

1523 ✓

H. Niemeyer

**Ing. Hans Niemeyer F.**



# **II. Ampliación de los recursos del RIO LAUCA**

**Separata de Revista Chilena de Ingeniería  
N.º 303, Enero - Febrero 1964**

**Santiago de Chile**

55(83): 551.49  
N672

1964

# AMPLIACION de los RECURSOS del RIO LAUCA

Por Ing. Hans Niemeyer F.



## 1. INTRODUCCIÓN

Las obras de captación del río Lauca en el altiplano ariqueño —constituidas en esencia por un canal revestido de 28 km. de longitud y de un túnel bajo el Portezuelo de Chapiquiña de 4,5 km— fueron proyectadas para conducir un gasto de 2,75 m<sup>3</sup>/seg, destinado al riego del curso inferior del valle de Azapa. Con el correr de los años, se ha visto que el río Lauca, en el punto en que abandona las Ciénagas de Parinacota (bocatoma del canal), lleva caudales muy inferiores a esta cifra. En efecto, en la estadística pluviométrica anterior al año 1950, los gastos medios mensuales oscilan entre 1,0 y 1,50 m<sup>3</sup>/seg; los posteriores a ese año, raramente alcanzan a 1,0 m<sup>3</sup>/seg. De ahí el planteamiento de buscar nuevos recursos de agua que mejoren el aprovechamiento de las obras construidas y de mantener en el Lauca un gasto tan constante como sea posible. Esta constancia es exigida por las características de la agricultura en Azapa y, con mayor razón, por la Central Hidroeléctrica de Chapiquiña.

Para incrementar el caudal del Lauca se han puesto los ojos en tres lagunas y en sus respectivos tributarios, que directa o indirectamente constituyen sus fuentes.

A fines de 1960, la Dirección de Riego del M.O.P. nos encomendó la tarea de investigar dichas fuentes, siguiendo un plan que nosotros mismos habíamos propuesto. Se instalaron algunos instru-

mentos de registro en la zona y por casi dos años hicimos determinaciones sistemáticas de los siguientes factores en juego: mediciones periódicas de caudales de todos los cursos de agua comprometidos; muestreos simultáneos y ulterior análisis químico de las aguas del sistema; evaporación al nivel de las lagunas; precipitaciones en los mismos puntos; observación periódica de los niveles del espejo de agua. Se aprovecharon los levantamientos topográficos con curvas de nivel del fondo de las lagunas, para obtener las curvas de capacidad. Además, se contrataron los servicios de un geólogo que investigara una posible comunicación entre Chungará y Cotacotani.

Se emitieron dos informes detallados con los resultados e interpretación de estas investigaciones. Las "recomendaciones" contenidas en estos escritos, han servido de base para ejecutar diversos trabajos de proyecto, algunos aún en marcha: canales de colecta y drenaje de las vertientes que alimentan las Ciénagas de Parinacota y de canalización del río Lauca en su paso por ellas; canal para llevar directamente a Cotacotani las aguas del río Chungará; estudio topográfico y prospección geológica del posible túnel entre las dos lagunas; estudio de las recuperaciones del Lauca después de la bocatoma.

Pretendemos aquí dar información sucinta de estas investigaciones y estudios.

## 2. ASPECTO GEOGRÁFICO Y DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA HIDROGRÁFICO DEL LAUCA SUPERIOR

Como se ha dicho, dos lagunas de aguas poco profundas y un bofedal o vega constituyen las fuentes de alimentación del río Lauca Superior. Son las lagunas de Chungará y Cotacotani y las Ciénagas de Parinacota, nombradas en orden de mayor a menor elevación. Se encuentran ubicadas en el altiplano de la provincia de Tarapacá, al interior del departamento de Arica (Comuna de Putre). La altura aproximada de este conjunto fluctúa entre los 4.350 a 4.600 m. s.n.m.

El paisaje de la región, en sus características generales, corresponde al de alta Puna descrito para el valle del Caquena<sup>1</sup> que es la cuenca vecina que sigue más al norte.

