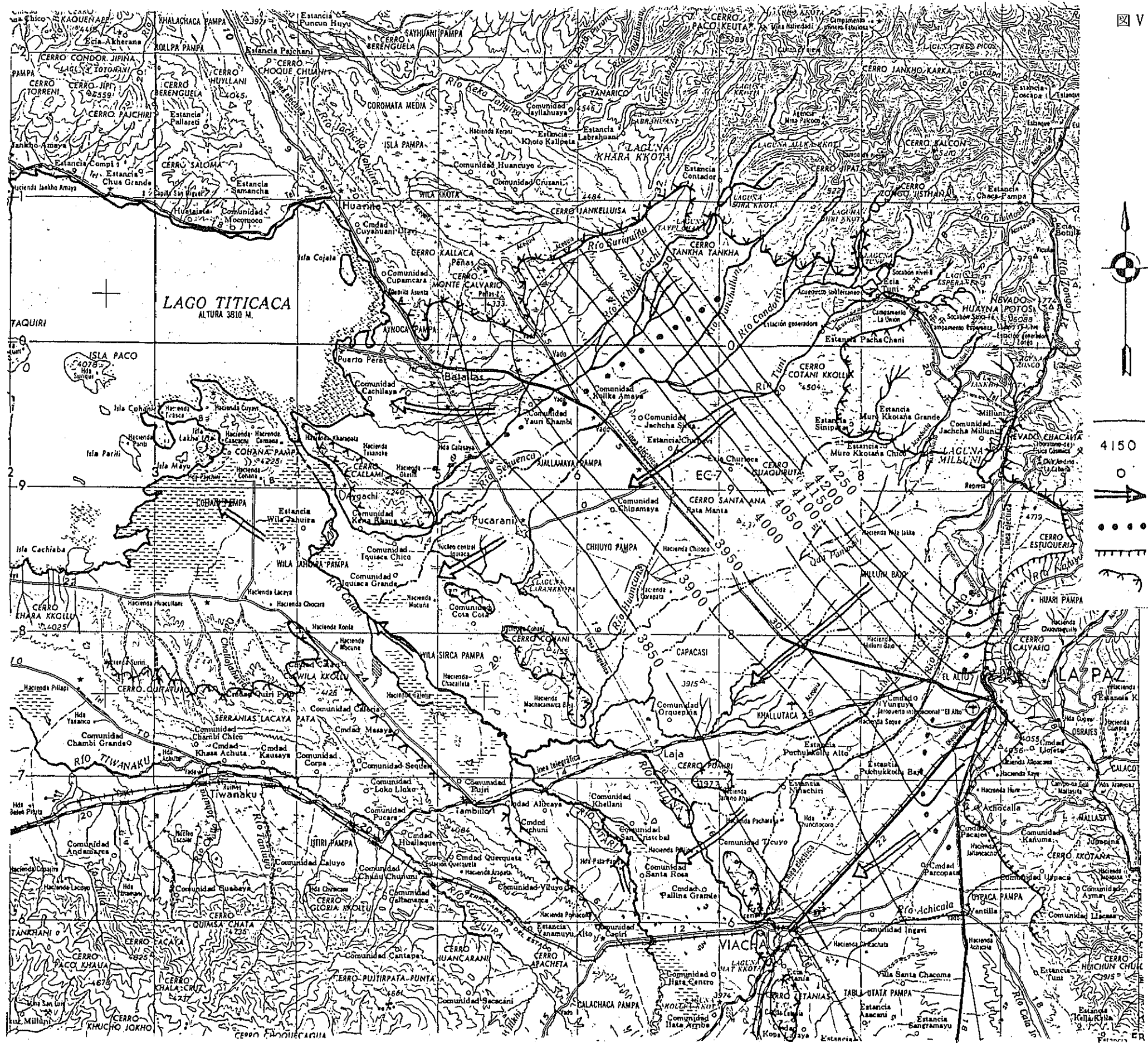
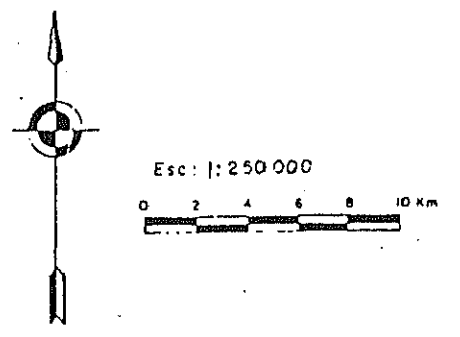


