

MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS  
DIRECCION GENERAL DE OBRAS PUBLICAS  
DIRECCION DE RIEGO

PLAN MAESTRO DE ACCION INMEDIATA PARA  
EL SISTEMA DE RIEGO DEL VALLE DE AZAPA  
REGION DE TARAPACA

INSTANCIA FINAL

E-13

DOCUMENTOS DE TRABAJO  
TOMO I

ESTUDIO GEOTECNICO E HIDROGEOLOGICO CUENCAS ALTIPLANICAS  
LAGUNA CHUNGARA-LAGUNA COTACOTANI - RIO LAUCA SUPERIOR

JUAN KARZULOVIC K.  
DICIEMBRE 1981

Altiplano 地域の流域の土木地質及び水文地質的調査  
 チンカウ湖 - コタコタニ湖 - ラウカ川上流

ESTUDIO GEOTECNICO E HIDROGEOLOGICO CUENCAS ALTIPLANICAS  
 LAGUNA CHUNGARA - LAGUNA COTACOTANI - RIO LAUCA SUPERIOR

C O N T E N I D O

PGS

1.	結論 と 勧告 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	
1.1	Conclusiones	1 - 3
1.2	Recomendaciones	4
2.	序論 ANTECEDENTES DE INTRODUCCION	
2.1	本巻の目的 Propósitos del presente anexo	5
2.2	既存調査 Fuentes de información y estudios anteriores de sustentación	6 - 8
2.3	地質的資料 Apoyos cartográficos y aclaración de cotas dudosas	9 - 10
2.4	流域の identity Identificación de cuencas	11-16
3.	地理的背景 ANTECEDENTES GEOMORFOLOGICOS	
3.1	気象、植生と木道生 Reseña climatológica y vegetacional	17
3.2	地形 Relieve	18-19
3.3	水系、田と湖沼 Red de drenaje y de lagunas	20-22
4.	応用地質的背景 ANTECEDENTES GEOLOGICOS APLICADOS	
4.1	地域地質のまとめ Reseña geológica regional	23-24
4.2	岩石 unit Unidades de rocas	25-29
4.3	土壌 unit Unidades de suelos	30
4.4	地質構造と第四紀火山 Tectonismo y volcanismo cenozoico	31-32
4.5	ラウカ川頭を以て以下の地質のまとめ Reseña geológica del Río Lauca abajo Bocatoma Canal	33
5.	水理化学、水文地質的評価 EVALUACION HIDROQUIMICA E HIDROGEOLOGICA	
5.1	水理化学的評価 Evaluación hidroquímica	34-39
5.2	水文地質的評価 Evaluación hidrogeológica	40-43
5.3	チンカウ湖から地下水涵養に及ぶの概略計算 Cálculos estimativos descargas subterráneas Laguna Chungará	44-45

(B/C) 採水  
 現況の取水地点への土木地質的評価

6.	EVALUACION GEOTECNICA CAPTACIONES ACTUALES Y FUTURAS		
6.1	Bocatoma Cotacotani	コタコタニ 頭首工	
6.2	Alternativa de captación de Laguna Chungará	チンカラ湖 取水の代替案	46
6.3	Alternativas de captación del Río Lauca abajo Bocatoma Canal	ラウカ川 取水の代替案	48-49
6.4	Otras alternativas	その他の代替案 ← 頭首工以前の	50
7.	UBICACION LAMINAS - CUADROS - FOTOGRAFIAS		
	位置図	表	写真
	Lámina 1	: Pg 12 texto	
	Lámina 1a	: Pg 16 texto	
	Lámina 2	: Final texto	
	Lámina 2a	: Final texto	
	Cuadro 1	: Pg 26 texto	
	Cuadro 2	: Pg 34 texto	
	Fotografías 1 a 6 : Final texto		

1. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1.1 Conclusiones

1.1.1 Las unidades de rocas de las cuencas altiplánicas investigadas son esencialmente de volcanitas, del Terciario Medio a Superior hasta el Cuaternario Reciente, todas con una cierta permeabilidad radicada especialmente en fracturas abiertas y en particular correspondientes a los primeros 25 m desde la superficie de sus afloramientos.

Las unidades de más alta permeabilidad relativa son las denominadas QV1 - QV3; las de menor permeabilidad relativa corresponden a las simbolizadas TV - QV6 - QV5 - QV4'; y las de permeabilidades intermedias entre las anteriores, quedan indicadas por las unidades QVr y QV4 de Lámina 2a de este trabajo.

1.1.2 Las unidades de suelos, cuyos espesores no sobrepasarían máximos de 25 m verticales y que serían muy reducidas en el fondo del vaso de Laguna Chungará, quedan caracterizadas especialmente por arenas y gravas arenosas saturadas o con desarrollo de bofedales (Qr); arenas y gravas arenosas secas en superficie o con niveles de saturación a más de 2 m de hondura (Qa); limos y arenas finas de ambiente lacustre (Q1); y cuabiertas regionales, aunque delgadas, de escombreras de las unidades de rocas y con particular desarrollo en la Unidad QV3.

1.1.3 El régimen hidrológico, de las aguas de superficie de las cuencas investigadas, está claramente controlado por el relieve volcánico más reciente o Cuaternario y también, en forma muy notable, por constantes alumbramientos, en las tierras bajas que cobijan las aguas de superficie, de aguas subterráneas de vaciamiento lento que son prácticamente regionales y resultan interceptadas por las acciones de drenaje de dichas tierras bajas.

1.1.4 La Laguna Chungará tendría un vaso permeable y descargaría parte de sus recursos, en forma de flujos subterráneos, a través de su extremo Noroccidental relleno con la Unidad de rocas permeables QV3 y con entrega natural a Laguna Cotacotani; en tanto que no permitiría descargas hacia el Oriente, el Sur y el Norte. Por otra parte, las descargas subterráneas hacia Cotacotani serían no inferiores a 60 lt/s, presumiblemente no mayores que 600 lt/s y probablemente con rango de 250 a 350 lt/s.

1.1.5 La Laguna Chungará es un sistema extraordinariamente bien equilibrado y de modo que tiende a mantener, en todo tiempo, un nivel de aguas de superficie con escasas variaciones de cota. Cuando ocurren aportes de aguas de superficie anormalmente bajas, la laguna recupera su nivel medio a través del drenaje de los almacenamientos subterráneos radicados en los terrenos permeables de sus costados y principalmente de los correspondientes al Volcán Parinacota; mientras, cuando ocurren aportes de aguas de superficie anormalmente altas, la laguna conserva su nivel medio mediante un muy fuerte incremento de las descargas subterráneas hacia Cotacotani.

1.1.6 Las aguas de las cuencas altiplánicas examinadas son potencialmente altas, para fines de regadío, en boro y flúor. El boro es de distribución prácticamente regional y sólo ocasionalmente alcanzaría, en las aguas actuales del Canal Lauca o adiciones futuras por nuevas captaciones o mejoramientos de las existentes, valores en el rango de 2 ppm que efectivamente podrían provocar perjuicios en los cultivos del Valle de Azapa. El flúor proviene principalmente de lixiviaciones de las unidades de rocas volcánicas andesíticas y será siempre, aunque con grandes variaciones a lo largo de cada año, potencialmente más alto en Laguna Chungará que en Laguna Cotacotani y mucho menor abajo de Bocatoma Canal Lauca; pero conforme con la anturaleza de los suelos agrícolas del Valle de Azapa, el contenido alto de flúor de las aguas altiplánicas no sería suficiente para afectar los cultivos de Azapa, aunque podría ser perjudicial para los suministros potables de la población de Arica que se basa en fuentes subterráneas recargadas, en parte importante, por las infiltraciones de los riegos efectuados con las aguas del Canal Lauca.

1.1.7 En su estado actual, el Canal Chungará-Cotacotani no es operable para conducción de aguas y su habilitación, para estos fines, debe estimarse de alto costo.

1.1.8 Una alternativa de conexión directa por túnel, entre Laguna Chungará y Laguna Cotacotani, es factible pero de muy elevado costo por necesidad de sostenimientos repetidos durante la faena de excavación pertinente, por ocurrencia habitual de aguas subterráneas copiosas en los frentes de trabajo y por exigencias finales de revestimiento con bóveda a sección completa en largos tramos.

1.1.9 La puesta en operación de la obra de toma de más aguas abajo de Cotacotani, es factible y significaría mejorar notablemente los aportes actuales al Canal Lauca. Su problema principal radica en la ausencia ahora de zanjones cortafugas apropiados y éstos podrían ser construídos, sin grandes problemas, previo la obtención de resultados de algunas exploraciones de subsuperficie señaladas en el presente texto.

1.1.10 Abajo de Bocatoma Canal Lauca se distinguen dos alternativas atractivas para suministros de aguas adicionales al Canal Lauca; una en Huntume o Juan de la Cruz que proporcionaría unos 250 lt/s medios anuales y otra inmediatamente abajo de la confluencia Lauca - Ancochalloane que entregaría unos 500 lt/s medios anuales.

1.2 Recomendaciones

1.2.1 Estimar de costo alto la habilitación para su puesta en funcionamiento del Canal Chungará - Cotacotani.

1.2.2 Considerar muy atinada la decisión de poner en funcionamiento la Bocatoma de más aguas abajo de Cotacotani; y resolver, en este aspecto, el desarrollo de las labores exploratorias previas indicadas por este informe.

1.2.3 Suponer efectivamente atractivas, por la rapidez y relativamente bajo costo con que podrían construirse y habilitarse las obras correspondientes, las posibilidades de captación en Huntume (Juan de la Cruz) y en confluencia Río Lauca - Río Ancochalloane.

1.2.4 Estimar potencialmente atractiva la conexión de Laguna Sin Nombre con Laguna Guacolla, ambas mostradas por Lámina 2a de este texto, a través de un túnel gravitacional de unos 200 m de largo o bien con aducción de superficie y elevación mecánica.

SANTIAGO, diciembre de 1981

Juan Karzulović Kokot

Con la colaboración principal de Lucio Velasco V.

2. ANTECEDENTES DE INTRODUCCION

2.1 Propósitos del presente anexo

Tal cual fue establecido por el Departamento de Estudios de la Dirección de Riego, el objetivo básico del informe que aquí se entrega es proporcionar el conocimiento geológico, geotécnico e hidrogeológico que se requiere para evaluar la factibilidad técnica del mejoramiento de las actuales captaciones de aguas altiplánicas que alimentan el Canal Lauca; con inclusión, en dicho mejoramiento, de las posibilidades de incremento de los caudales obtenidos en las bocatomas de Cotacotani y del Río Lauca y de las expectativas de aprovechamiento de recursos hídricos, potencialmente excedentes y no utilizados hasta ahora, como los corresponsables al embalse natural de Laguna Chungará y a recuperaciones del Río Lauca abajo de la bocatoma existente en el mismo cauce.

Interesa particularmente definir, en conexión con los eventuales nuevos aprovechamientos de recursos hídricos para el Canal Lauca, las condiciones de ocurrencia de las aguas subterráneas en la zona de las captaciones actuales y posibles futuras; con especial énfasis de lo concerniente a la existencia de recargas de las Lagunas de Cotacotani por aguas subterráneas procedentes de Laguna Chungará, a la magnitud de esas recargas y a las modificaciones que experimentarían, las indicadas recargas, conforme se deprima el nivel de aguas de Laguna Chungará por efecto de extracciones directas de superficie destinadas a suplementar los recursos del Canal Lauca.

Es importante, asimismo, establecer el estado de situación de la aducción construída por la Dirección de Riego entre Laguna Chungará y Lagunas de Cotacotani la cual, con recorrido total de 11.165 m por canal y 385 m en túnel, fue concebida para conducir aguas bombeadas desde Laguna Chungará aunque no ha sido puesta en funcionamiento. En este aspecto interesa, además, definir la factibilidad técnica de utilización efectiva de la aducción de referencia o de otras alternativas, comparativamente más convenientes, para transvasar aguas de Laguna Chungará a Lagunas de Cotacotani y desde éstas hacia el Canal Lauca.

Por último se considera necesario que el presente informe establezca, en base tanto de antecedentes disponibles como de análisis efectuados específicamente para este estudio, las composiciones químicas de las aguas de las diferentes fuentes involucradas por los mejoramientos de captaciones que preocupan; principalmente para lo relativo a la calidad de las aguas de Laguna Chungará y las posibles implicaciones, debido a dicha calidad, en la composición de los recursos que entregaría finalmente el Canal Lauca al Valle de Azapa supuesto que aquel opere con caudales provistos en parte por Laguna Chungará.



2.2 Fuentes de información y estudios anteriores de sustentación

El presente trabajo queda apoyado principalmente en reconocimientos directos de las condiciones geológicas de superficie de la zona que preocupa y complementaciones, de esos reconocimientos, a través del examen de imágenes landsat de falso color a escala 1:500.000 y de fotografías aéreas de escala aproximada 1:45.000.

Está fundamentado, adicionalmente, por experiencias previas de su autor principal respecto de las características geológicas, geotécnicas e hidrogeológicas en los terrenos de las cuencas altiplánicas de Laguna Chungará, Lagunas de Cotacotani y Río Lauca; al igual que por los antecedentes contenidos en informes o publicaciones previas que resultan relevantes para los objetivos planteados anteriormente y correspondientes a los siguientes :

- |  |         |
|--|---------|
| BENITEZ G.A.<br>Estudio Hidrometeorológico de las Cuencas del Río Lauca y Laguna Chungará.<br>Tomo I - II.<br>Departamento de Ingeniería Civil<br>Empresa Nacional de Electricidad S.A.  | 1.1975  |
| BRUGGEN J.<br>Fundamentos de la Geología de Chile.<br>Imprenta Instituto Geográfico Militar de Chile.  | 1950    |
| CUSTODIO E. y LLAMAS M.R.<br>Hidrología Subterránea. Tomo II<br>Capítulo 15.4 Exploración de aguas subterráneas en rocas volcánicas.<br>Editorial Omega. Barcelona.  | 1976    |
| EDWARDS G.R.<br>Avances Tercera Instancia Plan Maestro Regadío Valle de Azapa :<br>Hidrología de Laguna Chungará.<br>Infraestructura Canal Chungará.<br>Hidrología Laguna Cotacotani.<br>Aprovechamiento Laguna Cotacotani.<br>Archivo técnico de la Dirección de Riego. | 1980    |
| EDWARDS G.R. y KARZULOVIC K.J.<br>Plan Maestro Regadío Valle de Azapa.<br>Borrador Informe Final Primera Instancia.<br>Archivo técnico de la Dirección de Riego.   | 10.1980 |

- GONZALES F.O. 1972  
Distribución del Volcanismo Activo de Chile y la Reciente Erupción del Volcán Villarrica.  
Apartado Primer Simposium Cartográfico Nacional.  
Imprenta Instituto Geográfico Militar de Chile.
- KARZULOVIC K.J. 1961  
Informe geológico de la zona de la Central Hidro - eléctrica Chapiquiña.  
Archivo técnico de ENDESA.
- KARZULOVIC K.J. 1962  
Situación geotécnica al 22.11.62 de las obras de Central Hidroeléctrica Chapiquiña.  
Archivo técnico de ENDESA.
- KARZULOVIC K.J. 1963  
Situación general del Túnel Dirección de Riego en Chapiquiña al 6.3.63.  
Archivo técnico de ENDESA.
- KARZULOVIC K.J. 1980  
Estudio Plan Maestro para el Sistema de Regadío del Valle de Azapa. Primera Instancia.  
Anexo : Evaluación Recursos hídricos subterráneos Valle de Azapa.  
Archivo técnico de la Dirección de Riego.
- KARZULOVIC K.J. y GONZALEZ F.O. 1965  
Estudio geotécnico de la Región Sierra de Huailillas de Arica.  
Archivo técnico de ENDESA.
- KATSUI Y. y GONZALEZ F.O. 1968  
Geología del Area Neovolcánica de los Nevados de Payachata.  
Publicación N° 29.  
Departamento de Geología  
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas  
Universidad de Chile.
- NIEMEYER H.F. 1964  
Ampliación de los recursos del Río Lauca.  
Separata Revista Chilena de Ingeniería  
N° 303. Enero - febrero 1964.