Los rasgos orográficos y geológicos, los factores de clima y los recursos naturales de flora y fauna son prácticamente idénticos en ambas cuencas. Conviene quizás acentuar aquí la riqueza de la avifauna, sobre todo la gran abundancia de aves acuáticas que pululan en las lagunas. Las parinas o flamencos —que dieron el nombre a las Ciénagas— se han relegado al borde oriental del lago Chungará, en busca de quietud. Los huevos de las ajoyas (*Fulica gigantea*), una especie de tagua del tamaño de una gallina, son buscados en

<sup>1</sup>Ver en número 301 (pág. 8-23) de la Revista Chilena de Ingeniería: Niemeyer: "Proyecto de captación del río Caquena".



Laguna de Chungará y el cordón limitáneo. Vn. Guallatire y Nevados de Quimsachata.

primavera y en otoño por los naturales con fines de consumo.

La población indígena, de origen aymará, —única que puede soportar en forma permanente los rigores del clima y de la altura— se encuentra repartida en las estancias de las Ciénagas de Parinacota. Ejercen el pastoreo en carácter semi nómada, de rebaños de auquénidos y lanares. Durante la construcción de las obras del Lauca, modificaron éstas en ciertos aspectos los medios y sistemas de vida, al brindar trabajo mejor remunerado a los varones del Altiplano.

El poblado principal de la región es Parinacota, mimetizado entre pardas rocas volcánicas, en la cabecera de las Ciénagas. Ordinariamente se encuentra semi desierto y sólo en víspera de las numerosas festividades religiosas —la fiesta de la Santa Cruz, la de septiembre en homenaje a la Natividad de la Virgen, la de pachayambe— se puebla plenamente y entra en actividad. La pequeña iglesia, de sencillo estilo barroco colonial, techada de paja, es el centro de esta agitación.

Las comunicaciones se hacen por vía terrestre. Un camino de condiciones aceptables, a pesar de su fuerte pendiente y zigzaguo en la precordillera, asciende desde Arica hasta el Portezuelo de Chapiquiña (120 km). De este punto parte un camino al pueblo de Parinacota, que se prolonga hasta Caquena. Una rama se aparta hacia Putre, en la precordillera andina, y otra,

de reciente construcción, va a la laguna de Chungará. La bordea por el sur en un intento de camino internacional hacia Bolivia por el paso de Tambo Quemado. Una red de huellas troperas unen las estancias con los caseríos. Pasan al país vecino por los portezuelos de Huacollo y de Tambo Quemado.

Arraigada entre los habitantes de esta tierra perdura una hermosa leyenda. Se refiere a la destrucción por "fuego caído del cielo" de un soberbio y poderoso pueblo —en los que algunos creen ver el origen del pueblo Tiahuanaco, que más tarde alcanzó alto grado de civilización a orillas del Titicaca— situado cerca de Cotacotani, a los pies de los Payachata. Coincide la leyenda con el indudable origen volcánico, relativamente reciente, de la laguna de Cotacotani.

El sistema hidrográfico del Lauca Superior se encuentra aislado del país vecino por un cordón oriental, en el que destaca la cadena del Quimsachata, de tres cerros parecidos entre sí; el cerro Quisquisine, a cuyos pies se sitúan los pasos fronterizos ya nombrados; y los imponentes Nevados de Payachata, los dos cerros gemelos que dominan el paisaje altiplánico en tan grande extensión. Un cordón transversal que se desprende de estos últimos, uniéndolos así a los Nevados de Putre en la Cordillera Central, separa la cuenca en estudio de la vecina del Caquena. Finalmente, parte de la Cordillera Central le sirve de flanco ponien-

te. La hoya hidrográfica comprometida aguas arriba de la bocatoma del Canal Lauca, es de 495 km<sup>2</sup>, incluida la laguna Chungará.