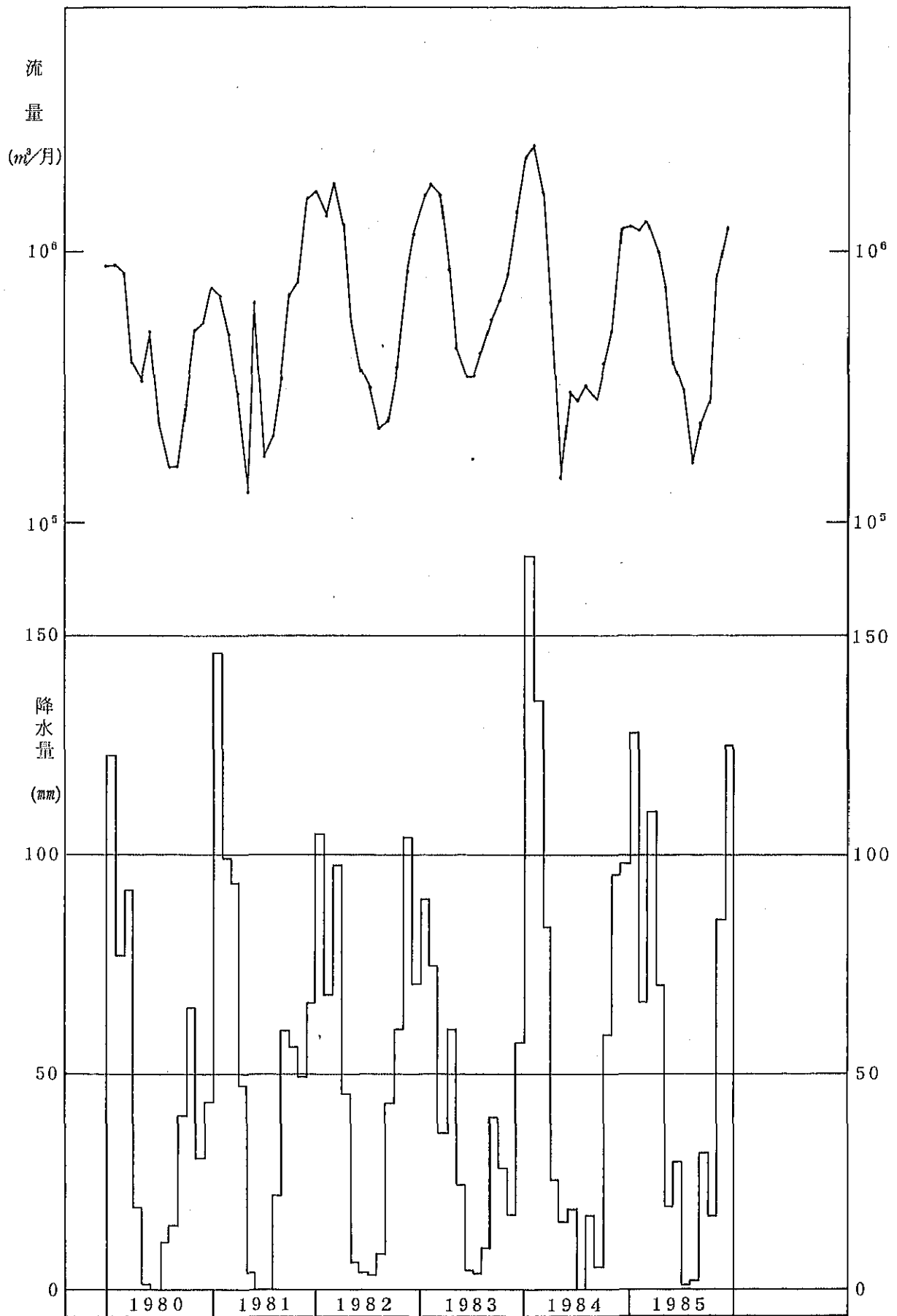
図 V-1 ALTI PLANO 地域
地下水ポテンシャル線図



- 地下水等ポテンシャル線
- 地下水位 (海拔 m)
- 地下水流動方向
- 地下水嶺
- ||||| 地形境界 (急崖)
- ▬ 不透水性基盤

(GEOBOL-UNDP, 1972 より作成)

図 V-2 TUNI 観測所の降水量, 流出量図 (1980~1985)



(SAMAPA 観測資料より作成)

表V-2 エルアルト地区周辺降水量(1985年)

(単位 mm)

観測所名	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	年合計
EL ALTO	156.6	52.1	47.2	77.5	2.2	12.7	0	0	53.0	21.5	105.8	143.6	672.2
MILLONI	355.0	224.3	345.6	255.6	68.0	70.2	0	9.3	61.5	63.8	166.5	131.6	1,751.4
TUNI	128.0	69.0	109.6	67.0	19.0	29.3	0.8	2.0	31.5	16.2	85.0	125.0	682.4
CONDORIRI	39.2	83.4	119.3	88.3	14.3	43.9	0	0	51.0	19.1	106.6	149.2	714.3

(SAMAPAの資料による)

Tuni 貯水池での河川流量は、降水の年変動に連動しているが、無降水月たる7～8月にも10万 m³/月以上の流出がみられ、氷河、万年雪の流出に対する貢献を認めることができる。上記3つの貯水池で、蒸発量の観測も SAMAPA により行われている。これによれば、月毎の蒸発量の変動は大きくなく、100～130mm/月、3～4 mm/日の値が得られている。(巻末資料参照)

高原台地の降水量は、一般に北部で多く南部に向かうにしたがい少なくなる。すなわち、北部山地では700mm/年以上、南部では550mm/年前後となる。

3. 帯水層

3-1 水文地質構造

エル・アルト地区周辺の地質については、前章で述べられているが、水文地質的観点からこれらを記述すると、次のようになる。(第Ⅳ章表Ⅳ-1 地質層序表及び図Ⅳ-5 地質図参照)

エル・アルト地区を含む北部高原台地は、北方に標高5,000～6,000mからなる古生層の山脈が連なり、南方には Laja-Viacha の町の南に4,000m前後の小山脈が分布している。これらの山脈は、いずれも北西-南東方向に延長方向をもっている。高原台地の地下水盆は、この2つの山脈に挟まれた地域に位置している。