- RANKAMA K. y SAHAMA TH. G. 1954  
Geoquímica.  
Editorial Aguilar. Madrid
- RISOPATRON L. 1924  
Diccionario Geográfico de Chile.  
Imprenta Universitaria. Santiago de Chile.
- VASQUEZ C.A. 1978  
Calidad de Aguas de la Primera Región  
Informe Interno.  
Dirección General de Aguas.
- ZUMAETA D.O. 1976  
Constituyentes químicos de las aguas de riego del  
Valle de Azapa.  
Estudio sistemático durante el año 1974.  
Boletín N° 28 Centro de Investigación y Capacitación  
Agrícola.  
Universidad del Norte - Arica.

### 2.3 Apoyos cartográficos y aclaración de cotas dudosas

La zona que interesa tiene cartografía regular del Instituto Geográfico Militar cuyas láminas son excelentes, de escala 1:50.000 y con equidistancia curvas de nivel 50 m, y fueron utilizadas reservadamente por BENITEZ G.A. (1975, ob.cit.) para definir, en forma confiable, superficies de las cuencas hidrográficas que interesan a los fines del actual anexo.

Sin embargo la cartografía 1:50.000 de referencia no pudo ser utilizada, para el presente trabajo, en razón de que tal cartografía es explícitamente reservada y solamente puede examinarse, previa una solicitud fundamentada que en este caso correspondería al señor Director de Riego, con autorización del I.G.M. En todo caso es indudable que debiera hacerse la solicitud pertinente, para el examen de la cartografía 1:50.000 que se comenta, por cuanto ella permitiría una adecuada evaluación topográfica de todo el territorio comprometido, directa o indirectamente, por las actuales como asimismo eventuales nuevas captaciones de aguas destinadas a incrementar los recursos hídricos del Canal Lauca.

Los apoyos cartográficos que efectivamente estuvieron disponibles para el estudio que ahora se entrega, son todos parciales y corresponden a los siguientes :

Plano de planta a escala 1:1.000 y equidistancia curvas de nivel 1 m, con cobertura parcial del área de Laguna Chungará y parte de las Lagunas de Cotacotani, el cual corresponde a 7 láminas confeccionadas por ENDESA el año 1969.

Reducción fotográfica, hasta escala 1:5.000, del plano anterior.

Plano de planta muy aproximado, del Canal Chungará, dibujado sobre la reducción 1:5.000 anterior y con eliminación de gran parte de las curvas topográficas para mayor claridad del trazado de dicho canal.

Plano de planta de Laguna Chungará y del conjunto de Lagunas de Cotacotani, con inclusión de la Bocatoma del Canal Lauca en Río Lauca, de escala 1:20.000 y equidistancia curvas de nivel 5 m que son, en todo caso, muy parciales. Los originales de este plano son de la Dirección de Riego y fueron confeccionados en el año 1959; contiene, por traspaso posterior, el trazado aproximado del Canal Chungará - Cotacotani y asimismo curvas batimétricas de las lagunas de Chungará y Principal de Cotacotani.

Para el actual estudio fueron utilizados todos los planos disponibles recién citados; pero se empleó, como plano básico de vaciamiento de las condiciones geológicas del área que interesa, el de escala 1:20.000 que tiene cobertura suficientemente amplia o por lo menos superior a la de los otros planos ya mencionados.

Se usaron además, como apoyos planimétricos complementarios, fotografías aéreas de escala aproximada 1:45.000 (\*) e imágenes landsat de falso color a escala 1:500.000.

Importa dejar muy bien establecido que hasta el trabajo de BENITEZ G.A. (1975, ob.cit.) se consideró que las cotas promedio normales, de las aguas de Laguna Chungará y de Cotacotani Principal, eran respectivamente de más o menos 4.517 y 4.500 m.s.n.m; pero en el citado trabajo se señalaron datos de correcciones altimétricas, para el cero del limnómetro de Laguna Chungará, los cuales dieron origen a la errónea interpretación de que el nivel medio de las aguas de superficie de Laguna Chungará correspondía a la cota aproximada 4.528 m.s.n.m. Sin embargo, conforme a una reciente reunión con el Ingeniero Andrés Benítez G., queda claro que el nivel promedio efectivo de las aguas de Laguna Chungará es el que cabe interpretar de los planos taquimétricos existentes y es de más o menos 4.517 m.s.n.m.

(\*) Corresponden a fotografías del I.G.M., del Vuelo Hycon del año 1955, las cuales supuestamente serían de escala aproximada 1:70.000 y que efectivamente resultan de escala aproximada 1:45.000 en el área investigada.

## 2.4 Identificación de cuencas

Lámina 1 de pg siguiente permite distinguir, a nivel regional de gran cobertura, las cuencas hidrográficas que interesan con sus respectivas redes de drenaje principales. Por otra parte y conforme principalmente con BENITEZ G.A. (1975, ob.cit.) y con NIEMEYER F.H. (1964, ob.cit.), tales cuencas presentan las características geométricas y pluviométricas señaladas a continuación :

### Cuenca Laguna Chungará

Nivel medio anual espejo de agua (*)	4.517,27	m.s.n.m.
Nivel máximo mensual (Marzo) (*)	4.517,45	m.s.n.m.
Nivel mínimo mensual (Noviembre) (*)	4.517,10	m.s.n.m.
Superficie inundada a nivel medio anual	1.900,00	hás
Profundidad máxima del agua	32,00	m
Capacidad de almacenamiento a nivel medio	385,00x10 <sup>6</sup>	m <sup>3</sup>
Superficie hidrográfica total de la cuenca	263,00	km <sup>2</sup>
Superficie de la laguna	19,00	km <sup>2</sup>
Superficie de afluentes laterales totales	244,00	km <sup>2</sup>
Superficie del afluente Río Chungará	104,00	km <sup>2</sup>
Precipitación media anual conjunto cuenca(**)	350,00	mm
Superficie englaciada o con nieves permanentes (***)	6,00	km <sup>2</sup>

(\*) Según mediciones del último día de cada mes para el lapso de años hidrológicos 1962/1963 - 1972/1973, indicados por BENITEZ G.A. (1975, ob.cit.)

(\*\*) Conforme con isoyetas precipitaciones medias anuales del período 1932/1933 - 1971/1972 señalados por BENITEZ G.A. (1975, ob.cit.) y cuyos años hidrológicos se extienden desde noviembre hasta octubre.

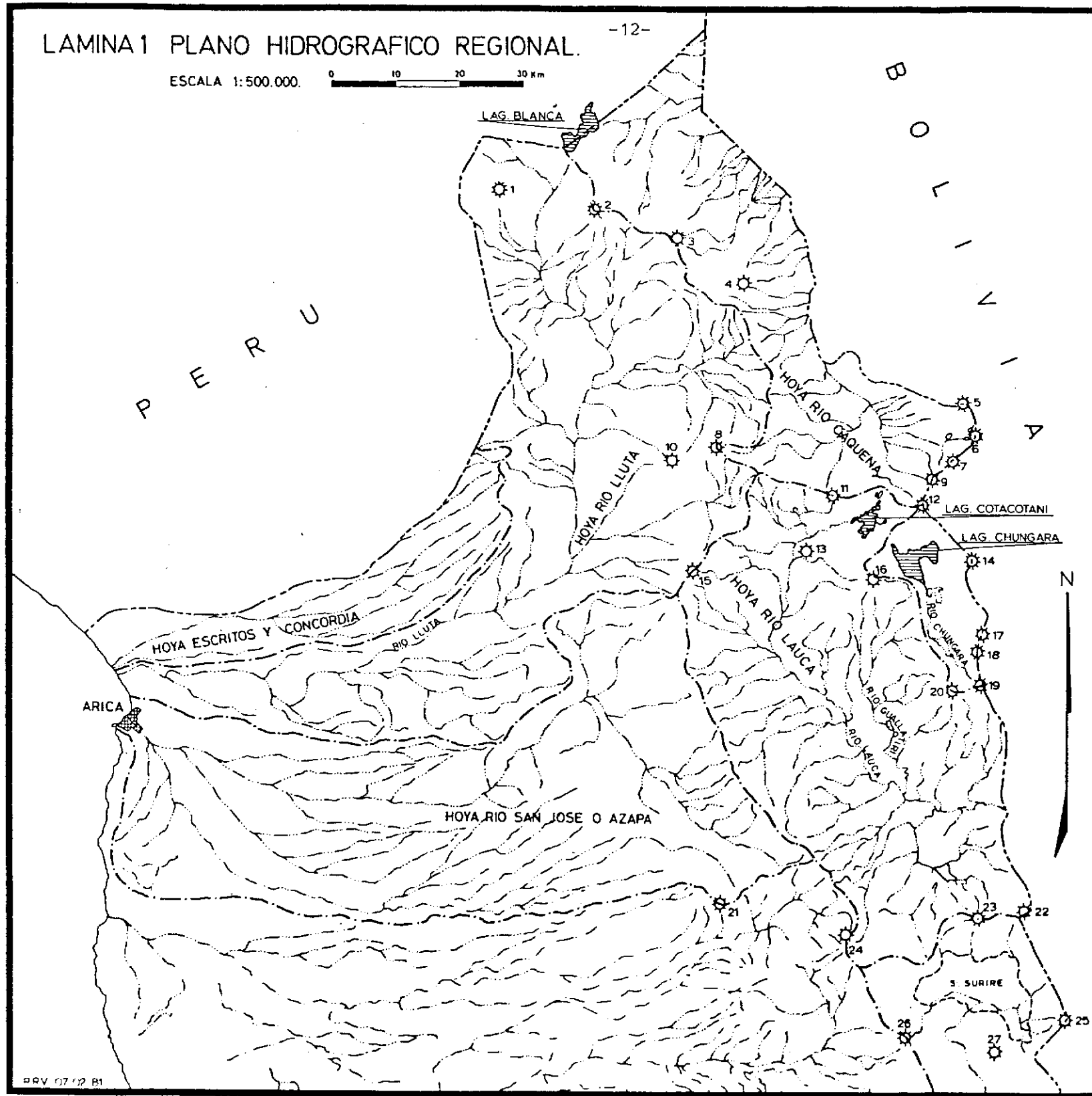
(\*\*\*) En base observaciones imágenes landsat a escala 1:500.000 del mes de noviembre del año 1976.

LAMINA 1 PLANO HIDROGRAFICO REGIONAL.

-12-

ESCALA 1:500.000.

0 10 20 30 km



IDENTIFICACION APARATOS VOLCANICOS.

Nº	NOMBRE	COTA m.s.n.m.
1	TACORA.	5950
2	CARACARANI.	5190
3	CHUQUIANANTA.	5488
4	LEXONE.	5370
5	LARANCAGUA.	5580
6	CASIRI.	5250
7	LARANCAGUA. II	5330
8	PUTRE.	5500
9	POMERAPE.	6250
10	TAAPACA.	5815
11	GUANEGUANE.	5100?
12	PARINACOTA.	6350
13	CHUCULLO.	4550
14	QUISQUISINI.	5480
15	LAUCA.	5080
15	AJOYA.	5330
17	HUMARATA.	5730
18	ACOTANGO.	6050
19	CAPURATA.	6060
20	GUALLATIRI.	5990
21	MARQUEZ.	4960
22	PUQUINTICA.	5760
23	ARINTICA.	5590
24	ANOCARIRI.	5050
25	LLISCAYA.	5580
26	CHUQUIANANTA.	5590
27	CHIGUANA.	5280

Cuencas del Sistema Laguna Cotacotani-Río Desaguadero-Río Lauca(\*)

(a) Cuenca Laguna Cotacotani en desagüe

Superficie hidrográfica total	98,00	km <sup>2</sup>
Superficie inundada lagunas	6,00	km <sup>2</sup>
Nivel medio anual espejo de agua (**)	4.498,30	m.s.n.m.
Nivel máximo mensual (Febrero) (**)	4.498,73	m.s.n.m.
Nivel mínimo mensual (Octubre) (**)	4.497,93	m.s.n.m.
Profundidad máxima del agua	20,00	m.s.n.m.
Capacidad de almacenamiento a nivel medio	30,00 x 10 <sup>6</sup>	m <sup>3</sup>
Precipitación media anual conjunto cuenca	(***)	350,00 mm
Superficie englacada o con nieves permanentes(****)		2,00 km <sup>2</sup>

(\*) El conjunto de las cuencas de referencia componen propiamente el Sistema del Río Lauca el cual nace, con el nombre de Río Desaguadero, en el desagüe de Laguna Cotacotani Principal. Por otra parte Laguna Cotacotani define un gran número de cuerpos de aguas, en su mayor proporción interconectados unos con otros, los cuales son colectados finalmente por la Laguna Cotacotani Principal a la que se refieren los niveles de espejos de aguas que se indican.

(\*\*) Según mediciones del último día de cada mes para el lapso de años hidrológicos 1962/1963 - 1972/1973, señalados por BENITEZ G.A. (1975, ob.cit.)

(\*\*\*) Conforme con isoyetas precipitaciones medias anuales del período 1932/1933 - 1971/1972 expuestas por BENITEZ G.A. (1975, ob.cit.) y cuyos años hidrológicos se extienden desde noviembre hasta octubre.

(\*\*\*\*) En base observaciones imágenes landsat a escala 1:500.000 del mes de noviembre del año 1976 y correspondiente, en lo esencial, a la porción del cono nevado Volcán Parinacota que entrega a Laguna Cotacotani.