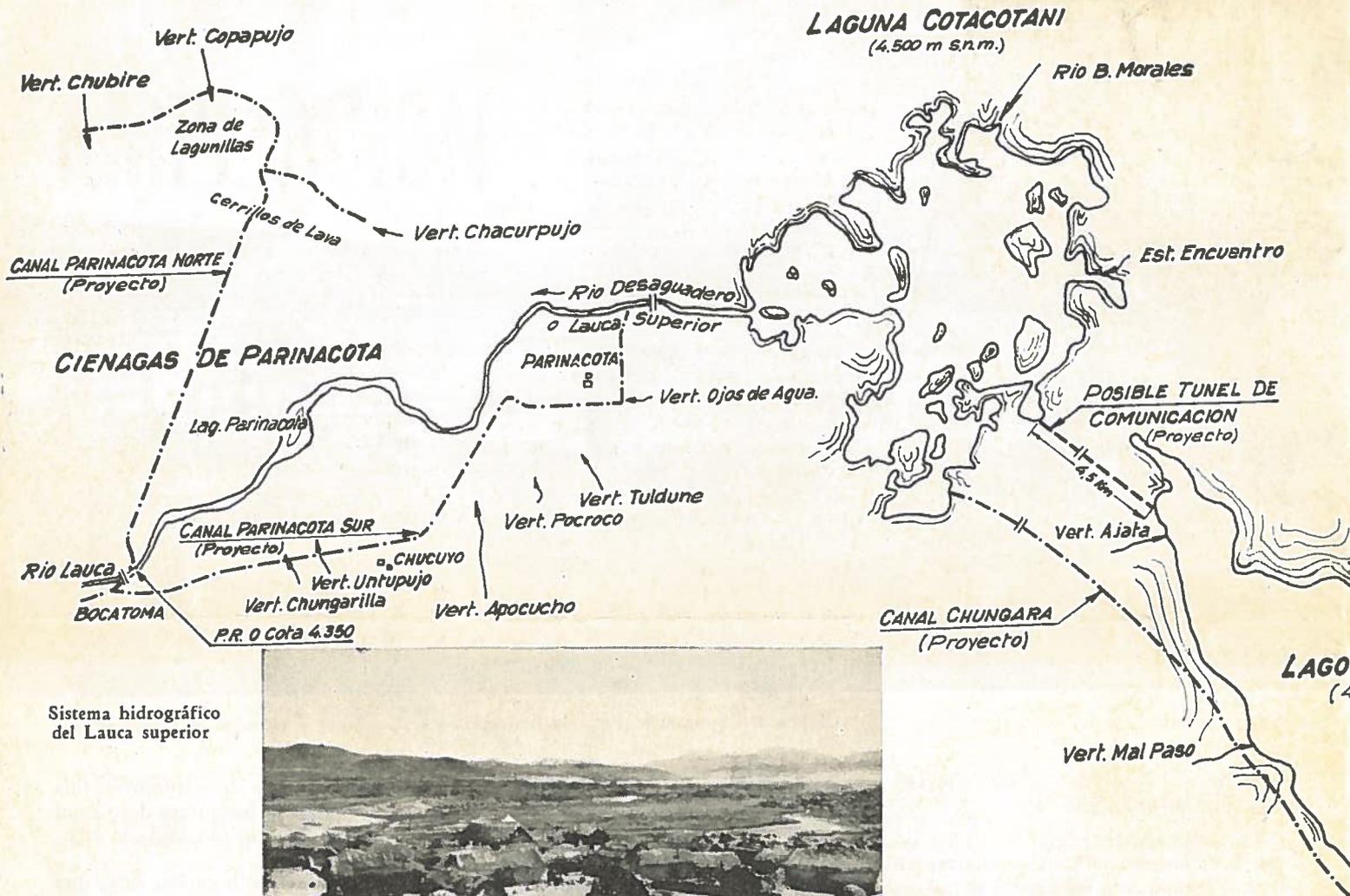
Analizamos a continuación cada una de las cuencas parciales que forman el sistema en estudio.

#### A) Cuenca de la Laguna Chungará (Co.a: 4.517 m.s.m.\*).

La base de equilibrio de esta cuenca es la laguna o lago Chungará. Es una depresión cerrada de forma aproximadamente triangular, sin desagüe visible. De las tres cuencas es la que ocupa la posición más austral y oriental. De su ribera norte se eleva abruptamente el faldón del apagado volcán Parinacota (6.330 m) (uno de los Payachata). La cuenca tributaria totaliza alrededor de 280 km<sup>2</sup>.