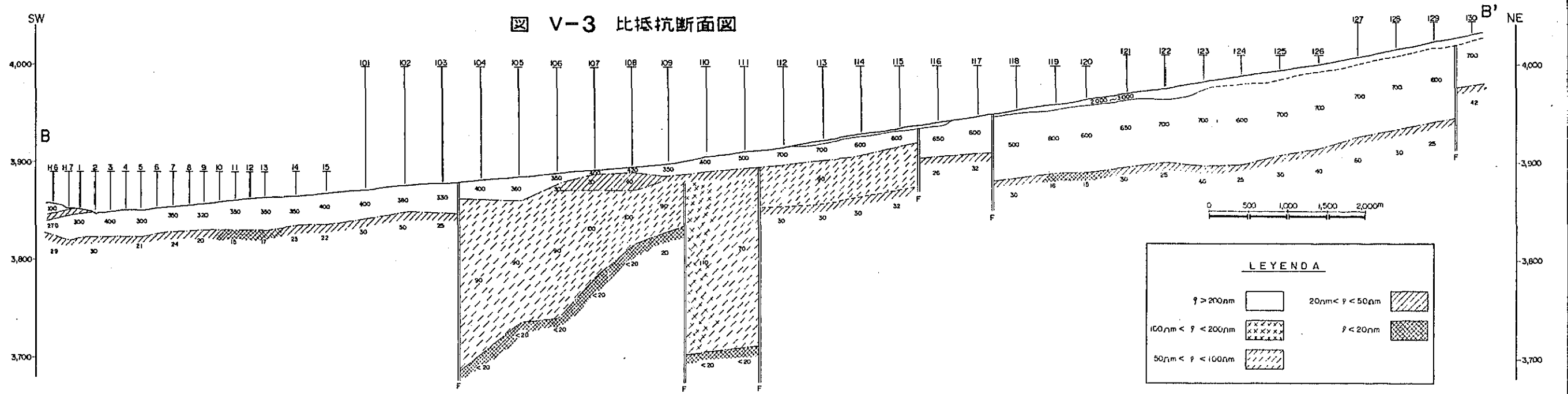
高原台地の地下水盆の不透水性基盤は、前述した2つの山脈に分布する古生代シルル紀の粘板岩類および、これらを被覆する第三紀層である。高原台地地下でのこれらの不透水層の形状は電気探査やボーリングにより概略が把握されている。これらによれば、不透水性基盤までの深度は150～200mである。(図Ⅴ-3 比抵抗断面図、Ⅴ-4 ボーリング柱状一覧図参照)

高原台地に発達する帯水層は、第四紀に発達した氷河によりもたらされたモレーン、融氷流水堆積物 (fluvio-glacial deposit) 等からなる氷河成堆積物である。これらの堆積物は、わずかに分級現象や偽層理が認められるが、全体として細粒物質 (粘土、氷河岩粉) と礫 (大小の円～歪円礫) が雑然とまじった岩相を呈している。このため、地層の透水性は、水平・垂直的に変化がいちじるしいものと推定することができる。地質層序表では、これらの地層を第Ⅳ氷河堆積層、第Ⅲ間氷期礫層、第Ⅲ氷河堆積層、氷成-融氷流水未区分層とに区分されているが、地下水盆にはこれらが連続して堆積しており、あまねく地下水を飽和させていることから、高原台地の帯水層は、これら地層を一括したものと考えるのが適当である。すなわち、これら地層に賦存する地下水は、水文的には連続した単一帯水層に賦存する地下水と考えるのが妥当である。

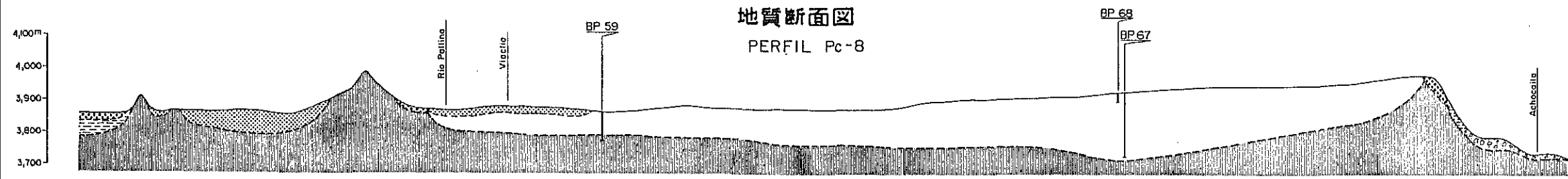
この帯水層に賦存する地下水は、台地の北部では、自由地下水の形態をとるが、南部の Viacha 付近では被圧状態となっている。

これは、チチカカ湖からバタラス、カタリ、チワナク等の河沿いに広がって形成された古チチカカ湖 (Ballivian 湖) に堆積した湖成層に含まれる粘土層が、賦圧層の働きをして、北方から流出する自由地下水を被圧させているためである。