(b) Cuenca Río Desaguadero hasta confluencia con Río Lauca (\*)

Superficie total cuenca	292,00 km <sup>2</sup>
Superficie provista por Laguna Cotacotani en desagüe	98,00 km <sup>2</sup>
Superficie adicional Río Desaguadero	194,00 km <sup>2</sup>
Precipitación media anual conjunto cuenca (**)	300,00 mm
Superficie englaciada o con nieves permanentes	2,00 km <sup>2</sup>

(\*) Esto es, hasta Bocatoma Canal Lauca

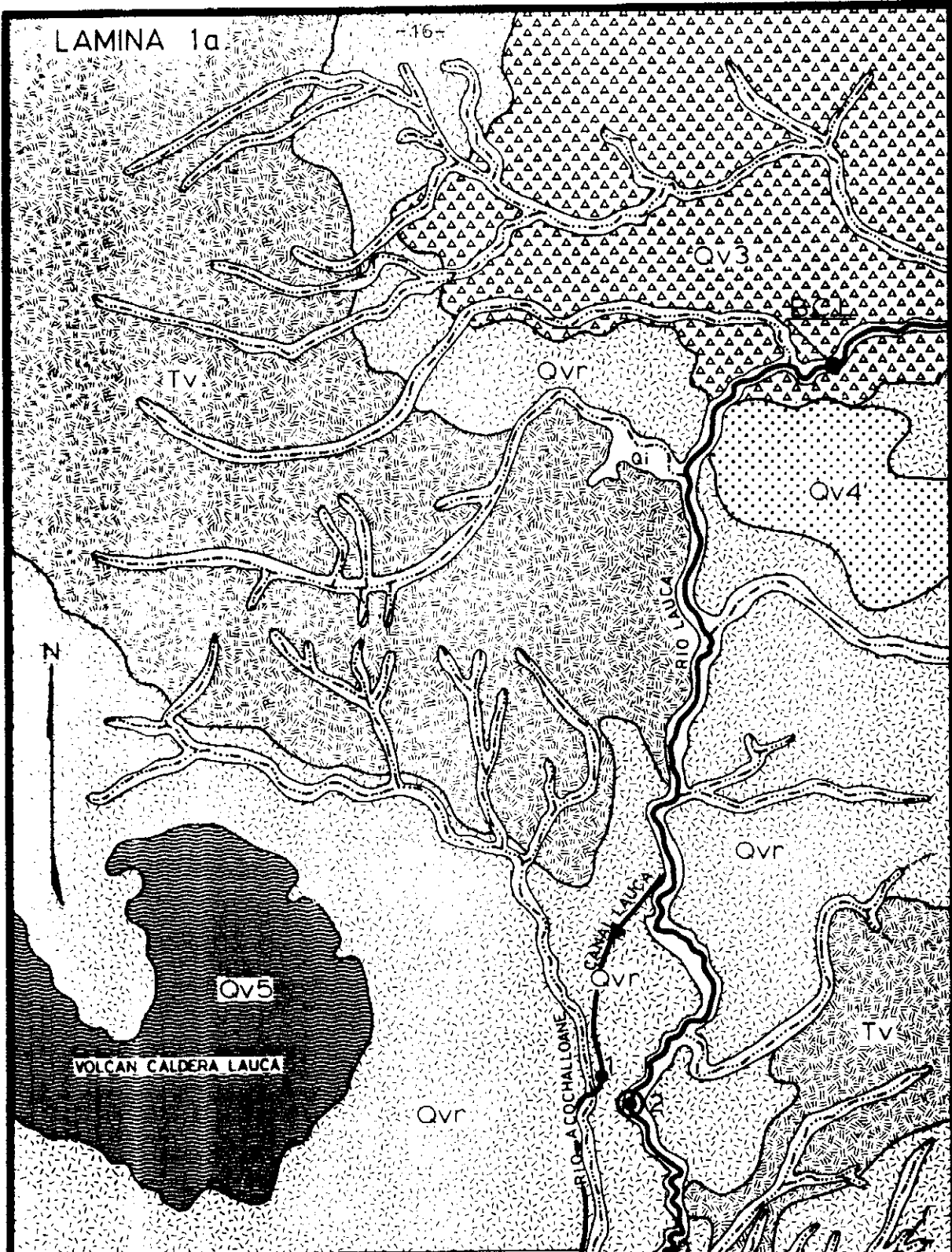
(\*\*) Conforme con isoyetas precipitaciones medias anuales para el lapso, de años hidrológicos desde noviembre hasta octubre, de 1932/1933 a 1971/1972 indicado por BENITEZ G.A. (1975, ob.cit.)

(c) Cuenca Río Lauca

Hasta Juan de la Cruz o Huntume (*)	
Superficie hidrográfica total	366,00 km <sup>2</sup>
Superficie provista hasta Desagüe Laguna Cotacotani	98,00 km <sup>2</sup>
Superficie provista entre desagüe y Bocatoma Canal Lauca	194,00 km <sup>2</sup>
Superficie entre Bocatoma Canal Lauca y Huntume	74,00 km <sup>2</sup>
Precipitación media anual conjunto cuenca total (**)	295,00 mm
Precipitación media anual entre Bocatoma Canal Lauca y Huntume (**)	275,00 mm
Hasta bajo confluencia Lauca-Ancochalloane (1)	
Superficie hidrográfica total	457,00 km <sup>2</sup>
Superficie hasta Juan de la Cruz o Huntume	366,00 km <sup>2</sup>
Superficie entre Juan de la Cruz y bajo Ancochalloane	91,00 km <sup>2</sup>
Precipitación media anual conjunto cuenca (**)	290,00 mm
Precipitación media anual entre Juan de la Cruz y Ancochalloane (**)	270,00 mm

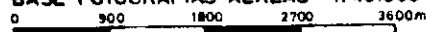
(\*) (1) Véase, para fines de ubicación, Lámina 1a de pg 16 siguiente.

(\*\*) Según isoyetas precipitaciones medias anuales ya utilizadas y de BENITEZ G.A. (1975, ob.cit.)



GEOLOGIA RIO LAUCA ABAJO BOCATOMA

BASE FOTOGRAFIAS AERIAS 1:45.000



- Tv PLATEAU RIOLITICO.
- Qv5 LAVAS RIOLITICAS ANDESITICAS
- Qv4 DOMOS ANDESITICOS
- Qvr TOBAS Y FLUJOS DE CENIZAS RIOLITICAS
- Qv3 LAVAS ANDESITICAS DE BLOQUES. INCLUYE Qi
- Qi DEPOSITOS CUATERNARIOS
- BC L BOCATOMIA CANAL LAUCA
- 1 MUESTRA CANAL M-15
- 2 MUESTRA RIO LAUCA M-16 (JUAN DE LA CRUZ = HUNTUME)
- 3 BAJO HUNTUME

3. ANTECEDENTES GEOMORFOLOGICOS APLICADOS

3.1 Reseña climatológica y vegetacional

El régimen de precipitaciones de las cuencas altiplánicas que preocupan se asocia con el llamado Invierno Boliviano y de manera que ellas ocurren esencialmente durante la temporada de diciembre hasta marzo; normalmente son escasas a muy escasas en los meses de noviembre y abril, suelen ser relativamente importantes en los meses de diciembre y marzo, resultan corrientemente muy altas en enero y febrero, y el período de mayo hasta octubre frecuentemente no registra precipitaciones.

La pluviometría altiplánica es habitualmente de nieves arriba de la altitud de los 5.000 m y por lo general de aguas lluvias abajo de la cota 4.500 m; mientras, en el relieve de 4.500 a 5.000 m.s.n.m, se producen tanto nevazones como lluvias. Las temperaturas medias anuales alcanzan 1 a 2° C y en los meses de junio-julio-agosto, los más fríos del año, los promedios térmicos resultan normalmente en el rango de 2°C bajo cero; además, todos los meses las temperaturas mínimas medias son de varios grados bajo cero.

Conforme con BENITEZ G.A. (1975, ob.cit.), la evaporación media anual de las aguas de superficie es comparativamente baja y para el período hidrológico 1963/64 a 1971/72 equivaldría a 1.138 mm en el desagüe de Laguna Cotacotani y a 1.302 mm en Laguna Chungará.

Como consecuencia de sus regímenes pluviométrico y térmico, la zona altiplánica que se comenta tiene un clima de estepa fría de altura hasta el relieve de más o menos 5.000 m.s.n.m y que a mayor altitud carece prácticamente de cubiertas vegetacionales debido a las muy bajas temperaturas en todo tiempo. La vegetación natural es fundamentalmente de pastos y musgos tiernos en las áreas correspondientes a bofedales o vegas y en las cuales, normalmente, siempre están disponibles aguas o humedades abundantes que mantienen todo el año tales pastos y musgos; mientras en los terrenos interfluviales o con sólo agua intermitente de los períodos de lluvias, la vegetación natural es de pastos más resistentes o tipo coirón y que tienden a secarse en las épocas sin precipitaciones.

### 3.2 Relieve

La zona altiplánica investigada debe describirse como una cuenca de depresión, presumiblemente tectónica, de eje mayor longitudinal y aproximadamente Norte - Sur aunque muy irregular.

La cuenca de depresión de referencia está encajada entre los macizos de rocas basales mesozoicas correspondientes a la Cordillera Central o de Chapiquiña por el Oeste y los cordones volcánicos relativamente muy nuevos, del Terciario al Cuaternario, con los cuales se compone la Cordillera Oriental por el Este (\*).

Dicha cuenca de depresión fué rellenada ampliamente, en el transcurso del Terciario y particularmente durante el Terciario Medio, por potentes flujos de volcanitas riolíticas emitidos en especial por erupciones de fisuras; de manera que quedó nivelada hasta una especie de plateau de relieve suave o amesetado.

El plateau riolítico terciario, correspondiente a la Unidad TV de láminas 2 y 2a del presente estudio, fue posteriormente agradacionado y degradado por los procesos geológicos del Terciario Superior al Cuaternario Reciente; entre los cuales fue siempre de extraordinaria importancia un volcanismo intenso si bien, a diferencia del volcanismo de fisuras anteriores, quedó particularmente radicado en conductos más o menos centralizados y tales como los indicados en el plano hidrográfico regional de Lámina 1.

Las acciones agradacionales sobre el plateau riolítico terciario produjeron los aparatos volcánicos marcados en Lámina 1 y de modo que éstos, con diferentes estados de conservación según el período en que se han mantenido inactivos, constituyen actualmente cumbres sobresalientes y a menudo superiores a la altitud de los 6.000 m.s.n.m, respecto del plan general del citado plateau cuya altitud está en el rango de los 4.000 a 4.500 m.s.n.m. Las acciones agradacionales construyeron, además, formas de recubrimiento del plateau riolítico terciario constituidas especialmente por flujos de lavas y depositaciones de piroclásticos, flujos laháricos y de corrientes de avenidas o crecidas, acumulaciones de sedimentos fluviales a glaciofluviales, depositaciones de ambientes lacustres a semilacustres y, en forma menor, acumulaciones por el viento o eólicas.

(\*) Véase KARZULOVIC K.J. (1980, ob.cit.)

Los procesos degradacionales o erosivos netos, profundizaron el plateau riolítico terciario a depresiones representadas por valles y fondos de quebradas e igualmente por los fondos de las actuales lagunas de Chungará y del conjunto de Cotacotani, con inclusión de las muy someras de Ciénagas de Parinacota.

Según todo lo expuesto, el relieve regional de la zona altiplánica examinada es de notables contrastes, de un sector a otro que se considere, entre cumbres que emergen hasta unos 2.000 m por encima de los remanentes aterrizados del plateau riolítico terciario, depresiones netas de cuencas lacustres y coladas lávicas, a veces entremezcladas con dichas cuencas lacustres cual el caso notable del conjunto Cotacotani, las cuales tienden a formar serranías ondulosas extraordinariamente quebradas o irregulares.

### 3.3 Red de drenaje y de lagunas

La hidrografía altiplánica aparece controlada por el relieve volcánico cuaternario y por tal razón debe considerarse comparativamente nueva o en un estado todavía juvenil, en los sectores donde el volcanismo cuaternario ha sido más destacado y cual es el caso de lo concerniente a Laguna Chungará, Laguna Cotacotani con inclusión de las Ciénagas de Parinacota, y Río Lauca Superior o desde Bocatoma Canal Lauca hasta más o menos la confluencia con el Río Ancochalloane; esto último en razón de que, más aguas abajo que dicha confluencia, el Río Lauca presenta un valle viejo encajado profundamente en el plateau riolítico terciario y el cual se habría mantenido, probablemente sin grandes variaciones, desde el Terciario al Cuaternario Reciente.

Conforme con lo anterior, también deben considerarse comparativamente muy recientes las dos grandes lagunas del área que preocupa, la de Chungará y la de Cotacotani Principal; lo cual explica adicionalmente que ellas presentan actualmente profundidades máximas relativamente notables y rellenos recientes probablemente de escaso espesor en sus fondos.

El relieve volcánico cuaternario es por otra parte y de acuerdo a las características de los tipos de rocas prevalecientes en el área del estudio, bastante permeable y particularmente en los primeros 10 a 25 m desde la superficie de sus afloramientos; de manera que gran proporción de las cuencas que interesan ofrecen una alta tasa de infiltración de aguas de superficie y la ocurrencia de acuíferos, efectivamente saturados, es prácticamente regional en las volcanitas cuaternarias. El nivel de aguas o de saturación de dichos acuíferos regionales tiende a disponerse muy cerca del correspondiente a las aguas de superficie más próximas y de forma que las depresiones, donde se cobijan las aguas de superficie, actúan como especies de drenes que interceptan los niveles de las aguas subterráneas y colectan los alumbraamientos pertinentes.

Se destaca lo anterior en razón de que es realmente muy notable, para lo relativo al régimen general de las aguas de superficie altiplánicas que interesan, tomar debida consideración de los aportes de las aguas subterráneas, de vaciamiento lento, que son colectadas donde las aguas de superficie interceptan los niveles correspondientes.

Lo recién expuesto explicaría los valores tan diferentes que calcula BENITEZ G.A., en su excelente trabajo del año 1975 ya mencionado, para las producciones específicas de los afluentes laterales (\*) de Laguna Chungará y de Laguna Cotacotani en su desagüe. En el primer caso define una producción específica de solamente  $2,78 \text{ lt/s/km}^2$ ; mientras, en el segundo, determina una de  $4,78 \text{ lt/s/km}^2$  que el mismo autor comenta como muy superior a la del resto de las cuencas investigadas.

El desagüe de Laguna Cotacotani está constituido por el Río Desaguadero que es un colector natural y muy eficiente, de los escurrimientos de Laguna Cotacotani, debido a que está encajado en un umbral rocoso de la Unidad QV3 de Lámina 2a del presente informe y más todavía en razón de que mantiene una pendiente relativamente alta, esto es con rango de más o menos 3,5 %, en los primeros 1.500 m de su recorrido hacia cauce abajo. Es lícito suponer entonces que las medidas de gastos en el Desagüe de Cotacotani señalan gran parte de las aguas efectivamente producidas por la cuenca correspondiente y que el valor obtenido por BENITEZ G.A. es probablemente real y confiable; sin perjuicio de que tendría incrementos por aportes ajenos a la misma cuenca y de transvasamientos subterráneos desde Laguna Chungará hacia Laguna Cotacotani.

En el caso de Laguna Chungará el vaciamiento lento, por alumbamientos de aguas subterráneas producidos al nivel mismo de la laguna o más abajo en la cubeta de depresión que la contiene, es ciertamente importante si se considera únicamente el hecho de que la vertiente septentrional, adosada al imponente cono del Volcán Parinacota y a su correspondiente cumbre siempre nevada, no registra cauces ni vertientes permanentes relevantes. Situación, la indicada, sólo explicable en función de una permeabilidad relativamente alta de los terrenos que componen los faldeos del Parinacota; y de manera que la producción específica calculada por el autor de referencia, con valor de  $2,78 \text{ lt/s/km}^2$ , sería probablemente bastante inferior a la real.

Siempre en relación con las producciones específicas de las dos cuencas hasta aquí comentadas, es opinión del autor principal de este informe de que ambas, supuesto que no existieran interconexiones de aguas subterráneas desde Laguna Chungará hacia Laguna Cotacotani, deberían presentar valores equivalentes y posiblemente en el rango de 3,5 a  $4,0 \text{ lt/s/km}^2$ , de modo que la diferencia de tal valor posible, con el calculado por BENITEZ G.A., sería principalmente el resultado de recuperaciones de aguas subterráneas procedentes de Laguna Chungará y en favor de Laguna Cotacotani.

(\*) No incluye en dichos cálculos las áreas inundadas de Laguna Chungará ( $19 \text{ km}^2$ ) y del conjunto de lagunas de Cotacotani ( $6 \text{ km}^2$ ).



Las cuencas de drenaje que interesan quedan indicadas en Lámina 1 para lo concerniente a sus disposiciones regionales y aparecen identificadas, respecto de sus características geométricas y pluviométricas principales, en pgs 11 a 14 del presente texto. Mientras Lámina la proporciona, con mayor detalle, el desarrollo parcial del Río Lauca desde Bocatoma Canal Lauca hasta poco abajo de la confluencia con Río Ancochalloane; esto especialmente para localizar dos posibilidades atractivas de nuevas fuentes de suministro potenciales para el Canal Lauca : una en Huntume o Juan de La Cruz y la otra inmediatamente bajo Ancochalloane - Lauca.