La superficie del espejo de agua de la laguna es de aproximadamente 21,5 km<sup>2</sup> y su profundidad máxima general, sin considerar depresiones menores, es de 32,50 m. Ambas magnitudes sufren variaciones estacionales, alcanzando sus menores valores en la Primavera, y los mayores, al término del verano, después de las grandes lluvias. Como se ha dicho, la laguna Chungará no tiene desagüe superficial y la descarga se ejerce por evaporación y por filtraciones hacia los puntos vecinos más bajos. En especial, hacia la cercana laguna de

\*Las cotas de todos estos estudios están referidas a la del P.R. O en la bocatoma del Canal Lauca, cuya cota es 4.350 m. s.n.m.



Sistema hidrográfico del Lauca superior

Pueblo de Parinacota y ciénagas.

Cotacotani, a través de los materiales volcánicos que constituyen el portezuelo de 3 a 4 km entre ambas.

El Gráfico N° 1 muestra las curvas de capacidad y superficie inundada de la laguna de Chungará.

A la cota actual de su espejo de agua, el volumen total almacenado es de 400 millones de m<sup>3</sup>.

Indispensable era conocer, además, el contenido de sales de esta laguna si se le consideraba en un plan de ampliación. No tan sólo está en juego el efecto inmediato y directo que tiene la calidad del agua en los cultivos, sino la posible contaminación que pueda producir en los suelos cuando éstos no poseen perfecto drenaje. Alterar las condiciones naturales del Valle de Azapa en lo que se refiere a sus tradicionales sistemas de riego, introduciendo en él aguas de otra hoya, impone que se proceda con especial cautela, ya que este rico oasis no presenta —como los valles

vecinos de Lluta y Camarones— problemas de salinidad.

Disponemos de 31 análisis, que muestran una conductividad elevada oscilante entre 1.200 y 1.600 M. Mohs. Los porcentajes de sodio se mantienen entre 30 y 70%. El peligroso ión carbonato mantiene índice bajo o está ausente. La reacción pH toma valores cercanos a 8,0, es decir, las aguas son ligeramente alcalinas. En cuanto al contenido de boro, lo normal es que esté por debajo de 2 PPM.

Con los antecedentes que se indican, el agua de la laguna Chungará se ha calificado de *bueno a aceptable* para la agricultura en 26 de los 31 casos analizados.

Los únicos tributarios de superficie, los recibe la laguna por sus riberas sur occidental.

El más cercano a la frontera e importante de ellos es el río Chungará.

Aporta a la laguna más del 70% del caudal en época de lluvia y sobre el 90% en estiaje. Recoge las aguas de una gran hoyada que forman la vertiente poniente de los Quimsachata y la naciente del activo volcán Guallatire. Se desarrolla el río en meandros de suave pendiente en un valle tapizado de bofedales. Desemboca en el vértice sur-oriental de la laguna, en un delta de ancho desplaje.

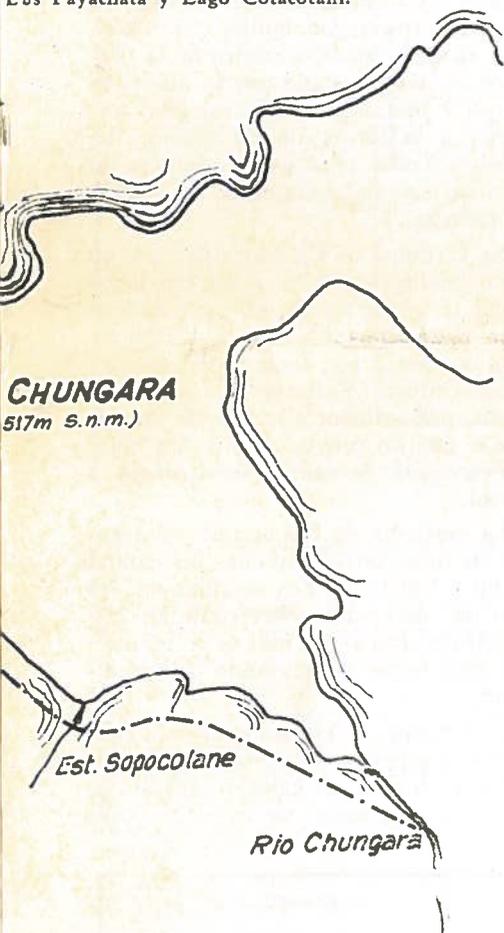
Disponemos en esta corriente de 30 aforos<sup>1</sup>. El gasto promedio en estiaje es del orden de 300 l/seg., en tanto que el de época de crecidas de verano es de 460 l/seg.