图 V-3 比抵抗断面图

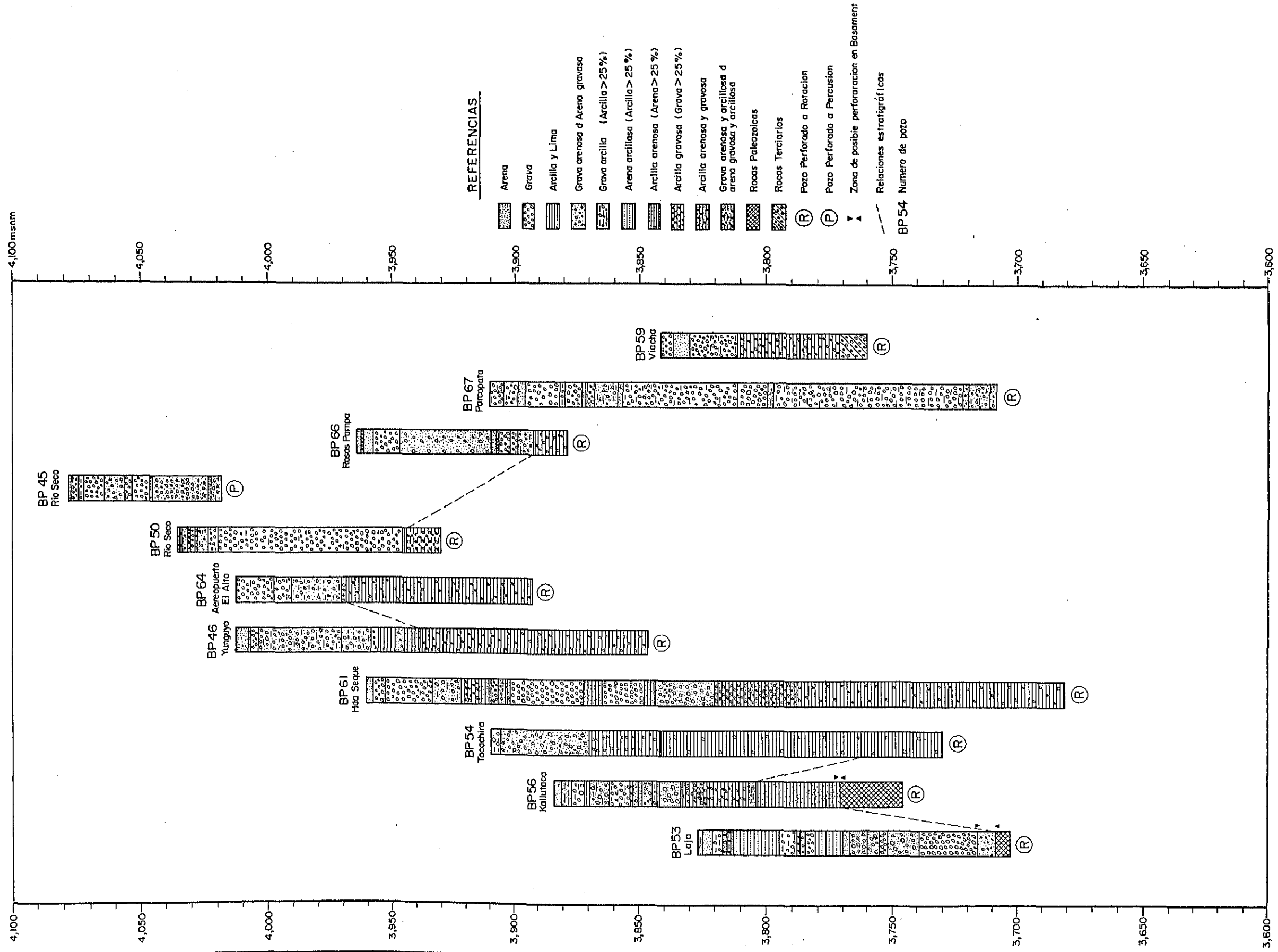


地質断面图
PERFIL Pc-8



REFERENCIAS	
ESC. HR. : 1 : 50,000	
ESC. VR. : 1 : 10,000	
	DEPOSITOS ALUVIALES
	DEPOSITOS COLOVIALES
	DEPOSITOS PLUVIALES
	DEPOSITOS LACUSTRES
	DEPOSITOS DE MORRENAS
	DEPOSITOS FLUVIO GRECIALES
	DEPOSITOS DE FORMACION ULLOMA
	TERNARIO NO DIFERENCIADO
	PALEOZOICO NO DIFERENCIADO

図 V-4 ボーリング柱状一覧図



3-2 地下水の流動

高原台地の地下水は、北東から南西に向かって流出している。これらの地下水は、Viacha から北西方向に延びる不透水性基盤の山地に一旦阻止されるが、山地の切れ目からさらに南西のカタリ河流域に流出して、流れを北西に転じてチチカカ湖に流出している。カタリ河流域では、地下水頭は地表近くであって、流域に湿地を発生させている。この現象は、雨季には極端化し、洪水-湛水域を拡大させている。

高原台地の地下水は、水平、垂直の2つの成分により涵養されている。水平成分は、北方山地から流出する地表水の帯水層への滲透流入であり、垂直成分は、台地の降水である。これら両成分ともその量は季節変動を受けているが、前述したように表流水による涵養は乾季にも絶えることはない。

涵養量の季節変動は、地下水盆の貯留量の変化として地下水位に現れる。GEOBOL の調査によれば、1971~1973年の水位変動は、0.4~6.29mが観測されている。また、ラパス市が1976~1977年に行った調査では、最大3mが記録されているが、多くの井戸では、1m未満の変動である。(図V-5 参照)

この図で判ることは、自由地下水域である台地の北部での地下水変動は大きく、被圧地下水域の南部 Viacha 付近で変動量は小さくなっている。また降水に対する地下水位の応答パターンは調和的であるが、水位上昇ピークは、井戸の位置により時間差が顕著である。このことは、涵養が降水よりも山地流出により多く依存していることを示している。

降水による涵養は、台地の北部と南部での降水量の差に支配されるのが当然であるが、一般に50~100mm/年の滲透が予測されている。(BRGM, 1977)

さらに重要なことは、1日3~4mmの蒸発能力を持つこの地域からの蒸発散による降水の損失である。とくに比較的透水性の不良な台地の最北部や、Viacha 付近の湖成堆積物の分布地域では、垂直滲透は困難となっている。

高原台地での地下水位は、一般にエル・アルト付近で深く、南部の Viacha 付近で浅くなっている。表V-3 既存井戸諸元概要表で判るように、同一地域で掘削された井戸の地下水位は測定年度により著しく異なっている。すなわち、1970年代に測定された静水位は、地表下10m前後であるのに対して、1980年代の測定では30~50mとなっている。これは、この台地の地下水位が経年的に低下していることに原因があるのか、それとも、長期的な降水量の変動によるものかは不明であるが、特記すべきことである。しかし、本調査で測定されたエル・アルト地区西端部での浅井戸の静水位が7m前後であったことから考察して、表V-3による工業用深井戸の30~50mとして示されている静水位は、揚水の影響を受けた状態で測定された可能性がある。