Interesa agregar que los conos volcánicos mayores que 5.500 m. s.n.m presentan nieves permanentes y constituyen importantes aportes, netos de vaciamiento lento, para los cauces o cuencas que drenan dichos conos altos y el más notable de los cuales corresponde al Volcán Parinacota (6.350 m) cuyo campo nevado, de aproximadamente 4 km<sup>2</sup> en noviembre del año 1976, alimentaría más o menos en iguales proporciones la cuenca de Laguna Chungará y la Cuenca de Laguna Cotacotani; los otros conos nevados destacados, respecto de las cuencas examinadas, corresponden al conjunto de los volcanes Humarata (5.730), Acotango (6.050 m), Capurata (5.990 m) y Guallatire (6.060 m). Este conjunto de conos nevados es drenado en parte por el Río Chungará el cual tiene una buena regulación por aportes nivales, es el mayor tributario de Laguna Chungará, descargaría probablemente no menos de 200 l/s permanentes en aguas directas de superficie y posiblemente no menos de 100 l/s, durante lapsos de estiaje rigurosos, como aguas subterráneas someras y diseminadas a través del ancho valle con el que el mismo río entrega a Laguna Chungará.

#### 4. ANTECEDENTES GEOLOGICOS APLICADOS

##### 4.1 Reseña geológica regional

Lámina 2 , a escala aproximada 1:500.000, ilustra las características geológicas a nivel de grandes unidades de suelos y rocas de la región en la cual se insertan las cuencas altiplánicas investigadas.

Aunque la misma lámina fue incluida y también comentada en un anexo anterior del Plan Maestro del Sistema de Regadío del Valle de Azapa (\*), se considera conveniente recalcar en esta oportunidad los hechos principales siguientes que derivan de ella :

(i) Las rocas basales mesozoicas componen parte muy importante de los macizos de la Cordillera Central o de Chapiquiña y de manera que son parcialmente drenadas por algunos de los tributarios más occidentales del Río Lauca; en tanto que estas rocas basales prácticamente no afloran en las cuencas altiplánicas de Laguna Chungará y de Laguna Cotacotani, como tampoco en la representada por los tributarios centrales y orientales del Río Lauca.

(ii) Las volcanitas terciarias TV tienen distribución efectivamente regional en la zona altiplánica que preocupa y constituyen una especie de plateau de relieve suave, con plan general de 4.000 a 4.500 m.s.n.m, construído probablemente durante el Terciario Medio a través de una extraordinaria actividad volcánica radicada particularmente en erupciones de fisuras y de forma que la mayor proporción de las volcanitas TV consiste de tobas soldadas o ignimbritas, emitidas como nubes ardientes, las cuales presentan características a la vista propias de lavas francas.

(iii) Sobreimpuestos en el plateau volcánico terciario TV, el altiplano investigado contiene numerosos conos que fueron desarrollados, entre el Terciario Medio a Superior y principalmente desde el Terciario Superior al Cuaternario, por erupciones a través de conductos centrales. Estos conos incluyen en especial lavas netas, con predominio de andesitas a diferencia de las riolitas o rocas más ácidas que prevalecen absolutamente en el plateau TV, y presentan muy diferentes estados de conservación según se han mantenido inactivos, por mayor o menor lapso, desde la época de sus últimas erupciones mayores hasta el presente.

(\*) Véase KARZULOVIC K.J. (1980, Ob.cit).

(iv) De acuerdo con lo recién expuesto, los conos volcánicos sobrepuestos en el plateau riolítico TV contienen diferentes secuencias de rocas volcánicas según la época en que ellas fueron eruptadas; y tal situación, muy importante respecto de permeabilidades relativas, se destaca con Lámina 2a que se comenta en la sección 4.2 siguiente.

(v) En el Terciario Medio a Superior, cuando estaba ya plenamente configurado el plateau riolítico TV, actuaron procesos geológicos erosivos que modelaron depresiones de valles profundizando el mismo plateau y de esa época provendrían los antecesores primarios de las depresiones ocupadas ahora por las lagunas de Chungará y de Cotacotani, como también por el Río Lauca abajo de Ancochalloane.

(vi) Las grandes erupciones del Terciario Superior al Cuaternario sepultaron, bajo rellenos de lavas y de flujos de piroclásticos, amplias extensiones del plateau riolítico TV y de las antiguas redes de drenaje establecidas anteriormente en el mismo plateau; por su parte esas lavas y flujos de piroclásticos, como también los conos construídos a través de erupciones centralizadas, modificaron extraordinariamente el paisaje previo y aislaron, en un antiguo valle que comprendería desde Laguna Chungará hacia el Oeste, las actuales lagunas de Chungará y de Cotacotani.

(vii) Todo lo anterior implica que las lagunas que interesan son geológicamente muy nuevas y que prácticamente recién se están desarrollando los procesos naturales con los cuales, finalmente, se produciría un expedito drenaje de superficie, hacia Río Lauca abajo, de las lagunas de Cotacotani y de las Ciénagas de Parinacota que en la actualidad son todavía deficientemente desaguadas por el Río Desaguadero y su prolongación en el Río Lauca.

#### 4.2 Unidades de rocas

Quedan señaladas sobre Lámina 2a de escala 1:20.000 y consisten, en forma prácticamente exclusiva, de volcanitas de composiciones en algunos casos andesíticas y en otros riolíticas que han sido producidas desde el Terciario Medio al Superior hasta el Cuaternario Reciente u Holoceno y se presentan, por lo general, entrecruzadas por fracturamientos repetidos.

Estas unidades de rocas quedan reseñadas en el Cuadro 1 (\*) de pg siguiente e incluyen, con características propiamente de rocas, lavas francas, tobas soldadas o ignimbritas y asimismo domos o tapones resultantes del enfriamiento, en el interior de los conductos emisores que ahora los contienen, de materiales originalmente fundidos en la época de la correspondiente erupción. Por otra parte incluyen, además, flujos de cenizas y de arenas piroclásticas los cuales pueden presentar, a lo menos parcialmente, características propias de las unidades de suelos que se describen en sección 4.3 .

Las volcanitas que componen las unidades de rocas del área investigada tienen permeabilidades principalmente desarrolladas según fracturas abiertas aunque, principalmente para lo concerniente a flujos de cenizas y arenas piroclásticas, pueden manifestar porosidades altas debido a huecos entre las partículas componentes del material de la Unidad correspondiente.

Las fracturas han sido mayormente controladas por procesos primarios ligados a la formación de la roca, por procesos tectónicos que afectaron el material ya consolidado o litificado a roca y por procesos de intemperización posteriores.

Las fracturas primarias han resultado principalmente debido a contracciones de enfriamientos y al escape de gases durante la consolidación de las coladas más ricas en gases o vapores; son muy notables en las lavas francas, especialmente en las lavas aa o fragmentosas como también algo menos en las lavas de bloques, y comparativamente poco importantes en las tobas soldadas y domos o tapones; mientras, en los flujos de piroclásticos, no tendrían relevancia.

(\* En proporción importante, en cuanto a las secuencias cronológicas, conforme a KATSUI Y. y GONZALEZ F.O. (1968, ob.cit.)

CUADRO 1 CLASIFICACION Y CALIFICACION UNIDADES DE SUELOS Y DE ROCAS

PERMEABILIDAD RELATIVA

UNIDADES DE SUELOS

CUATERNARIO	PLEISTOCENO - HOLOCENO
CUATERNARIO	HOLOCENO
CUATERNARIO	PLEISTOCENO
TERCIARIO	



QR

Arenas y gravas arenosas con aguas subterráneas en o cerca superficie y desarrollo de vegas o bofedales.  
 Incluye cenizas volcánicas, especialmente en las áreas más bajas; y bloques, particularmente en áreas más altas.  
 Baja capacidad de soporte y mala calidad como suelo de fundación.

MEDIANA A ALTA



Qa

Idem Unidad Qr, pero con niveles de aguas subterráneas a más de 2 m bajo superficie.  
 Mediana capacidad de soporte y regular calidad como suelo de fundación.

ALTA

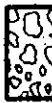


Q1

Arenas finas y limos de ambiente lacustre con alta humedad  
 Baja capacidad de soporte y deficiente calidad como suelo de fundación.

BAJA

UNIDADES DE ROCAS



QV1

Lavas andesíticas fragmentosas o aa o escoriáceas.  
 Mala calidad física y deficiente calidad geomecánica.

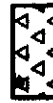
MUY ALTA



QV2

Flujos de piroclásticos andesíticos con abundante arena y cenizas volcánicas  
 Mala calidad geomecánica.

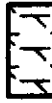
ALTA A MUY ALTA



QV3

Lavas andesíticas de bloques o con fracturas abiertas espaciadas  
 Bloques macizos y de buena calidad geomecánica.

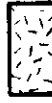
ALTA



QV4

Lavas y piroclásticos andesíticos del Volcán Paríacota.  
 Fracturas repetidas y regular calidad geomecánica.

MEDIANA A ALTA



QV5

Tobas soldadas y flujos de cenizas riolíticas.  
 Fracturas repetidas e irregular calidad geomecánica: buena en tobas soldadas y deficiente en flujos.

MEDIANA



QV6

Domos andesíticos tipo tapones volcánicos.  
 Macizos y de buena calidad geomecánica.

BAJA



QV5

Lavas andesíticas y piroclásticos del Volcán Ajoaya.  
 Fracturas repetidas y regular a buena calidad geomecánica.

BAJA A MEDIANA



QV6

Lavas andesíticas del Volcán Guanaguane.  
 Fracturas repetidas y regular a buena calidad geomecánica.

BAJA A MEDIANA



TV

Plateau riolítico terciario.  
 Fracturas repetidas y regular a buena calidad geomecánica.

BAJA

Las fracturas asociadas a procesos tectónicos son más notables mientras más antigua la unidad de rocas que se considere y de tal manera que, en la zona investigada, el fracturamiento por tectonismo es notorio en la Unidad TV del Terciario, poco importante en los materiales estimados del Pleistoceno y prácticamente no significativo en las unidades del Holoceno.

En el área del estudio se aprecia relativamente poco importante la intemperización de naturaleza química y la cual, por lo común, tiende a rellenar fracturas originalmente abiertas. Pero se observa muy destacada la intemperización física, principalmente por oscilaciones térmicas fuertes entre el día y la noche como también por presiones debido a congelamientos de aguas en fracturas, de forma que existe a nivel regional un fracturamiento o fragmentación que afecta a todas las unidades con características de rocas y cuyos efectos, cada vez más intensos según se incrementa la altitud del relieve observado, se extienden habitualmente hasta no menos de 20 m desde la superficie de los afloramientos actuales.

Importa precisar que, en general, las fracturas abiertas que pueden originar infiltraciones de aguas desde la superficie y movilizaciones de aguas subterráneas en el subsuelo rocoso fracturado, son gradual y habitualmente menos repetidas en la medida que se examinan rocas más viejas del área investigada; de manera que y sin perjuicio de corresponder la Unidad QV4' a una de baja permeabilidad en fracturas abiertas debido a su modo de formación, la secuencia correlativa de permeabilidades relativas del Cuadro 1 es la siguiente :

Unidad	Permeabilidad relativa en fracturas
QV1 Andesitas	Muy alta
QV2 Andesitas	No aplicable
QV3 Andesitas	Alta
QV4 Andesitas	Mediana a alta
QVr Riolitas	Mediana
QV4' Andesitas	Baja
QV5 Andesitas	Baja a mediana
QV6 Andesitas	Baja a Mediana
TV Riolitas	Baja

Resulta igualmente conveniente señalar que entre los dos tipos de rocas prevalecientes en cuanto a naturaleza mineralógica, andesitas por una parte y riolitas por la otra, ocurren diferencias notorias de composiciones químicas que influirán en las aguas subterráneas radicadas o con trayecto en uno u otro tipo de roca.

Según análisis expuesto por KATSUI Y., GONZALEZ F.O. (1968,ob. cit), las rocas principales del área aquí examinada tendrán las composiciones de comparación siguientes :

Unidad de la muestra Composición	T V (1)	QVr (2)	QV1 (3)	QV3 (4)	QV3 (5)	QV4 (6)	QV5 (7)
Si O <sub>2</sub>	70,28	73,02	57,05	62,33	59,49	61,74	58,66
Ti O <sub>2</sub>	0,31	0,21	1,06	0,90	1,06	0,86	0,84
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,67	13,99	17,66	17,05	17,77	16,47	17,62
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,86	1,20	2,15	1,88	1,98	2,35	4,19
Fe O	0,57	0,26	4,26	2,39	3,54	2,68	2,07
Mn O	0,04	0,04	0,20	0,13	0,15	0,12	0,14
Mg O	0,64	0,40	3,41	2,51	3,10	2,68	2,38
Ca O	1,54	1,00	6,48	4,64	5,15	4,61	6,72
Na <sub>2</sub> O	3,95	3,81	4,11	4,07	4,05	4,32	2,84
K <sub>2</sub> O	4,33	4,92	2,56	2,96	2,82	3,10	2,25
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,12	0,09	0,40	0,32	0,41	0,33	0,31
H <sub>2</sub> O (+)	1,12	0,54	0,42	0,50	0,16	0,77	0,55
H <sub>2</sub> O (-)	0,69	0,50	0,10	0,06	0,13	0,23	0,24
<b>Total %</b>	<b>100,12</b>	<b>99,98</b>	<b>99,86</b>	<b>99,74</b>	<b>99,81</b>	<b>100,26</b>	<b>99,81</b>

- (1) Plateau riolítico Costa Sur de Laguna Chungará
- (2) Río Lauca frente Huntume y en sector occidental del valle
- (3) Faldeos Sur del Parinacota
- (4) Laguna de Cotacotani
- (5) Laguna de Cotacotani
- (6) Ladera Sur del Parinacota
- (7) Ladera Nornoroeste del Volcán Ajoya.

Respecto de los contenidos químicos de las unidades de rocas del área investigada, interesa examinar lo concerniente a tres elementos menores que suelen aparecer en las aguas altiplánicas del Norte de Chile y los cuales corresponden a boro, flúor y arsénico.

Los tres elementos se producen corrientemente durante erupciones volcánicas y por este único hecho podrían ser potencialmente importantes en las aguas provenientes desde el Volcán Guallatire y el Volcán Parinacota; en el primer caso por efectos de fumarolas reconocidamente permanentes del Guallatire y, en el segundo, según fumarolas observadas por GONZALEZ F.O. (1972, ob.cit.) al Suroeste y cerca del cráter Parinacota.

También se producirían los elementos citados en actividades termales altiplánicas y ello resultaría válido, de modo local, para dos pequeñas vertientes cercanas al Retén Chucullo y que si bien de temperaturas relativamente bajas, deben suponerse termales; correspondiendo ellas a la Vertiente Untupujo y Vertiente Chungarilla marcadas sobre Lámina 2a de escala 1:20.000.

El porcentaje de boro de las rocas riolíticas es habitualmente muy superior al de las rocas andesíticas y cabe suponer que los sectores de unidades TV y QVr pueden aportar los principales porcentajes en dicho elemento de las aguas que preocupan.

El flúor suele aparecer estrechamente relacionado con los minerales fosfatados de las rocas ígneas y de forma que, únicamente en razón de sus mayores contenidos de ( $F_2O_3$ ) indicados con pg 28 del presente texto, las rocas andesíticas permitirían superiores aportes de flúor en comparación con las rocas riolíticas del área estudiada.

El arsénico debería suponerse, conforme a la experiencia del autor principal de este trabajo, esencialmente ligado a volcanismo activo o muy reciente y particularmente conectado a rocas andesíticas antes que riolíticas.



#### 4.3 Unidades de suelos

Aparecen sectorizadas en Lámina 2a de escala 1:20.000 y reseñadas en el cuadro 1 de pg 26 del presente texto. Incluyen, en la lámina de referencia, las unidades siguientes principales (\*) :

Arenas y gravas arenosas saturadas en o cerca de la superficie	Qr
Arenas y gravas arenosas con aguas subterráneas más profundas	Qa
Arenas finas y limos de ambiente lacustre con alta humedad	Q1

Todas las unidades de suelos recién señaladas contienen porcentajes importantes de cenizas volcánicas pulvulentas y éstas representarían aportes, en partes acumulados directamente por el viento y también como lavados o arrastres coluviales, asociados a erupciones de cenizas riolíticas ocurridas particularmente durante el Pleistoceno y el Terciario Superior.