Los otros tres afluentes de superficie son de gastos muy inferiores. Al río

<sup>1</sup>Se encuentra instalada hoy en día, atendiendo a una de nuestras recomendaciones, una sección permanente de aforo con vertedero frontal.



Los Payachata y Lago Cotacotani.



Chungará sigue hacia el Poniente el Estero Sopocolane, que lleva agua sólo en época de lluvias. Su hoya hidrográfica es reducida. El gasto promedio en la temporada es de unos 30 l/seg., aunque presenta violentos peaks de cierta consideración, hasta de 160 l/seg.

Por la ribera occidental recibe la laguna las vertientes de Mal Paso y de Ajata, de similares características. Ambas nacen a medio faldeo de la cadena que por este flanco confina la cuenca, a unos 100 o 150 m sobre el nivel de la laguna y riegan minúsculas extensiones de bofedales. La vertiente de Mal Paso lleva un gasto promedio de 15 l/seg. y la de Ajata, de unos 20 l/seg.

La calidad del agua de todos los tributarios de la laguna Chungará la conocemos a través de 27 análisis químicos. Los índices se mantienen en todos ellos aceptables. Las conductividades no sobrepasan de 300 M. Mohs; el contenido de boro por rara excepción

llega a 3 PPM, manteniéndose ordinariamente entre 1 y 2 PPM. La reacción pH es cercana a 7,0 (neutra). Por estas circunstancias, creemos que en una explotación de la laguna, la calidad de las aguas de ésta va a mejorar al nivel de los tributarios.

#### B) Cuenca de la Laguna de Cotacotani (Cota: 4.499,50 m.s.m.)

La laguna de Cotacotani está situada al Noroeste de la de Chungará, separada de ella por un portezuelo de más o menos 4 km de ancho. Su superficie es de aproximadamente 6 km<sup>2</sup> y la profundidad media general, de 10 m. La cota del espejo de agua (499,50) está aproximadamente 18 m más baja que la de Chungará. La característica fundamental de ella —que la distingue de cualquier otro lago chileno— es el elevado número de islas e islotes que interrumpen la continuidad de su espejo de agua, morfología debida a que ocupa un extenso campo de lava de accidentada superficie. El nombre aymará significa *lugar de lagunas*, porque en las vecindades de la principal hay un buen número de otras lagunitas y a veces, en los estiajes, la superficie principal se fragmenta, quedando aisladas ciertas depresiones marginales. La profundidad máxima alcanza a 20 m en una fosa céntrica, frente a la desembocadura de su principal tributario. Innumerables patos, ajoyas y otras aves pueblan la laguna.

La gran cantidad de islas e islotes reduce considerablemente la capacidad útil de Cotacotani. El gráfico N° 2 muestra la curva de capacidad y la de superficie inundada.

La calidad del agua se conoce a través de 34 ensayos. En los 28 análisis últimos, la conductividad no alcanza la cifra de 900 M. Mohs, manteniéndose en buen número de casos bajo esta cifra. Su reacción es ligeramente alcalina, con pH entre 7 y 8.

Los índices de boro, porcentaje de sodio y iones carbonato y potasio se mantienen muy bajos, circunstancias que permiten calificar de buena la calidad de las aguas de Cotacotani.

Los tributarios superficiales de la laguna de Cotacotani son dos: el río Benedito Morales y el estero El Encuentro.

El primero es el más importante. Lleva el nombre de un poblador que vive en su desembocadura al cuidado de sus rebaños. Cae en el extremo nororiental de la laguna y proviene de afloramientos de los escurrimientos subterráneos que descienden del Vn. Parinacota. El gasto de estiaje oscila alrededor de 90 l/seg y el de crecida llega en promedio a 110 l/seg.