地下水の流出は、エル・アルト地域での人工的な揚水を除けば、ほとんどが南部のカタリ河流域で、自然流出している。また、量は少ないが、東部のラパス市に向かう急崖での湧水として流出している。

表 V-3 既設井戸諸元概要表

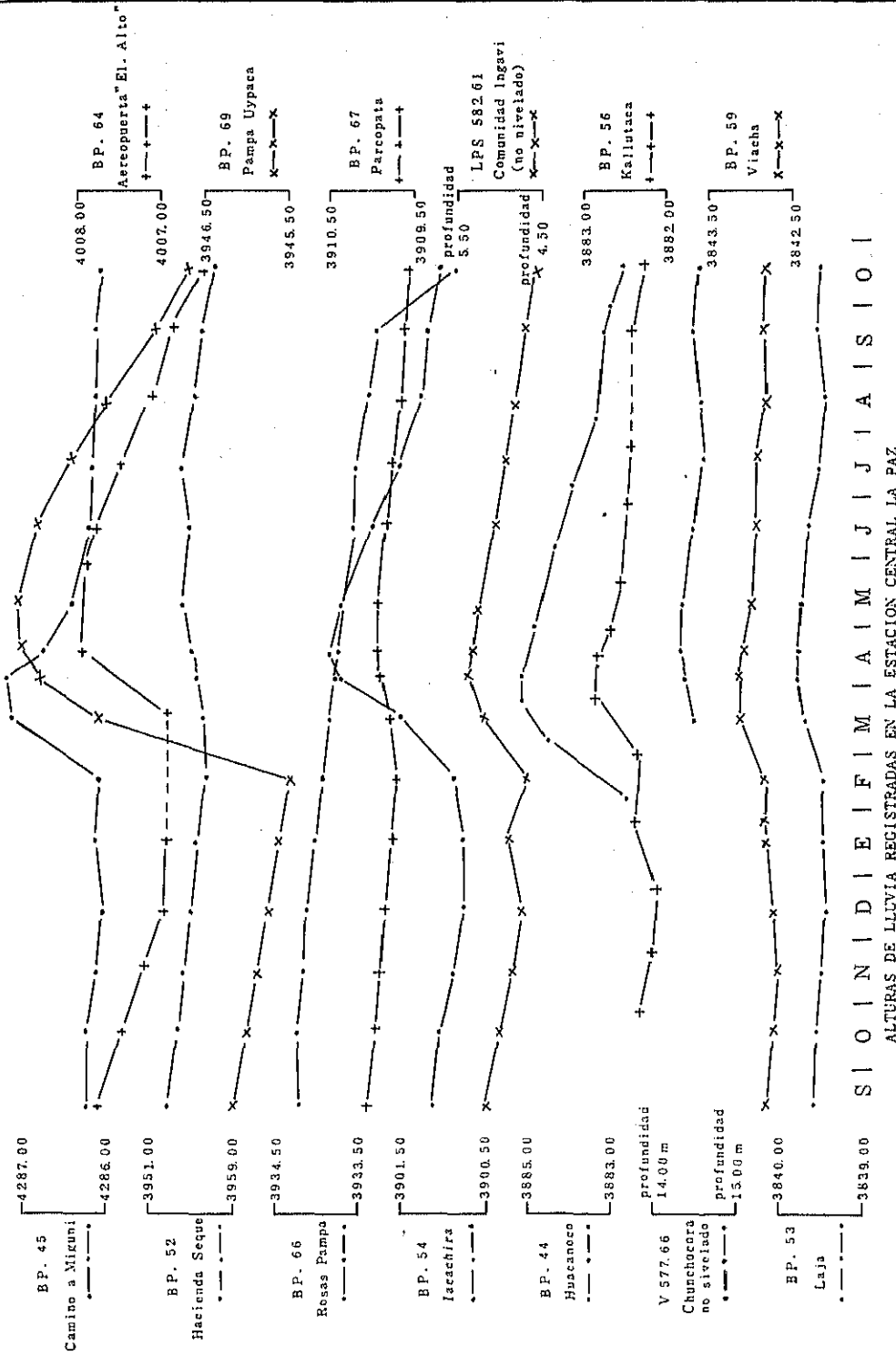
(GEOBOL 資料による)