Las unidades Qr y Qa muestran frecuentes bloques dispersos que se localizan, con mayor frecuencia, en las tierras comparativamente más altas; mientras, los correspondientes contenidos de cenizas, tienden a ser más abundantes en las tierras comparativamente más bajas.

Las unidades de suelos tendrían espesores relativamente pequeños en el área cubierta por Lámina 2a y de modo que sus máximas potencias resultarían en el rango de unos 25 m. Por otra parte, aunque estarían especialmente rellenando depresiones intercaladas entre las lavas andesíticas aa de la Unidad QV3, serían de espesor francamente delgado en el fondo de la Laguna Chungará y de manera que dicho fondo, a menudo, expondría unidades de rocas antes que de suelos. Alcanzarían espesores muy irregulares en las depresiones del conjunto de Lagunas de Cotacotani y allí podrían tener potencias de hasta los 25 m antes indicados; mientras, en las Ciénagas de Parinacota, resultarían nuevamente delgados aunque mayores que en el fondo de Laguna Chungará.

En los sectores de Cotacotani y de las Ciénagas de Parinacota, las unidades Qr y Qa manifestarían perfiles verticales caracterizados por alternaciones entre capas granulares comparativamente gruesas y estratos francamente de granulometría fina, del tipo de arenas finas y limos netos, de permeabilidad muy reducida. De manera que, en general, los acuíferos radicados en dichas unidades Qr y Qa serían habitualmente someros ya que, a pocos m desde la superficie, aparecerían limitados por esos estratos de granulometría fina prácticamente impermeables.

(\*) Importa agregar que las unidades de rocas del área investigada presentan, frecuentemente, escombreras de faldeos que son por lo común de sólo algunos m de espesor, tienen características propias de suelos y resultan especialmente notables en la Unidad QV3.

#### 4.4 Tectonismo y volcanismo cenozoico

El tectonismo cenozoico del área altiplánica que interesa, aparece muy estrechamente relacionado con la actividad volcánica que originó las diversas unidades de rocas reseñadas en sección 4.2 del presente texto y de manera que ambos fenómenos deben comentarse en un contexto interdependiente.

El tectonismo cenozoico incluye tres ciclos más o menos bien definidos y los cuales, conforme a KATSUI Y. GONZALEZ F.O. (1968, ob.cit), serían los siguientes :

Tectónica de bloques pliocena-pleistocena inferior  
Fracturamiento postplioceno asociado al neovolcanismo andesítico  
Fallas de colapso de calderas volcánicas

La tectónica de bloques se produjo según hundimientos y sollevamientos a lo largo de fallas regionales, de rumbos preferenciales Norte 20 a 30° Oeste, en muchas de las cuales se desarrollaron extraordinarias erupciones de fisuras que originaron el plateau riolítico correspondiente a la Unidad TV de Láminas 2 y 2a del presente informe. Esta tectónica, presumiblemente con varios ciclos intermitentes o de mayor y menor activamiento, se prolongó por gran parte del Terciario y habría culminado a fines del Terciario Superior; de modo que afectó particularmente el plateau riolítico TV, aparenta haber sido muy poco notable en las unidades QV6 - QV5 de Lámina 2a y no tendría expresión en las unidades de rocas QV4' a más nuevas. Es probable, por otra parte, el que una falla notable de dicha tectónica de bloques cruce la Laguna Chungará, hacia su borde occidental, con paso aproximado entre la desembocadura del Río Chungará y el extremo Noroccidental de la misma laguna.

El fracturamiento postplioceno ocurrió especialmente en el Cuaternario Inferior o Pleistoceno y se tradujo principalmente en fallamientos de rumbos cercanos a Norte 30° Este; como asimismo en un volcanismo intenso, de naturaleza predominantemente andesítica, el cual fue fundamentalmente de erupciones por conductos centralizados y construyó los grandes conos indicados sobre Lámina 1 de pg 12 de este texto.

Las fallas de colapso ocurrieron esencialmente entre fines del Pleistoceno e inicios del Holoceno, representaron probablemente una culminación del volcanismo ligado al fracturamiento postplioceno y se asociaron a erupciones póstumas, explosivas y violentísimas del tipo Krakatoa, las cuales originaron calderas volcánicas como las correspondientes, en Lámina 2, a los volcanes Lauca y Ajoya.

Las recién mencionadas fallas de colapso constituyeron las últimas manifestaciones de tectonismo relevante en la zona altiplánica investigada y de manera que el volcanismo posterior, o reciente, ha quedado restringido a los centros más orientales y cuales particularmente el Guallatire por el Sur y el conjunto Parinacota-Pomerape por el Norte.

Los volcanes de referencia deben estimarse en todo caso con actividad latente muy importante y de modo que el riesgo de erupciones violentas o de gran envergadura, especialmente en el Parinacota y en el Guallatire, es efectivamente alto y permanente. Sin perjuicio, lo anterior, del hecho de que erupciones violentas del Guallatire tendrían escaso significado respecto de las actuales obras del Canal Lauca y de que las erupciones violentas potenciales, del Parinacota, afectarían principalmente los faldeos del cono correspondiente a semejanza de las coladas y flujos identificados como unidades QV1 y QV2 en Lámina 2a; pero, interesa destacar que cualesquiera erupción más o menos notable del Parinacota presentaría un elevado como asimismo muy rápido aporte de aguas, a las lagunas de Chungará y de Cotacotani, derivado del derretimiento acelerado, por efecto del calor de la erupción, del campo de nieves ilustrado por Lámina 2a.

#### 4.5 Reseña geológica del Río Lauca abajo Bocatoma Canal

Queda indicada en Lámina 1a de pg 16 de este texto en la cual, a objeto de resaltar la red de drenaje, se ha exagerado la amplitud de los suelos cuaternarios de fondos de valle y señalados Qi en la misma lámina.

Abajo de Bocatoma Canal Lauca se encuentran unidades de rocas volcánicas equivalentes a sus similares de Lámina 2a, pero se destaca claramente una mayor relevancia y extensión areal de las unidades riolíticas QVr y TV.

La Unidad QVr se encuentra en gran parte directamente encima del plateau terciario TV y es portadora de aguas subterráneas que tienden a disponerse en el contacto, entre ambas unidades, debido a la menor permeabilidad relativa de los materiales TV respecto de aquellos que componen la Unidad QVr más nueva. De acuerdo con esto cabe esperar y efectivamente así ocurre, alumbramientos de vertientes numerosas aunque generalmente de pequeños caudales individuales en ese contacto y de manera que ellos justificarían sectores vegasos, en el fondo del valle del Río Lauca, los cuales se reconocen repetidamente desde la Bocatoma Canal Lauca hasta poco abajo de la confluencia del Lauca con el Río Ancochalloane.

Lo anterior permite explicar además el hecho de que el Río Ancochalloane, pese a su hoya hidrográfica relativamente importante, se presente normalmente seco en los períodos avanzados del estiaje y sólo disponga de aguas de superficie significativas en el transcurso del período de precipitaciones estivales o del Invierno Boliviano. La explicación radica en que el valle del Ancochalloane corta casi exclusivamente a través de la Unidad QVr cuya permeabilidad general, aunque mediana, resulta suficiente para una importante infiltración de sus aguas de superficie.

La Lámina 1a que se comenta señala adicionalmente, en forma sólo lo groseramente aproximada, el trazado del Canal Lauca abajo de Bocatoma Canal y que está más o menos bien ubicado, directamente al frente de la confluencia Lauca - Ancochalloane, con el propósito de evaluar una alternativa bastante atractiva de captación de mayores recursos de aguas, para el Canal Lauca, radicada inmediatamente abajo de la confluencia de referencia y que requeriría una impulsión de unos 800 m y una elevación mecánica en el rango de 100 m verticales para entregar directamente al Canal Lauca.

CUADRO 2 ANALISIS QUIMICOS AGUAS DE SUPERFICIE CUENCAS CHUNGARA-COTACOTANI-RIO LAUCA  
UBICACION MUESTRAS 15 - 16 EN LAMINA 1a Y MUESTRAS RESTANTES EN LAMINA 2a

Muestra	A	B	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fecha muestreo	24.2.80	13.3.80	25.11.80	25.11.80	25.11.80	25.11.80	25.11.80	25.11.80	26.11.80	26.11.80	26.11.80	26.11.80
pH	8,65	9,20	6,50	6,15	9,30	6,00	6,40	9,10	6,95	7,30	7,40	8,20
Total sólidos disueltos ppm	972,00	471,00	213,00	68,00	1.070,00	172,00	240,00	120,00	451,00	638,00	516,00	765,00
Dureza total CaCO <sub>3</sub>	488,00	234,00	88,00	10,50	472,00	72,00	77,00	42,00	220,00	318,00	263,00	271,00
Dureza carbonatosa CaCO <sub>3</sub>	366,00	166,00	54,00	6,10	356,00	72,00	77,00	42,00	179,00	216,00	198,00	210,00
Dureza no carbonatosa CaCO <sub>3</sub>	122,00	68,00	34,00	4,40	116,00	0,00	0,00	0,00	41,00	102,00	65,00	61,00
Alcalinidad total CaCO <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	83,00	82,00	50,00	-	-	-	-
Sulfatos SO <sub>4</sub>	373,00	172,00	55,00	5,10	410,00	5,90	26,00	25,00	125,00	219,00	150,00	151,00
Cloruros Cl	62,00	28,00	6,40	4,50	73,00	4,50	22,00	5,90	25,00	40,00	31,00	29,00
Bicarbonatos HCO <sub>3</sub>	377,00	71,00	66,00	7,30	137,00	101,00	100,00	22,00	218,00	264,00	242,00	247,00
Carbonatos CO <sub>3</sub>	34,00	64,00	0,00	0,00	146,00	0,00	0,00	19,00	0,00	0,00	0,00	4,50
Hidróxidos OH	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nitratos NO <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sílice SiO <sub>2</sub>	7,90	28,00	66,00	43,00	4,3	68,00	71,00	13,00	57,00	38,00	39,00	38,00
Calcio Ca	49,00	26,00	17,00	3,50	29,00	13,00	20,00	11,00	27,00	35,00	31,00	31,00
Magnesio Mg	89,00	41,00	11,00	0,50	97,00	9,50	6,50	3,50	37,00	56,00	45,00	47,00
Sodio Na	140,00	62,00	14,00	2,80	165,00	11,00	28,00	20,00	50,00	76,00	60,00	56,00
Potasio K	30,00	14,00	3,00	2,40	30,00	1,80	4,00	0,80	6,40	13,00	9,20	12,00
Litio Li	0,26	0,12	0,02	0,02	0,28	0,06	0,08	0,06	0,12	0,14	0,12	0,12
Hierro Fe	0,10	0,10	-	-	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10
Manganeso Mn	0,10	0,10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Cobre Cu	-	-	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
Arsénico As	< 0,05 (*)	< 0,05 (*)	(*) < 0,05	(*) < 0,05	(*) < 0,05	(*) < 0,05	(*) < 0,05	(*) < 0,05	(*) < 0,05	(*) < 0,05	(*) < 0,05	(*) < 0,05
Boro B	0,86	0,18	0,05	0,05	1,3	0,20	0,05	0,10	0,30	0,60	0,60	0,70
Fluor F	2,80	1,50	0,38	0,10	3,8	0,90	4,60	5,10	1,60	1,80	1,90	1,60
Anh. Carbónico libre CO <sub>2</sub>	15,00	-	80,00	9,50	-	160,00	70,00	-	-	-	18,00	-

(-) No analizado

(\*) Valor aparentemente bajo pero en proceso de confirmación mediante análisis cuantitativos de gran precisión.

11	C	12	13	D	E	F	14	15	16	Identificación Muestras
6.11.80	24.1.80	26.11.80	26.2.80	24.2.80	24.2.80	24.11.80	26.11.80	23.11.80	23.11.80	
8,15	8,75	8,50	8,36	6,05	6,20	7,95	8,30	8,20	6,75	M - A Laguna Chungará en Molo Impulsión Canal Chungará
571,00	319,00	586,00	585,00	117,00	80,00	757,00	505,00	506,00	150,00	M - B Laguna Chungará en Molo Impulsión Canal Chungará
299,00	185,00	331,00	329,00	42,00	23,00	206,00	252,00	267,00	11,00	M - 1 Río Chungará en desembocadura L, Chungará
225,00	145,00	242,00	245,00	42,00	18,00	206,00	206,00	218,00	11,00	M - 2 Vertiente Mal Paso en desembocadura Chungará
74,00	40,00	89,00	84,00	0,00	5,00	0,00	46,00	49,00	0,00	M - 3 Laguna Chungará en extremo Noroccidental
-	-	-	-	43,00	-	298,00	-	-	28,00	M - 4 Laguna 1; 800 m al Norte M-3
170,00	85,00	181,00	178,00	13,00	13,00	99,00	139,00	141,00	16,00	M - 5 Laguna Media Luna 2,500 m al Norte M-3
32,00	11,00	35,00	33,00	2,80	3,30	149,00	39,00	32,00	7,10	M - 6 Laguna Sin Nombre 2,900 m al Norte M-3
269,00	121,00	266,00	261,00	52,00	22,00	364,00	227,00	256,00	34,00	M - 7 Laguna Guacolla, 600 m al Oeste M-6
2,40	28,00	14,00	19,00	0,00	0,00	0,00	12,00	3,90	0,00	M - 8 Laguna Guacolle 1. 600 m al Oeste M-7
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	M - 9 Laguna Guacolle 2, 450 m al Noroeste M-8
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	M - 10 Laguna Sola, 1,200 m al Suroeste M-9
31,00	42,00	26,00	30,00	57,00	36,00	59,00	29,00	30,00	76,00	M - 11 Desague Laguna Cotacotani Chica.
39,00	43,00	52,00	51,00	11,00	7,00	56,00	38,00	41,00	3,50	M - C Laguna Cotacotani Principal
49,00	19,00	49,00	49,00	3,50	1,50	16,00	33,00	40,00	0,50	M - 12 Bocatoma Cotacotani
60,00	27,00	60,00	62,00	6,80	3,50	180,00	64,00	58,00	19,00	M - 13 Río Lauca en Ungalliri
12,00	4,80	9,00	8,80	0,60	2,40	10,00	8,10	8,00	3,40	M - D Vegas de Parinacota
0,12	0,06	0,14	0,14	0,05	0,05	0,46	0,14	0,12	0,02	M - E Vegas de Parinacota
0,10	0,10	0,10	0,10	1,50?	0,20	0,10	0,10	0,10	0,10	M - F Vegas de Chucullo
-	-	-	-	0,10	0,10	-	-	-	-	M - 14 Bocatoma Canal Lauca en Río Lauca
0,05	-	0,05	0,05	-	-	-	0,05	0,05	0,05	M - 15 Canal Lauca frente Huntume (Juan de la Cruz)
(*)<0,05	<0,05(*)	(*)<0,05	(*)<0,05	<0,05(*)	<0,05(*)	0,80	(*)<0,05	(*)<0,05	(*)<0,05	M - 16 Río Lauca en Huntume (Juan de la Cruz)
0,30	0,30	0,70	1,30	0,05	0,05	8,00	1,60	1,20	0,70	
1,50	1,20	2,40	2,40	0,28	0,10	0,10	1,80	1,70	0,19	
-	0,40	-	-	95,00	28,00	0,80	-	-	34,00	

## 5. EVALUACION HIDROQUIMICA E HIDROGEOLOGICA

### 5.1 Evaluación hidroquímica

El Cuadro 2 que enfrenta esta página expone los resultados de 22 análisis químicos efectuados, en el Laboratorio del Instituto de Investigaciones Geológicas de Santiago, sobre otras tantas muestras de aguas de superficie extraídas por personal profesional de la oficina Juan Karzulović K. en las cuencas altiplánicas que preocupan.