El estero El Encuentro es de gasto muy inferior al anterior, del orden de 20 l/seg. Cae por la ribera oriente y sin duda proviene también de filtraciones.

Ambos tributarios ofrecen condiciones químicas de sus aguas muy constantes y los índices se mantienen en valores aceptables. La conductividad total se mantiene entre 700 a 800 M. Mohs, bajando en la época de las crecidas. Reacción alcalina poco acentuada.

No cabe duda que Cotacotani recibe aportes importantes subterráneos desde Chungará y desde los Payachata.

A diferencia con la anterior, la laguna de Cotacotani tiene un desagüe superficial hacia la Ciénaga de Parinacota, a través de un umbral rocoso. Es el río Desaguadero (o Lauca Superior), que en menos de 5 km salva un desnivel de 150 m a través de un cauce nuevo, apenas señalado en parte, entre los peñascos de lava. El río al final cae con un salto de 5 m a la Ciénaga, donde escurre hasta la bocatoma del Canal Lauca con insignificante pendiente, produciendo meandros y ensanchamientos lagunares (uno de ellos es la laguna de Parinacota).

El gasto de este río —origen del Lauca— es variable con la estación. Hemos aforado en estiaje caudales hasta de 100 l/seg y un máximo en pleno verano de 560 l/seg, pero el gasto representativo medio alcanza a unos 260 l/seg. La calidad del agua es aceptable, aunque de toda esta cuenca es la que tiene mayor salinidad. Llama la atención este fenómeno, de que las condiciones químicas de sus aguas sean notoriamente más desfavorables que las fuentes de origen. Sin duda que la causa principal proviene de las filtraciones de la Laguna Chungará a través del portezuelo de lavas que separa ambas cuencas. Conductividad cercana a 900 M. Mohs; pH entre 7 y 8. Los otros índices presentan condiciones aceptables.

#### C) La Ciénaga de Parinacota

La Ciénaga de Parinacota es una extensa depresión, de 28 km<sup>2</sup> de superficie, cubierta de bofedales. Se extiende al poniente de la Laguna de Cotacotani, a la cota 4.350 m s.n.m., es decir, 150 m más baja que aquélla. Queda confinada por el norte y el oeste por los cerros Guani-Guani, Larancagua y parte de los Nevados de Putre. Hacia el Sur la limita una meseta de lavas y tobas liparíticas a través de la cual se ha abierto camino —en un verdadero cañón— el río Lauca que la desagua. Da la impresión que antes de la formación de esta garganta, la depresión la ocu-



Casas de la estancia Copapujo, en las Ciénagas de Parinacota.

paba un lago de aguas bajas, cuyo resto actual sería la pequeña laguna de Parinacota. La hoya hidrográfica comprometida alcanza a unos 100 km<sup>2</sup>.

Una nota característica en ella es la presencia de pequeñas cadenas de cerrillos de materiales volcánicos —bloques de basalto y andesita, acumulaciones de cenizas y arenas— similares a los de la cuenca de Cotacotani.

En la cabecera de la Ciénaga se levanta el pueblo de Parinacota, junto a la principal vertiente de la región. En

el extremo opuesto, está la bocatoma del Canal Lauca.

La principal corriente que alimenta la depresión es el río Desaguadero o Lauca Superior, al que ya nos hemos referido. El resto de la alimentación lo forman numerosas vertientes. La más importante es la de Ojos de Agua o vertiente Grande Parinacota, junto al pueblo. Tiene un gasto promedio de 150 l/scg y la calidad de sus aguas es excelente, de reacción ligeramente alcalina y conductividades que nunca so-