井戸No	井戸名	位置	掘削年	目的	掘削深度 (m)	フランク・ケーシング		スクリーン		揚水量 (ℓ/sec)	水位降下 (m)	比湧出量 (ℓ/sec/m)	揚水時間 (day)
						長さ (m)	口径 (inch)	長さ (m)	口径 (inch)				
	Complejo Deportivo Ferroviario	Viacha	1981	飲用	49.35	29.35	6	20	6	11.75	7.35	1.60	30
	Pozo Regimiento	Ciudad de Viacha	1981	"	48.00	27.0	6	21	6	14.0	2.6	5.38	18
	Fabrica Cemento	Viacha	1978	工業	42.00	21.0	6 5/8	21	6 5/8	13.0	11.42	1.14	22
	Villa Adela	En Urbanization V. Adela Corraera	1978	飲用	60.00	30.0	6	30	6	3.8	7.46	0.51	30
GA-95	ELMEC	Corretera La Paz Viache	1981	工業	59.3	36.3	6	23	6	6.15	6.87	0.90	21
GA-92	La Cascaa Pl	Corretera La Paz Viacha	1981	"	70.0	52.0	6	18	6	4.2	16.3	0.26	21
GA-94	Pozo Inti	同上	1981	"	70.0	49.0	6	21	6	6.0	6.0	1.00	23
	Pozo Jauregui	Villa Adela El Alto	1982	飲用	61.0	38.7	6	22.3	6	3.1	20.0	0.16	17
GA-85	Pozo Comaning	Zona Senkata El Alto	1980	"	60.0	37.0	6	23.0	6	4.34	6.0	0.72	30
GA-112	Pozo PP-1, Y.P.F.B.	Planta de gas Senkato	1982	工業	64.0	41.45	6	22.55	6	4.4	10.58	0.42	21
GA-35	Pozo Byung Do-im-im	Sobre la Corretera Oruro	1977	"	60.0	33.6	6	26.4	6	4.57	9.65	0.47	-
	Vidrio Plano I	Rio Seco, El Alto	1981	"	71.0	47.0	8	24.0	8	6.2	14.1	0.44	17
GA-98	Vidrio Plano II	"	1981	"	60.0	36.0	8	24.0	8	3.7	10.82	0.34	-
GA-66	Laboforma	"	1979	"	59.0	41.5	6	18.0	6	6.25	11.0	0.57	23
GA-67	Huanca	"	1979	"	48.0	32.59	6	15.41	6	8.2	8.44	0.97	22
GA-14	Fanda	"	1975	"	42.00	18.55	6	12.3	6	4.0	2.1	1.90	-
	Vascal I	"	1980	"	70.00	40.0	6	30.0	6	5.0	14.1	0.35	-
	Vascal II	"	1981	"	82.76	53.0	8	28.0	8	5.5	16.45	0.33	19
	Hormitabol	"	1978	"	62.30	26.30	10	36.0	10	8.5	11.73	0.72	26
	Nueva Posta GEOBOL	"	1981	雑用水	57.60	41.2	6	16.4	6	8.0	4.2	1.90	19
	BP-56	Kallotaca	1969	調査	50.00	38	8	12	4	5.0	7.65	0.65	-

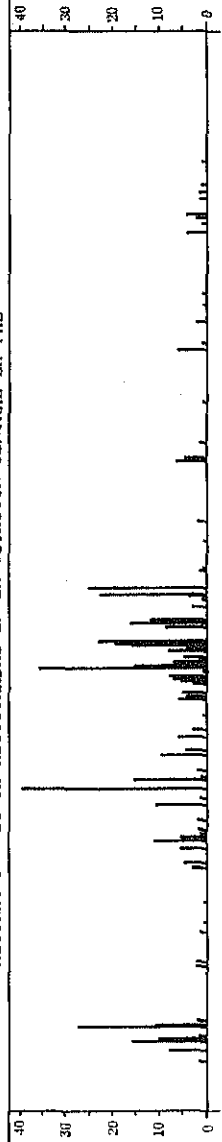
図 V-5

ALTI PLANO 流域に
おける地下水位変動

VARIACION DE LOS NIVELES DE AGUA EN EL ALTIPLANO 1976-77



S I O I N D I E F I M I A I M I J J I A I S I O I
ALTURAS DE LLUVIA REGISTRADAS EN LA ESTACION CENTRAL LA PAZ



Las Consultoras B. F. G. M. - B. C. E. O. M. Noviembre, 1977

表 V - 4 北部高原台地・帯水層常数表

井戸№	位 置	透水量係数 (m ² /day)	貯留係数	透水係数 (m/day)	比湧出量 (ℓ/s/m)
BP-13	Higachi	30	4.9x10 ⁻⁴	-	0.33
BP-18	Batallas	68		2.43	0.72
	Batallas	60	2.9x10 ⁻³	2.14	0.63
BP-20	Khullu Cachi	209		4.75	1.96
	Khullu Cachi	238	6.2x10 ⁻⁴	5.41	1.72
BP-23	Chijipata	104	3.0x10 ⁻⁴	2.36	0.79
BP-24	Huano Huano Bata	167	9.6x10 ⁻⁵	11.93	0.79
BP-27	Pantini	28		0.77	0.17
BP-28	Cutuzuma	65	1x10 ⁻⁵	0.87	0.51
BP-32	Paximaya	50	1.1x10 ⁻³	1.06	0.08
BP-30	Iquiaca Chico	141	2.2x10 ⁻⁶	5.44	0.82
BP-34	Cota Cota	66		2.54	0.35
BP-37	Ancocahua	89	1.9x10 ⁻³	1.98	0.76
BP-39	Esc. S. Bolivar	31	3.6x10 ⁻¹⁰	0.53	0.15
BP-41	Marui Jahuira	355	1.3x10 ⁻⁴	8.07	2.50
BP-46	Yunguyo	87	1.1x10 ⁻³	2.12	0.80
BP-50	Rio Soco	112	2.8x10 ⁻⁴	1.81	0.93
BP-53	Laja	190	1.2x10 ⁻⁴	6.13	0.94
BP-54	Tacachira	44	2.1x10 ⁻³	0.98	0.15
BP-61	Hda. Seque	69	3.3x10 ⁻³	1.09	0.48
BP-56	Kallutaca	97	7.3x10 ⁻⁴	2.77	0.75
BP-64	Aeropuerto	57	2x10 ⁻³	1.27	0.58
BP-59	Viacha	113	2.4x10 ⁻⁴	4.18	0.78
BP-70	Achica Abajo	614	1.1x10 ⁻⁴	43.86	4.29
BP-72	Villa Santa Chacoma	277	3.03x10 ⁻¹	1.17	0.38
BP-77	Irpa Chico	387	4.4x10 ⁻³	7.90	3.58
BP-81	Machacamarca	422	1x10 ⁻⁴	3.86	0.79
平	均	154	1.0x10 ⁻³	-	0.99