Del total de referencia 6 corresponden al ciclo de análisis químicos desarrollado por la instancia 1 del Estudio del Plan Maestro del Sistema de Regadío Valle de Azapa (\*) y ellas son indicadas A-B-C-D-E-F en el Cuadro 2; con inclusión de una, la M-B, extraída personalmente por el Ingeniero Jefe Coordinador del Estudio del Plan Maestro señor Sergio Rivera A. Las 16 muestras restantes, denominadas M-1 a M-16 según un orden correlativo convencional de aguas arriba hacia aguas abajo, fueron extraídas y ensayadas específicamente para el presente trabajo.

Aunque están disponibles numerosos análisis químicos previos de las aguas que interesan, principalmente según los trabajos de NIEMEYER (1964), VASQUEZ C.A. (1978) y ZUMAETA D.O. (1976) citados en pgs 7-8 de este texto, dichos análisis previos son menos completos que los ahora entregados y por tal razón se han descartado para la evaluación hidroquímica actual.

Si bien un examen rápido de los resultados proporcionados por Cuadro 2 sugiere que las composiciones químicas de las aguas altiplánicas examinadas son francamente anárquicas, más todavía debido a fluctuaciones notables de tales composiciones en muestras de un mismo lugar extraídas en fechas diferentes, un examen más acucioso permite deducir algunas conclusiones importantes para los objetivos del presente texto y cuales las principales siguientes :

(i) La gran diversidad de composiciones químicas de las aguas analizadas, tanto entre aguas contemporáneas de diferentes sectores como entre aguas extraídas en fechas diferentes de un mismo sector, dice relación con las condiciones expuestas a continuación que ocurren en el área altiplánica investigada:

(\*) KARZULOVIC K.J. (1980, ob.cit)

Las aguas de superficie muestreadas corresponden a mezclas, constantemente variables, de aguas propiamente de superficie o con escasa a nula infiltración previa en el subsuelo y de aguas subterráneas que experimentaron, antes de sus alumbramientos en los sitios muestreados, recorridos de sub superficie más o menos largos a través de materiales geológicos más y menos diferentes en sus composiciones químicas.

El área examinada tiene acciones de termalismo y de volcanismo latentes las cuales, sin ninguna duda, afectan ciertos sectores y son prácticamente irrelevantes en otros; de modo que, particularmente en lo concerniente a los valores de anhídrido carbónico disuelto, aguas de lugares muy próximos pueden resultar extraordinariamente diferentes.

En la medida de sus recorridos pendiente abajo, las aguas tanto de superficie como subterráneas, sufren fuertes cambios en sus condiciones de equilibrio químico y particularmente respecto del pH y del contenido de anhídrido carbónico; de manera que, a menudo sin nuevos aportes significativos de aguas y como sería el caso del Canal Lauca abajo de su boca-toma en el Río Lauca, se producirían modificaciones notables de composición química según cambian, hacia abajo, condiciones de equilibrio que son poco estables o difíciles de mantenerse por recorridos largos.

La mayor o menor proporción de sólidos disueltos depende notablemente, entre otros factores, de la temperatura del agua que contiene dichos sólidos y es reconocido el hecho de que el área altiplánica investigada presenta muy altas oscilaciones térmicas tanto diarias como estacionales.

(ii) Las tres muestras analizadas de Laguna Chungará, M-A B-3 del Cuadro 2 de referencia, permiten documentar un relativamente alto contenido de sales disueltas al 24.2.80, uno comparativamente muy bajo al 13.3.80 y uno muy alto, respecto de las otras dos, al 25.11.80. De modo que no cabe dudar de las oscilaciones de composición química de Laguna Chungará a lo largo de cada año y ello implica, a su vez, la seguridad de que el vaso de la misma laguna no es en absoluto impermeable; esto último en razón de que, si las pérdidas por infiltración fuesen poco importantes, la tendencia natural sería a una concentración salina creciente a lo largo del tiempo o por lo menos mantenida debido a concentraciones de sales por evaporación.



(iii) Los diferentes pH de las aguas examinadas, con máximos alcalinos de 9,30 y mínimos ácidos de 6,00, reafirman la conclusión básica del presente texto de que las aguas subterráneas de vaciamiento lento son particularmente importantes, en las cuencas altiplánicas que interesan, para lo concerniente al régimen y equilibrio hidrológico de los recursos hídricos locales de superficie. En este aspecto cada pH ácido implica un aporte comparativamente importante de aguas que han experimentado escasa a nula infiltración en el subsuelo o que han circulado, como aguas subterráneas someras, a muy reducida profundidad desde la superficie (\*); mientras los pH alcalinos, crecientemente cuanto mayor el valor del mismo pH, señalarían aportes comparativamente importantes de aguas subterráneas que han recorrido largos trayectos y han perdido gran parte de sus contenidos de anhídrido carbónico disuelto.

De acuerdo con lo recién expuesto vale estimar que son especialmente altas, comparativamente, las alimentaciones de aguas subterráneas de Laguna Chungará, de Laguna Sin Nombre, de Laguna Cotacotani Principal y del Río Desaguadero - Río Lauca entre Bocatoma Cotacotani y Bocatoma Canal Lauca. En tanto, deberían suponerse menos interesantes los aportes subterráneos que ocurren en las ciénagas de Parinacota (\*) y en el Valle del Río Lauca abajo de Bocatoma Canal Lauca (\*\*).

(\*) Sin perjuicio de que podrían ocurrir pH bajos o ácidos asociados a termalismo o volcanismo latente; posibilidad que en todo caso sería rara a juzgar por el pH 7,95 de la muestra M-F correspondiente a Vega de Chucullo y donde existiría una cierta acción termal.

(\*\*) Sin perjuicio de que los aportes subterráneos serían de áreas de recarga relativamente cercanas y no penetrarían a gran hondura, desde la superficie, antes de sus alumbramientos en el Valle del Río Lauca. De modo que el pH final podría ser efectivamente bajo o ácido.

(iv) El contenido de sales disueltas de las aguas analizadas, muy variable y con rangos entre un máximo de 1.070 y un mínimo de 68 ppm de total de sólidos disueltos, se asocia principalmente con lixiviaciones de las unidades de rocas volcánicas andesíticas y en mucho menor proporción con los derivados de rocas riolíticas; esto en razón de que las rocas andesíticas presentan, según datos de pg 28 de este texto, pequeño porcentaje relativo de sílice y mayor contenido de minerales ferromagnesianos; mientras las rocas riolíticas manifiestan alto contenido relativo de sílice y mucho menor proporción de minerales ferromagnesianos. De manera que deben imputarse, principalmente a la lixiviación de las unidades de rocas andesíticas, los valores altos de Magnesio, Calcio, Flúor, Sulfatos, Carbonatos y Bicarbonatos; en tanto que el Boro, Potasio y Sílice serían aportados particularmente por las unidades de rocas riolíticas y el Sodio y Cloruro serían suministrados, sin grandes diferencias, tanto por uno como por otro tipo de rocas volcánicas.

(v) Para fines de utilizaciones en riegos del Valle de Azapa, deben estimarse con algún prejuicio los contenidos de Boro y Flúor de las aguas altiplánicas que preocupan. Esto especialmente en razón de que son recomendables, para las aguas de riego utilizadas permanentemente en todos los tipos de suelos, contenidos no mayores que 1 ppm de boro y 1 ppm de flúor. Los restantes elementos de las aguas que se comentan aparecerían, con la única excepción de los correspondientes a muestra M-F de Vega Chucullo (\*), en valores no perjudiciales e incluso aceptables para aguas destinadas a usos potables directos.

(vi) El problema del boro debe considerarse propio de todas las aguas disponibles en la zona altiplánica investigada, tanto aquellas de las fuentes actualmente explotadas para el Canal Lauca como de fuentes eventuales de nuevas explotaciones; sin embargo los problemas agrícolas potenciales se suscitarían a contar del empleo permanente de aguas con más de 2 ppm de boro y esta condición tendría ocurrencia probablemente rara por cuanto, del total de muestras analizadas, sólo la correspondiente a Vega Chucullo (M-F) que es muy localizada y de escísimo significado, manifestaría más de 2 ppm de boro.

(\*) Se determinó en muestra M-F un contenido francamente objetable de arsénico (0,8 ppm) ; pero debe estimarse de ocurrencia totalmente local y no representativo de las condiciones del conjunto de las aguas que interesan.

Se concluye que, respecto del porcentaje de boro, eventuales nuevas captaciones, para la alimentación suplementaria del caudal del Canal Lauca, no modificarían significativamente la composición de aguas actuales del mismo Canal Lauca.

(vii) El problema del flúor, el cual es de naturaleza menor para los riegos que preocupan en el Valle de Azapa (\*) pero potencialmente importante para las captaciones de aguas subterráneas que suministran el agua potable de la población de Arica (\*\*), se asocia particularmente a los aportes de las lixiviaciones de unidades de rocas andesíticas y por esta única razón será siempre potencialmente alto en Laguna Chungará, algo menor en Laguna Cotacotani Principal y bastante inferior abajo de Bocatoma Canal Lauca.

(\*) Es menor para los fines de riegos debido a que pueden usarse, sin problemas y por largo tiempo, aguas con hasta 15 ppm de flúor si los suelos de cultivos son de textura fina y pH 6,0 a 8,5 ; condiciones, las indicadas, que cumplirían la mayoría de las tierras bajo cultivos en el Valle de Azapa; más todavía si se destaca que el máximo porcentaje de flúor, en el Cuadro 2 de referencia, corresponde a muestra M-6 de Laguna Sin Nombre y es de 5,10 ppm.

(\*\*) Es potencialmente importante, para los suministros de aguas potables de Arica, debido a que las fuentes subterráneas de tales aguas tienen recarga alta por infiltraciones de las aguas de riegos del Canal Lauca y a que el máximo aceptable de flúor en aguas potables es de 1,5 ppm.

## 5.2 Evaluación hidrogeológica

La sección 5.1 anterior permite establecer, sin ninguna duda en opinión del presente texto, el hecho de que las aguas de superficie de las cuencas altiplánicas investigadas se componen en parte importante, para prácticamente cualesquier sector de ellas que se considere, de aportes asociados a los alumbraamientos de aguas subterráneas, de distribución regional o general, las cuales quedan interceptadas en las áreas de tierras bajas o depresiones que cobijan a las aguas de superficie.

Queda también bien definido, en base de los antecedentes hidroquímicos comentados por la sección 5.1 previa, el hecho de que el vaso de Laguna Chungará no puede ser impermeable y debe permitir infiltraciones, de parte de sus aguas de superficie, las cuales abandonan finalmente el área de la laguna y son por consiguiente permanentes.

De acuerdo ahora con la naturaleza geológica de los materiales que componen los terrenos de las cuencas altiplánicas que interesan, es asimismo concluyente la opinión del presente texto en cuanto a que todas las unidades de rocas de dichas cuencas tienen una permeabilidad favorable para la infiltración de aguas de superficie, sean éstas de cuerpos lacustres como los correspondientes a Laguna Chungará y Lagunas de Cotacotani o de escurrimientos; permeabilidad favorable que aparece radicada, esencialmente, en fracturas abiertas que se presentan principalmente en los primeros 25 m, desde la superficie de los afloramientos de las unidades de rocas.

En el total de las unidades de rocas que se reconocen en la zona investigada, las de mayores permeabilidades relativas quedan definidas por las unidades QV1 - QV3; las de menores permeabilidades relativas están representadas por las unidades TV - QV6 - QV5 - QV4<sup>1</sup>; y las de permeabilidades intermedias entre las anteriores, corresponden a las unidades QVr - QV4.

De acuerdo con lo recién expuesto, como también considerando barreras topográficas, se deducen las condiciones relevantes siguientes para los mecanismos de recargas y descargas subterráneas más probables de Laguna Chungará :

(i) Como las rocas prevalecientes de la vertiente oriental de la laguna son rocas de la Unidad TV de baja permeabilidad, los aportes desde dicha vertiente serán fundamentalmente de aguas de superficie, cuales los del Río Chungará, y en menor proporción de aguas subterráneas someras radicadas en relleños cuaternarios permeables que son aquí delgados, están directamente encima de la Unidad TV poco permeable y tienen neta pendiente de escurrimiento desde el Este hacia el Oeste. De manera que es altamente improbable a prácticamente nula, la posibilidad de alguna descarga subterránea de aguas de Laguna Chungará hacia el Este.

(ii) La Costa Suroriental de la laguna mantiene como predominantes las rocas de la Unidad TV y la Costa Noroccidental registra principalmente rocas de la Unidad QV5 asimismo de baja permeabilidad relativa; de manera que aquí se presentan condiciones de recargas semejantes a las existentes en la Costa Oriental y no ocurrirían descargas subterráneas de la misma laguna hacia el Sur o Suroeste (\*).

(iii) La Costa Norte de la laguna está constituida por el imponente cono del Volcán Parinacota y los terrenos correspondientes incluyen unidades de elevada permeabilidad (QV1) y de permeabilidad intermedia (QV4). De manera que las recargas provenientes del Norte serán esencialmente por aguas subterráneas cuyos niveles de saturación, probablemente, son muy próximos en la línea de costa al nivel de aguas de superficie medio anual de la misma laguna (\*\*); por otra parte resulta difícil suponer, debido a la gran altura del cono del Parinacota, alguna posibilidad de descarga subterránea de aguas de la laguna hacia el Norte.

(\*) En este aspecto es realmente remotísima la posibilidad de que exista descarga, como fue estimado en alguna ocasión, desde Laguna Chungará hacia el Río Guallatire.

(\*\*) Situación, la señalada, que permite explicar de forma muy clara la permanencia, casi sin variaciones a lo largo del tiempo, de un nivel no inferior a más o menos la cota de los 4.517 m.s.n m para las aguas de superficie de la laguna. Esto en razón de que durante períodos de precipitaciones menores que las normales anuales, la laguna drena el almacenamiento subterráneo del cono del Parinacota que debe estimarse de vaciamiento lento y sustentado, durante lapsos largos sin precipitaciones, por los deshielos de su campo nevado permanente.

(iv) El extremo Noroccidental de la laguna está obstruido por materiales rocosos de la Unidad QV3 de alta permeabilidad y no existe duda, en opinión del presente texto, de que aquí se encuentra la descarga fundamental, por flujos subterráneos, de Laguna Chungará.

Las rocas de lavas de bloques de la Unidad QV3 de referencia, son equivalentes a las que componen parte importante, conjuntamente con lavas fragmentosas o similares a las de Unidad QV1 de Lámina 2a de este informe, los cierres de aguas abajo de Laguna Invernada y Laguna del Maule en la Cordillera de Los Andes de Talca; en ambos casos con descargas notables de aguas subterráneas provenientes de las mismas lagunas y que fueron reconocidas, mediante numerosos sondeos de ENDESA, en el caso particular de Laguna Invernada. Por otra parte es conocida en diversos territorios extranjeros que contienen rocas volcánicas semejantes a las de Unidad QV3, la gran potencialidad de recursos hídricos subterráneos de las mismas volcanitas; particularmente en Islas Canarias donde, según CUSTODIO E. y LLAMAS M.R. (1976, ob.cit.), el año 1975 existían 543 galerías, con total de 1.195 km excavados en las rocas volcánicas que se comentan, las cuales producían un gasto total equivalente a 2.200 lt/s o con promedio de 1,84 lt/s por ml de galería.