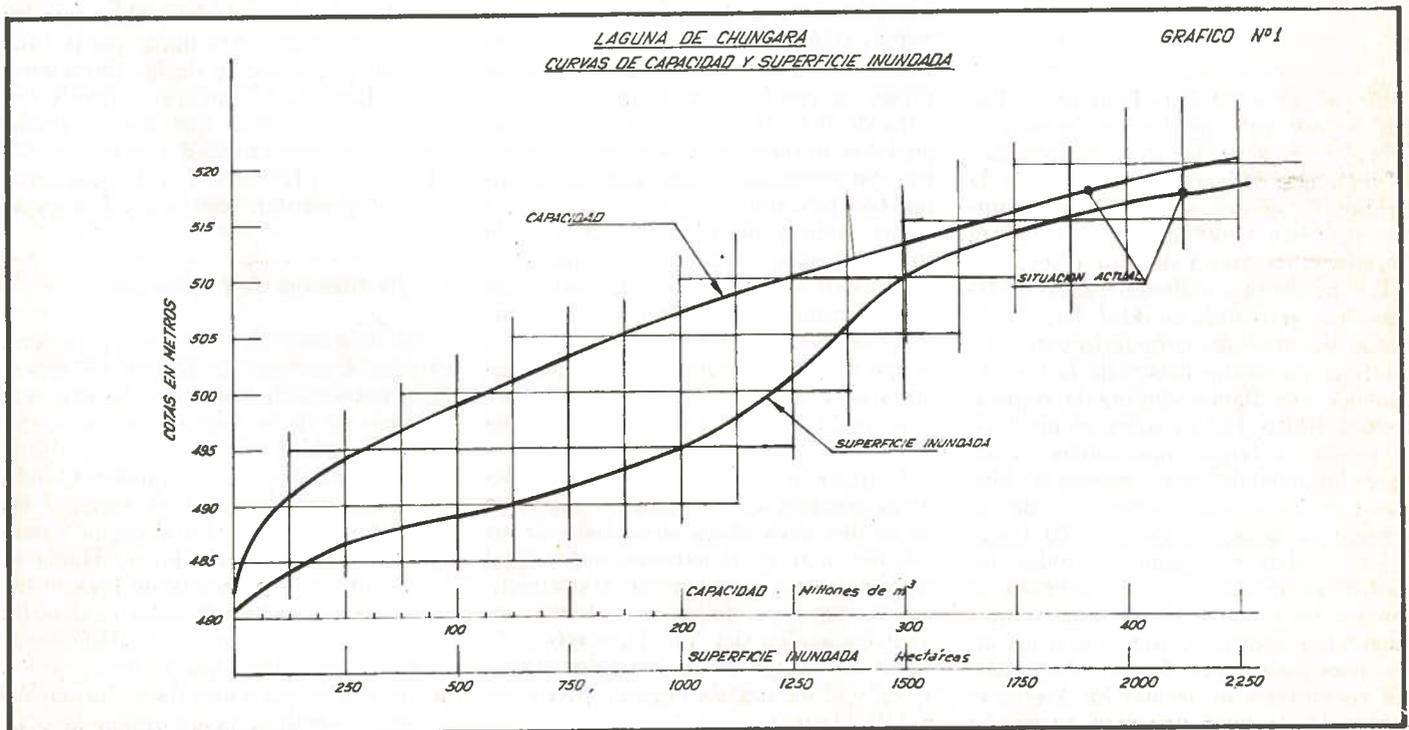
brepan los 400 M. Mohs. Este resultado de la investigación es de importancia por cuanto demuestra la independencia de la vertiente Ojos de Agua de las lagunas de Cotacotani y Chungará, con calidades de agua tan diferentes.

Por el lado norte nacen tres vertientes de primera magnitud a los pies del portezuelo entre los cerros Guani-Guani y Larancagua. Son las aguadas de Chacurpujo, Copapujo y Chubire, cuyo drenaje hacia el centro de la Ciénaga se ve dificultado por la interposición de una cadena de cerrillos que obliga a la formación de algunas lagunitas. Todas ellas son sensibles a las fluctuaciones del agua caída en la zona de recarga.