(GEOBOL-UNDP, 1973)

3-3 帯水層常数

高原台地に発達する帯水層の水理的常数を得るために、GEOBOL-UNDPの調査では、58本の井戸を掘削し、15回の揚水試験が行われた。これらをまとめたものが表V-4である。

この表によると、透水量係数は30~600 m^3/day の範囲にあって、平均で154 m^3/day である。また貯留係数は 1×10^{-3} ~ 1×10^{-1} の範囲が大部分で、帯水層が、不圧から半被圧の状態にあることが判る。表にみられる常数のばらつきは、揚水試験の精度や、井戸作工の技術的な差異に原因があるものと考えられる。地域の帯水層の代表的な常数は、表の平均値をそれと考えるのが妥当である。

表に示した比湧出量は、揚水時間1日によって得られた値で、その平均値は約1 $\ell/\text{s}/\text{m}$ である。

4. 水 質

エル・アルト地区をも含めた北部高原台地の地下水の水質は、一般に良好でWHOの基準からみて飲用に適している。とくに地下水の涵養源のひとつとなる山地から流出する表流水の水質は、鉱山による人為的汚染を除けば極めて良質である。

地下水盆の下流域では、人為的汚染をうけ、チチカカ湖では乾季にはかんがい用水の水質基準からも、PH, CaSO_4 , TDS等が外れる。また、塩分濃度も大きくなり、Clは400 mg/ℓ 以上となる。

北部高原台地で採水された地下水試料11についての水質分析結果を表V-5に示した。

表V-5 エル・アルト周辺地下水水質 (11資料)
単位 mg/ℓ

項 目	最小値	最大値	平 均
TDS	163.0	597.0	299
硬 度	2.25	14.62	6.81
PH	6.8	8.9	7.5
SiO_2	14.45	58.82	34.09
K^+	2.51	13.36	4.58
Na^+	6.94	70.15	27.72
Ca^{2+}	9.76	81.26	35.60
Mg^{2+}	3.43	14.12	7.90
Fe^{3+}	0	0.40	0.07
NH_4^+	0	0.37	0.03
Cl^-	0	111.98	21.25
SO_4^{2-}	9.67	180.77	39.76
HCO_3^-	61.0	205.63	111.04

(GEOBOL-UNDP, 1973)

表 V - 6 Milluni 流域の毒性項目水質分析結果

PARAMETROS	UNIDAD	O.M.S. WHO 飲用基準	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6	M-7	M-8
Cobre (Cu)	mg/l.	1.5	0.5	2.1	5.9	0.5	0.07	0.48	0.8	0.1
Antimonio (Sb)	mg/l.	-	0.1	0.1	0.7	0.08	0.01	0.06	0.02	0.03
Plomo (Pb)	mg/l.	0.01	0.0	0.0	0.07	0.01	0.15	0.36	0.27	0.4
Estaño (Sn)	mg/l.	-	0.0	0.01	0.94	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Cromo (Cr)	mg/l.	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Arsenico (As)	mg/l.	0.05	0.03	0.34	8.6	0.2	0.01	0.54	0.48	0.0
Zinc. (Zn)	mg/l.	15.0	8.0	37.4	224.5	19.1	4.6	30.5	38.6	32.6
Cadmio (Cd)	mg/l.	0.01	0.08	0.38	0.8	0.07	0.01	0.08	0.1	0.1
Aluminio (Al)	mg/l.	-	1.4	2.1	5.4	0.95	0.2	0.6	1.9	0.07
Mercurio (Hg)	mg/l.	0.001	0.0	0.0	0.56	0.0	0.0	0.0	0.0	0.07
Plata (Ag)	mg/l.	-	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

REFERENCIAS -

- M-1 = Aylalaycu (Laguna entrada a la Mina) (鉱山への流入口)
- M-2 = Nivel cero (Bocamina principal) (主坑口)
- M-3 = Nivel 36 (Bocamina Campana) (Campana 坑口)
- M-4 = Puente Huallatani (Huallatani 橋)
- M-5 = Laguna Huayna Potosi (Huayna Potosi 沼)
- M-6 = Represa Milluni Chico (Milluni Chico ダム)
- M-7 = Canal Represa Milluni (Milluni ダム水路)
- M-8 = Canal de entrada entrada a la Planta Achachicala (アチャチカラ処理場入口水路)
- * = De siete muestreos
- ** = Limites permisibles para agua potable
- *** = Efectuados en el Instituto de Investigaciones Minero Metalúrgicas de Oruro.

La Paz, Marzo 16, 1982

(ラパス市-BRGM, 1977)

またエル・アルト地区上流に位置する Milluni 鉱山周辺の水質についても、とくに毒性の強い成分について分析した値を表V-6に示した。この表によれば、鉱山からの廃水には、ヒ素、カドミウム、亜鉛、鉛の含有量が多いことが判る。とくにラパス市の給水水源のための処理場入口（試料M8）で、亜鉛、カドミウム、鉛、水銀等がWHOの水質基準を超えていることは、注目に値する。

5. 水 収 支

高原台地での水収支調査は、GEOBOL-UNDPにより、北部台地の地下水盆を気候的手法により4区分しダルシーの公式を併用して行われている。エル・アルト地区に関連する第Ⅲ、Ⅳ区分域の水収支の要約は表V-7の通りである。この表によれば、潜在涵養量は降水量に対して5~8%となっている。この表による潜在涵養量は、山地も含めた流域全域の量であるため、台地に貢献する涵養量は流域全域と台地面積との比で増大する。地下水区Ⅲでの面積比は、山地1、台地2程度であるため、台地における実質涵養量は $3/2=1.5$ 倍となる。