Según todo lo anterior es seguro que ocurren descargas, como flujos subterráneos a través del cierre QV3 de su extremo Noroccidental, desde Laguna Chungará hacia el Noroeste y con restitución natural a las áreas deprimidas del conjunto de Lagunas Cotacotani. La magnitud de estas descargas, como asimismo sus posibles variaciones conforme a depresiones producidas artificialmente en Laguna Chungará, se examinan en sección 5.3 poco más adelante.

El régimen de recargas y descargas subterráneas de Lagunas de Cotacotani implica una importante recarga, independiente de la proveniente de Laguna Chungará, asociada a los faldeos occidentales del Volcán Parinacota y a sus unidades rocosas permeables QV1 particularmente y en menor grado QV4; las recargas subterráneas del Norte y del Sur serían menos notables que las de aguas de superficie de tales sectores; y hacia el Oeste y Suroeste se producirían, fundamentalmente, descargas por flujos subterráneos más o menos someros y parte de los cuales no quedan colectados por la Bocatoma Cotacotani aunque recargan a las Ciénagas de Parinacota.

El régimen de recargas subterráneas entre Bocatoma Cotacotani y Bocatoma Canal Lauca es también de aguas subterráneas relativamente someras o poco profundas; en tanto que las descargas por flujos subterráneos son hacia Río Lauca abajo desde Bocatoma Canal Lauca y tienden a ser colectadas en gran proporción por esta bocatoma por cuanto, muy poco hacia abajo, la sección de descarga favorable se estrecha notablemente.

Río Lauca abajo desde Bocatoma Canal Lauca y hasta la confluencia con Río Ancochalloane, el Valle del Lauca resulta un muy eficiente dren colector de las aguas subterráneas que ocurren en la porción de superficie hidrográfica intermedia correspondiente y de manera que podría estimarse, tal aporte, equivalente a un 5 a 10 % del total de aguas precipitadas en la cuenca intermedia que deba considerarse.

5.3 Cálculos estimativos descargas subterráneas desde Laguna Chungará

Se considera como sección de descarga la de más o menos 500 m de ancho, situada a unos 1.000 m al Sureste del extremo Noroccidental de la laguna, rellena por la Unidad QV3 y limitada, al Suroeste y al Noreste, respectivamente por las unidades QV5 y QV4.

Se supone una gradiente hidráulica de 17:5.000, conforme a diferencia de niveles entre Laguna Chungará (4.517 m.s.n.m) y Laguna Cotacotani Principal (4.500 m.s.n.m) y a una distancia entre ambas de 5.000 m.

La permeabilidad de la Unidad QV3 es alta y se estima, ponderadamente, comprendida entre  $10^2$  m/día la cual es propia de acuíferos de permeabilidad media y  $10^3$  m/día que se corresponde con acuíferos muy permeables. Se supone, además, una carga hidráulica en Laguna Chungará de 30 m.

Conforme con los datos y suposiciones anteriores, resultan descargas comprendidas entre los valores siguientes :

Valor con permeabilidad $10^2$ m/día =	60 lt/s
Valor con permeabilidad $10^3$ m/día =	600 lt/s
Valores probables	250 a 350 lt/s

Ahora y supuesto que se desarrollen depresiones artificiales en Laguna Chungará, cada metro deprimido significaría una disminución de 6 % en el valor de descargas al nivel medio normal de Laguna Chungará (4.517 m.s.n.m); y de forma que una depresión total de 10 m motivaría una descarga natural de más o menos el 40 % de la descarga con nivel medio normal.

Si Laguna Chungará se utiliza como fuente de suministro adicional permanente para mantener altos los caudales del Canal Lauca, los valores anteriores pueden resultar importantes; pero si la utilización de la misma laguna es intermitente, las disminuciones del nivel medio original quedarían en gran parte compensadas por un mayor drenaje natural, hacia Laguna Chungará, de los almacenamientos de aguas subterráneas existentes en las unidades de rocas de sus costados y particularmente de las correspondientes al cono del Volcán Parinacota en su Costa Norte.



Es importante destacar que cualquier ascenso natural importante del nivel medio normal de la Laguna Chungará, induciría incrementos notables de las descargas de aguas subterráneas hacia Laguna Cotacotani; esto en razón de que la más alta permeabilidad de la Unidad QV3 se presenta en la superficie de los afloramientos correspondientes y de que dicha muy alta permeabilidad disminuye gradualmente en hondura. Situación, la señalada, que permite explicar el hecho de que el nivel de aguas de Laguna Chungará difiere escasamente a lo largo del tiempo y corresponde al de un sistema extraordinariamente bien equilibrado; de modo que cuando se rompe dicho equilibrio por aportes anormalmente altos de aguas de superficie, se restablece a través de una muy alta descarga subterránea hacia Cotacotani, en tanto que cuando el equilibrio se rompe por efectos de aportes anormalmente bajos de aguas de superficie, se restablece por un mayor drenaje hacia la misma laguna de los almacenamientos subterráneos disponibles en los terrenos de sus costados y especialmente los correspondientes al cono del Volcán Parinacota.

6. EVALUACION GEOTECNICA CAPTACIONES ACTUALES Y FUTURAS

6.1 Bocatoma Cotacotani

La Laguna Cotacotani cuenta en la actualidad con dos obras de entrega; una ahora en uso que permite fluctuar los niveles de la laguna entre las cotas aproximadas 4.495,5 y 4.499,0 m.s.n.m; y otra, situada 115 m aguas abajo de la anterior, construída el año 1963 con la intención de lograr una mayor fluctuación de niveles y que no ha sido puesta en operación debido a temores respecto de las condiciones de operatividad y de estabilidad de la estructura pertinente (\*).

La puesta en funcionamiento de la obra de entrega de más aguas abajo de Laguna Cotacotani representaría un mejoramiento inmediato de los caudales proporcionados, a través del drenaje de Cotacotani, al Canal Lauca. Esto particularmente en razón de que cualesquier descenso del nivel de toma induciría no solamente una mejor captación de los recursos de aguas subterráneas disponibles en Cotacotani, sino que además provocaría un mayor aporte subterráneo desde Laguna Chungará.

En opinión del presente texto el principal problema, para la recomendada puesta en marcha de la obra de toma que se comenta, radica en que carece de zarpas cortafiltraciones adecuadas y de modo que su operación permanente podría producir fugas subterráneas importantes y probablemente mayores que las originadas por la operación actual de la obra de toma de más aguas arriba. Sin embargo el problema se considera de solución sencilla, aunque de costo alto, mediante la excavación de zanjones apropiados o con profundidades de piso hasta unos 3 m por debajo, del nivel de aguas mínimas que se desee regular, los cuales serían rellenos con concreto o bien con limos arcillosos de la Unidad Q1 que se ubica en el mismo sector conforme a Lámina 2a de este texto.

La disposición y especificaciones finales de los zanjones cortafugas recomendados, requiere previamente los antecedentes de algunas exploraciones de subsuelo como las siguientes :

Cantidad y tipo exploraciones	Presupuesto estimado
	31.12.1981
2.500 ml perfiles geosísmicos	\$ 500.000,00
2.500 ml perfiles geoeléctricos	\$ 200.000,00
30 ml calicatas de hasta 6 m hondura	\$ 150.000,00
<hr/>	
Total presupuesto estimado	\$ 850.000,00

(\*) Véase EDWARDS G.R. : Aprovechamiento Laguna Cotacotani (1980, ob.cit.)

## 6.2 Alternativa de captación de Laguna Chungará

Implica la posibilidad de utilización del actual Canal Chungará-Cotacotani marcado sobre Lámina 2a del presente trabajo, con alimentación mediante bombeo directo desde el sitio correspondiente al Molo indicado por la misma figura o bien desde más aguas abajo cerca del extremo Noroccidental de la laguna. También considera la posibilidad de una aducción gravitacional, mediante túnel, entre Chungará y Cotacotani.

En opinión del presente informe el actual Canal Chungará - Cotacotani no es operable sin que se realicen previamente mejoramientos de alto costo de impermeabilización y sin perjuicio de que su corto tramo en túnel sería prácticamente definitivo y no requeriría trabajos relevantes de mejoramiento. El problema del tramo en canal estriba en que gran parte de sus losetas actuales de revestimiento son demasiado delgadas y débiles, muchas de ellas están ya desajustadas o abiertas y a este momento no impedirían pérdidas realmente muy grandes de cualquier caudal de escurrimiento; por otra parte, los revestimientos actuales no resistirían adecuadamente las presiones que ejercerán sobre ellos congelamientos de aguas de infiltración y sin considerar, adicionalmente, problemas frecuentes en el manejo del canal debidos asimismo a congelamientos.

Cabe agregar, siempre en relación con el aprovechamiento del actual Canal Chungará-Cotacotani, el hecho de que el Molo ya construido en la costa de Laguna Chungará está asentado y dislocado; de modo que no es operable, en su estado actual, para la instalación de los correspondientes equipos de bombeo.

Ahora, en lo concerniente a un eventual túnel de conexión directa y gravitacional entre Laguna Chungará y Laguna Cotacotani, el presente informe estima que es factible pero a un elevadísimo costo representado, especialmente, por la necesidad de suponer el uso de sostenimientos casi permanentes durante las faenas de excavación, de problemas frecuentes de alumbramientos de aguas subterráneas copiosas en los frentes de trabajo, y de revestimientos finales a sección completa en gran parte del recorrido del mismo túnel.

### 6.3 Alternativas de captación del Río Lauca abajo Bocatoma Canal

Conforme con la posibilidad de requerir un mínimo de aducción hasta el Canal Lauca y también con la intención de coleccionar las aguas de una superficie hidrográfica adicional interesante, el presente informe considera dos posibilidades de captación de los recursos hídricos abajo de la Bocatoma Canal Lauca y que son las siguientes :

- (a) Captación en Huntume o Juan de la Cruz
- (b) Captación bajo confluencia Río Lauca-Río Ancochalloane

La alternativa Huntume o Juan de la Cruz significaría una captación por drenes colectores de hasta unos 5 m de hondura en el piso del Valle del Río Lauca y una aducción de unos 500 m de largo, hasta entregar al Canal Lauca, con elevación mecánica de más o menos 100 m verticales. La alternativa dispondría de una hoya intermedia desde Bocatoma Canal Lauca de 74 km<sup>2</sup> y proporcionaría un caudal medio anual estimado de unos 250 lt/s, sin incluir eventuales rebalses desde Bocatoma Canal Lauca.

La alternativa bajo confluencia Río Lauca - Río Ancochalloane, significaría una captación por drenes colectores de hasta 8 m de hondura en el piso del valle del Río Lauca inmediatamente abajo de la confluencia de referencia y una aducción de 800 m de largo, hasta entregar al Canal Lauca, con elevación mecánica de 100 a 120 m verticales. La alternativa dispondría de una hoya intermedia, desde Bocatoma Canal Lauca, de 165 km<sup>2</sup> y proporcionaría un caudal medio anual estimado de 500 lt/s sin incluir eventuales rebalses desde Bocatoma Canal Lauca.

Las dos posibilidades recién comentadas se consideran muy atractivas en el presente informe y más todavía por el hecho de que exigirían un muy corto plazo de construcción y puesta en operación; como también en razón de que no mostrarían desequilibrios ecológicos tan potencialmente importantes como pueden resultar de un descenso permanente del nivel de aguas de Laguna Chungará.

Cabe agregar que para cualesquiera de ambas alternativas resultarían convenientes exploraciones de subsuelo previas como las siguientes :

Tipos y cantidades exploraciones	Presupuesto estimado
	31.12.1981
300 ml zanjas con retroexcavadoras de hasta 7 m de hondura	\$ 900.000,00
1.000 ml perfiles geosísmicos	\$ 120.000,00
1.000 ml perfiles geoelectricos	\$ 100.000,00
7 días bombeo zanjas	\$ 500.000,00
<hr/> Presupuesto total estimado	<hr/> \$1.620.000,00

#### 6.4 Otras alternativas

Se considera atractiva y como complemento que no excluye las otras posibilidades de captaciones ya comentadas, la conexión mediante un túnel de drenaje entre la Laguna Sin Nombre y la Laguna Guacolla señaladas por Lámina 2a de este informe.

Lo anterior requeriría un túnel de más o menos 200 m de largo y de excavación difícil, a semejanza de lo expuesto para un eventual túnel directo Chungará-Cotacotani en pg 47 del presente texto, pero factible.

Se estima posibilidad atractiva, la cual también podría ser con aducción de superficie y elevación mecánica, en base de que Laguna Sin Nombre tendría potencialmente una muy importante recarga natural desde los faldeos occidentales del Volcán Parinacota y aparentemente una deficiente conexión subterránea hacia Laguna Guacolla y restantes lagunas del conjunto Cotacotani.

Esta alternativa precisaría ser definida, a un costo total estimado de \$ 500.000,00 al 31.12.81, mediante bombeos de prueba con duración de 7 días seguidos.

ILUSTRACIONES FOTOGRAFICAS



## FOTOGRAFIA 1

Panorámica del sector de la Estación de Aforo ENDESA, en la desembocadura del Río Chungará a la laguna homónima, del 25.11.80

En primer plano instalaciones de la Estación Aforo mientras al fondo aparece el Volcán Guallatiri (6.060 m), cuyos faldeos septentrionales componen las cabeceras del Río Chungará, con exposición de su penacho de humo que es permanente y por lo común alcanza unos 20 m de diámetro.

Nótese, entre ambos lugares de referencia, una amplia zona aluvional con gravas arenosas de superficie prácticamente saturadas por aguas subterráneas someras y con abundantes bofedales (Qr).



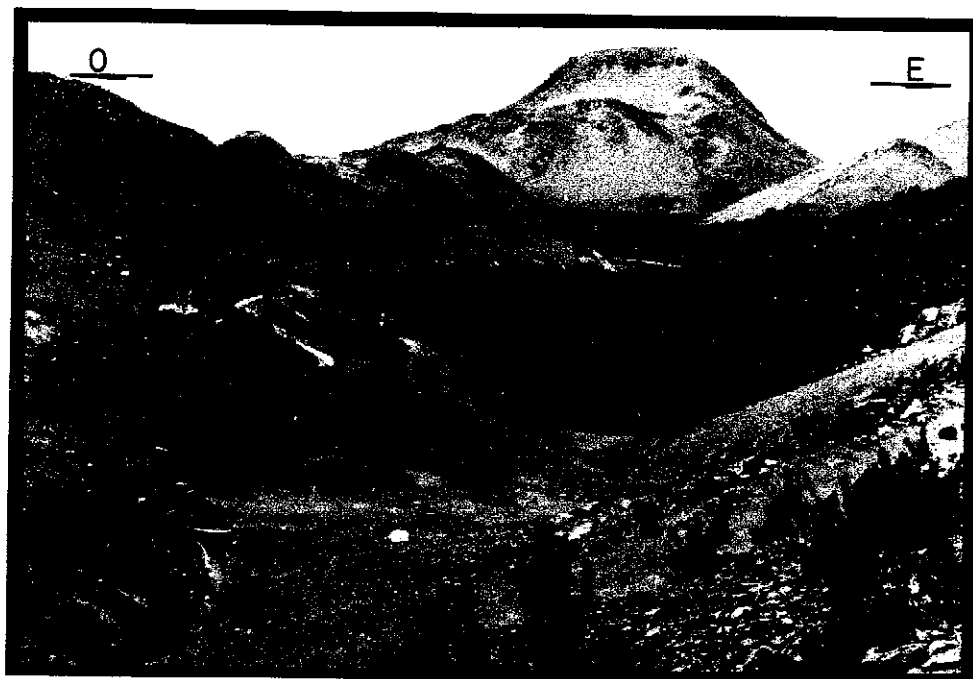


## FOTOGRAFIA 2

Panorámica, desde el Noroeste hacia el Sureste, del angosto brazo Noroccidental de Laguna Chungará y con indicación del sitio correspondiente al km 21,00 del Canal Chungará-Cotacotani marcado sobre Lámina 2a del presente estudio.