台地における水収支計算の精度を上げるためには、山地からの流出量と台地での地下水貯留量変化を考慮に入れる必要がある。

表V-7 北部高原台地（PUCARANI BASIN）の水収支表

地下水区	流域面積 A (k m ²)	降水量 P (mm)	蒸発散量 ET (mm)	垂直透過量 VR=P-ET(mm)	流出量 D		潜在涵養量 SR=VR-D		対降水量比 SR/P (%)	計算年
					(10 ⁶ m ³)	(mm)	(10 ⁶ m ³)	(mm)		
Ⅲ	416.5	477.6	449	28.6	1.9	4.6	10	24	5	1971/72
		608.5	516	92.5	19	46	19.4	46.5	8	1972/73
Ⅳ	1,196	413.2	393	20.2	3.4	2.8	20.8	17.4	4	1971/72
		560.4	504	56.4	35	29	32.8	27.4	5	1972/73

(GEOBOL-UNDP, 1973)

6. 地下水利用の現況

高原台地での地下水利用は、エル・アルト地区に集中されている。これらの利用はすべて深井戸によるもので、その井戸深度は40~80mである。このほか、地区周辺部の農家では、個別に浅井戸を掘削してこれを利用している。

地下水利用量は、過去に調査されていないが、その量は貯留量に較べて少ないとされている。表V-3の井戸台帳に示された井戸の揚水量を単独集計すると、約4百万m³となる。この量は、さきに計算された第Ⅳ地下水区の潜在涵養量の15%に相当する。

エル・アルト地区に分布する深井戸の位置と、井戸の諸元は、図V-6、表V-3に示したとおりで

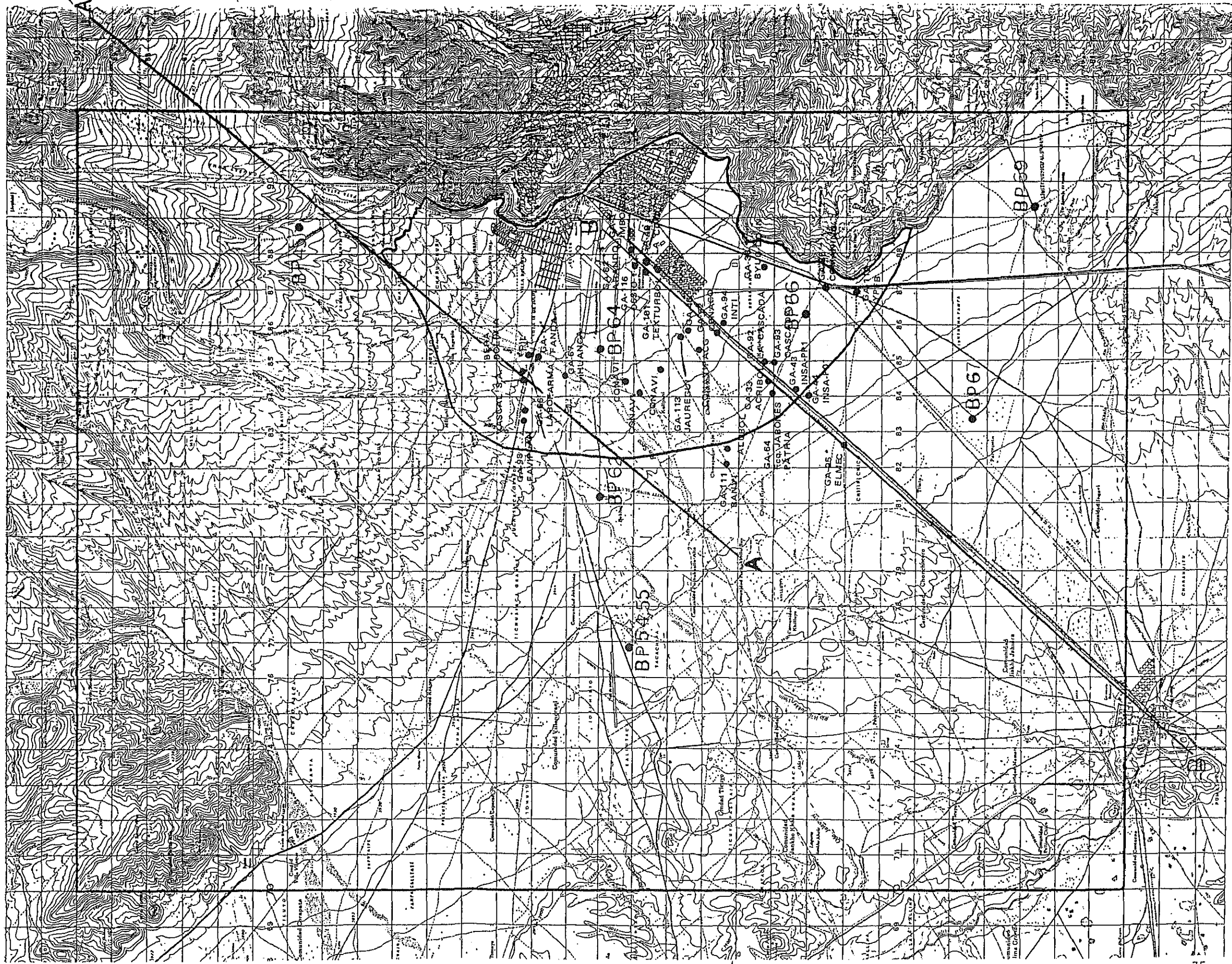


图 V-6 既設井戸位置图