Nótese bordes de playas de la laguna, con marcas que revelan oscilaciones de su espejo de aguas las cuales son en todo caso inferiores a 2 m verticales, consistentes de arenas y gravas arenosas con algunos bloques.

Se destacan, al fondo de la fotografía y según situación al 5.9.80, conos nevados correspondientes a la cadena de los volcanes Humarata (5.730 m), Acotango (6.050 m), Capurata (5.990 m) y Guallatiri (6.060 m) ubicados sobre Lámina 1 de este informe.



## FOTOGRAFIA 3

Panorámica, desde el cordón divisorio cruzado por el túnel del Canal Chungará-Cotacotani, hacia la pequeña laguna denominada Media Luna en Lámina 2a del presente estudio y según situación al 5.9.80.

Nótese como el portal de salida del túnel de referencia, al igual que su continuación aguas abajo por canal, están trazados por terrenos comparativamente altos respecto del fondo de quebrada situada al lado derecho u oriental de la fotografía y la cual aparece parcialmente rellena por lavas andesíticas aa, de segura muy elevada permeabilidad, correspondientes a erupciones muy recientes y presumiblemente históricas del Volcán Parinacota que se identifican como Unidad QV1 sobre Lámina 2a de este trabajo.

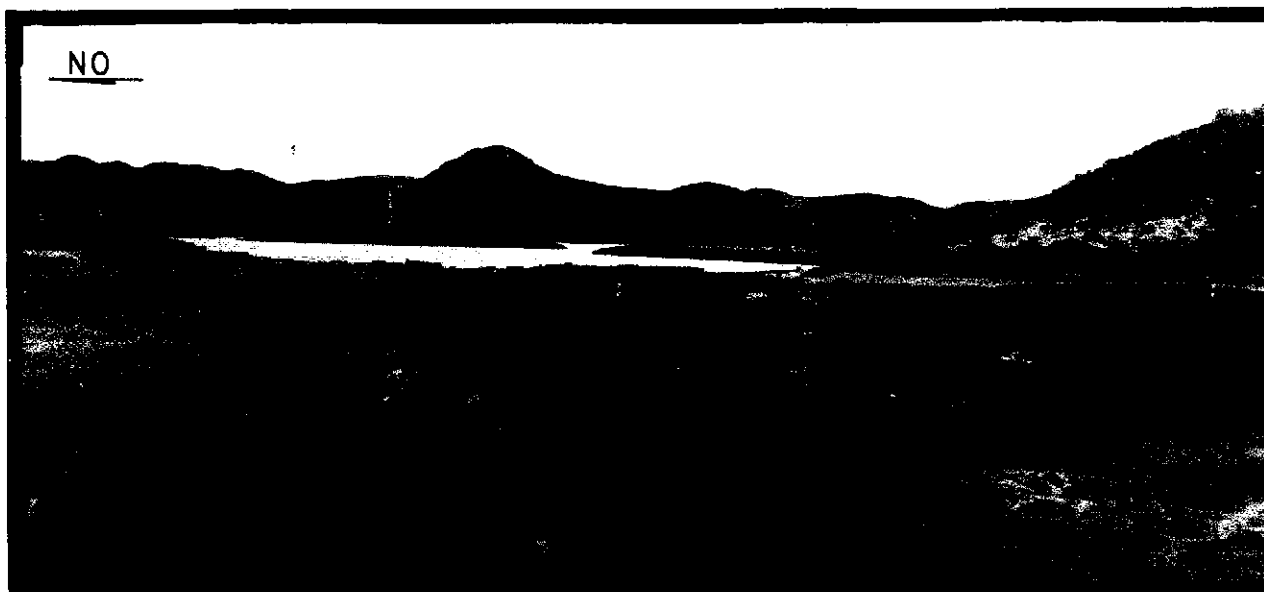
En el costado occidental se marcan volcanitas de bloques y piroclásticos de la Unidad QV3 que es anterior a la Unidad QV1.



FOTOGRAFIA 4

Panorámica de la Laguna Guacolle 1 que recibiría, a través de Laguna Guacolla, las aguas del Canal Chungará-Cotacotani.

Notese amplias extensiones de bofedales Or en las playas laterales de la laguna, como asimismo notese predominio de volcánicas andestíticas de bloques, de la Unidad QV3, en los cordones de serranías mostrados por la fotografía.



## FOTOGRAFIA 5

*Sector de la Bocatoma de Cotacotani que muestra en el extremo derecho de la fotografía a la Laguna Baja y, en el extremo izquierdo, a la porción más occidental de Laguna Cotacotani Principal y junto a la cual se encuentran las obras de la Bocatoma de referencia.*

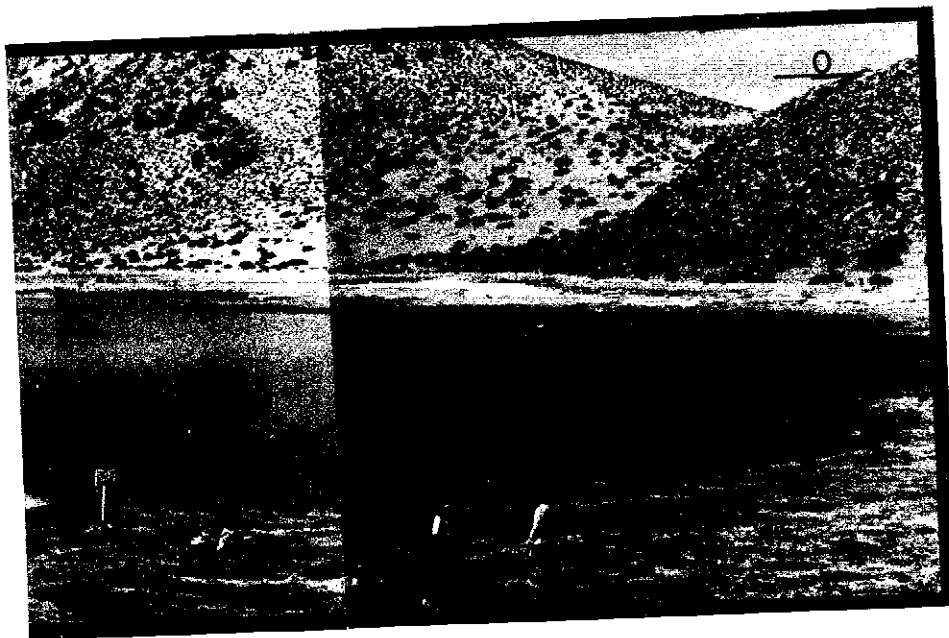
*Entre ambas lagunas citadas se encuentran, a la vista, sedimentos de arenas finas y limos con espesor no inferior a 3 m y que identifican la Unidad Ql de Lámina 2a del presente estudio.*

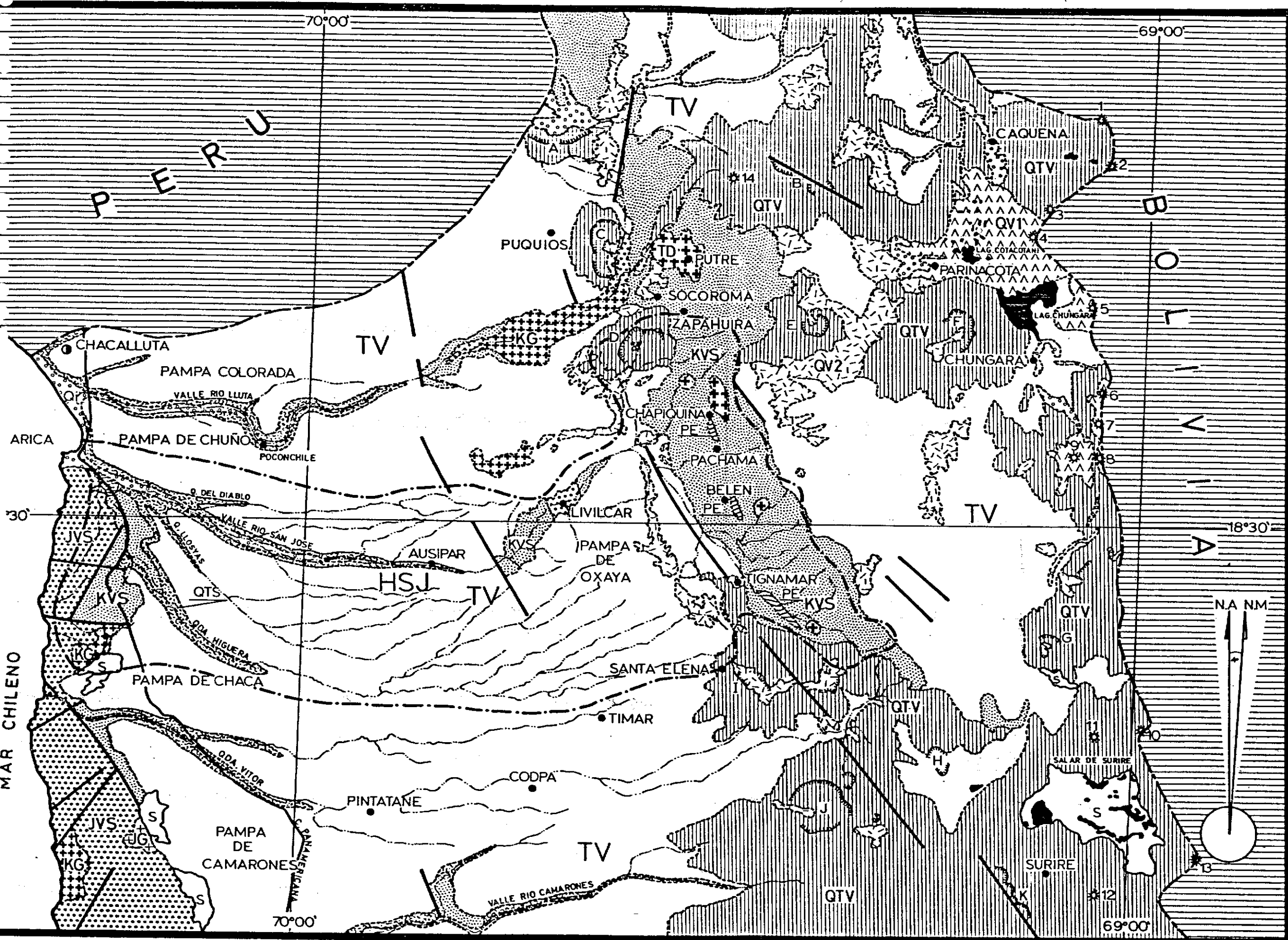
*Al 26.11.80, fecha de la fotografía que se comenta, el espejo de aguas de Laguna Baja se encontraba unos 3 m por debajo del correspondiente a Laguna Cotacotani Principal; de manera que ellas no tienen interconexiones de aguas subterráneas.*



FOTOGRAFIA 6

*Sector de Juan de la Cruz junto a una sección de aforo controlada por ENDESA hasta algunos años atrás.*






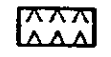
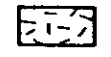

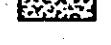
# BOSQUEJO

(Según interpretación fo

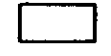
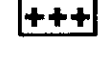
Escala 1:500.000.

## LEYENDA



### CUATERNARIO.

-  Qi Sedimentos
-  QV1 Volcanitas
-  QV2 Volcanitas
-  QTV Volcanitas
-  QTS Sedimentitas



### TERCIARIO.

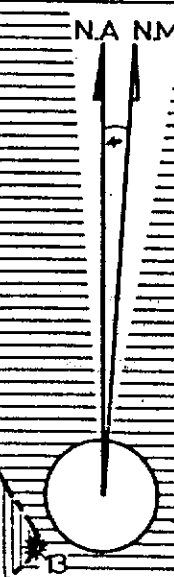
-  TV Volcanitas
-  TD Rocas intrusivas

### CRETACICO.

-  KVS Volcanitas
-  KG Rocas intrusivas

### JURASICO.

-  JVS Volcanitas
-  JG Rocas intrusivas



# GEJO GEOLOGICO REGIONAL.

(Interpretación fotogeológica de imágenes Landsat escala 1:500.000.)

000. 0 10 20 30 40 50 Km.

Sedimentos recientes indiferenciados : Gravas y arenas en la costa.  
Sedimentos fluvioaluvionales de valle en el centro.  
Conglomerados, arenas volcánicas, morenas y lahares en el altiplano.

Volcanitas andesíticas: Lavas de bloques y Aa.  
Lavas domo.  
Flujos y piroclásticos.

Volcanitas riolíticas : Flujos de cenizas.  
Tobas soldadas.  
Tapones de calderas.

Volcanitas andesíticas: Lavas domo. Tobas soldadas.  
Flujos de lava y piroclásticos.

Sedimentitas continentales: Conglomerados y areniscas.  
Limolitas y arcillolitas.

Volcanitas riolíticas: Plateau ignimbrítico.  
Flujos de cenizas.

Rocas intrusivas dioríticas.

Volcanitas y sedimentitas continentales indiferenciadas.

Rocas intrusivas granodioríticas y gábricas.

Volcanitas y sedimentitas marinas indiferenciadas.

Rocas intrusivas granodioríticas.

## PRECAMBRICO.

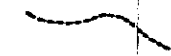


PE

Rocas metamórficas :

Esquistos micáceos  
Gneisses.

## SIMBOLOGIA.



Contactos geológicos.



Volcanes.

1



Calderas.

2



Lagos y lagunas.

3



Salares.

4



Fallas geológicas.

5



Poblados.

6



Aeropuerto.

7



Hoya hidrográfica  
Río San José.

8



Líneas principales de  
escurrimiento superficial.

9

10

11

12

13

14

Volcanes.

Nombre

Larancagua.

Casiri.

Pomerape.

Parinacota.

Quisiquisini.

Humarata.

Acotango.

Capurata.

Guallatiri.

Puquintica.

Arintica.

Chiguana.

Lliscaya.

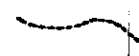








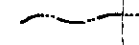
Taapaca.

## PRECAMBRICO.

 PE Rocas metamórficas : Esquistos micáceos.  
Gneisses.

e en el centro.  
, morenas y lahares en el altiplano.

## SIMBOLOGIA.

-  Contactos geológicos.
-  Volcanes.
-  Calderas.
-  Lagos y lagunas.
-  Salares.
-  Fallas geológicas.
-  Poblados.
-  Aeropuerto.
-  Hoya hidrográfica Río San José.
-  Líneas principales de escurrimiento superficial.

## Volcanes.

Nombre	Cota (m.s.n.m)
1 Larancagua.	5.580.
2 Casiri.	5.250.
3 Pomerape.	6.240.
4 Parinacota.	6.350. (*)
5 Quisiquisini.	5.480.
6 Humarata.	5.730.
7 Acotango.	6.050.
8 Capurata.	5.990.
9 Guallatiri.	6.060. (*)
10 Puquintica.	5.760.
11 Arintica.	5.590.
12 Chiguana.	5.280.
13 Lliscaya.	5.580.
14 Taapaca.	5.815. (*)

## Calderas.

Nombres	Cota (m.s.n.m.)
A Lampallares.	4.258.
B Putre.	5.500.
C Huaylillas.	3.730.
D Sapahuira.	3.500. ?
E Lauca.	5.080.
F Ajoya.	5.330.
G Mogote - Paqueri.	4.250. ?
H Anocariri.	5.050.
I Tulapalca.	4.780.
J Tolapacheta - Vilacollo.	4.600.
K Chuquiananta.	5.590.

(\*) Volcanes activos.  
(Según Katsui y González, 1968)