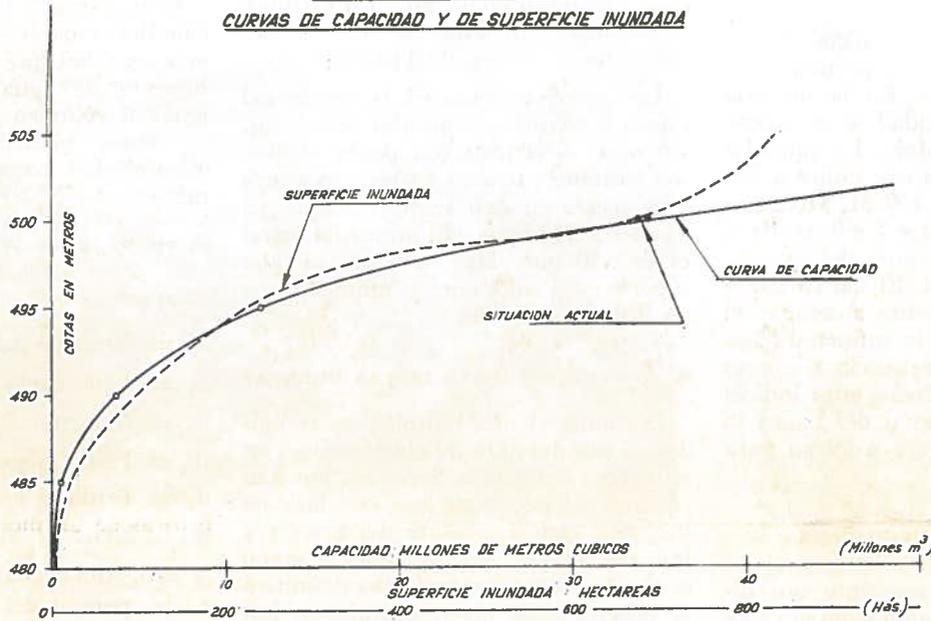
La vertiente de Chacurpujo tiene un gasto medio de 40 l/scg. La conductividad de estas aguas sufre variaciones bruscas de un mes a otro, sin llegar en ningún caso a ser inconvenientes para la agricultura (Varía de 100 a 600 M. Mohs, por influencia quizás de un pequeño esterito proveniente de un bofedal cercano). Se califica de *excelente a buena*.

La vertiente de Copapujo —sita entre las otras dos— presenta un caudal de 80 a 100 l/scg. Las conductividades sólo por excepción sobrepasan los 200 M. Mohs. Los otros índices se mantienen muy bajos, no acusando peligro alguno.

Finalmente la vertiente de Chubire, que es la que ocupa la posición más occidental, ofrece un gasto promedio de 65 l/scg con aguas de excelente cali-



**LAGUNA DE COTACOTANI**  
**CURVAS DE CAPACIDAD Y DE SUPERFICIE INUNDADA**



dad, muy semejantes a las de Copapu-  
jo.

A los pies de los cerros que confinan por el flanco sur la cuenca, nacen cinco vertientes menores cuyos cauces interceptan el camino entre el pueblo de Parinacota y la bocatoma del Canal Lauca. Nombradas en el orden de esta dirección, son las vertientes de Tuldune, Pocroco, Apocucho, Untupujo y Chungarilla. Sus caudales son más o menos constantes y suman en total cerca de 40 l/seg. Las de Untupujo y Chungarilla son termales y la gente del lugar las aprovecha en el lavado de la ropa antes que se dispersen en el riego de los bofedales. La principal de ellas, por su caudal, es la de Apocucho que viene del interior de una quebrada. La calidad de la mayoría de estas aguas es de *aceptable a dudosa*.

Aparte de las citadas, nacen en las Ciénagas varias otras pequeñas aguadas de mal definido origen, que van a incrementar el riego de bofedales.

Repartidas en las Ciénagas se encuentran alrededor de quince estancias, que sostienen tal vez unos cinco o seis mil animales domésticos, con los pastos de los bofedales.

**D) El río Lauca**

Todas las aguas de las Ciénagas se reúnen en su extremo poniente en una angostura donde se origina el río Lauca propiamente, que después de un largo recorrido en territorio chileno y de recibir importantes tributarios, atravie-

sa la frontera hacia Bolivia, para perderse finalmente en el Salar de Coipasa.

Los caudales del río Lauca (en bocatoma) son muy variables. En época de estiaje riguroso (a fines de primavera) se han aforado gastos del orden de 300 l/seg y aún menores, en tanto que en el período de lluvias hay peaks superiores a 1,0 m<sup>3</sup>/seg.

Endesa hizo un estudio crítico minucioso de todos los aforos y registros limnimétricos disponibles para el río Lauca, en la sección Estancia El Lago (3 km aguas abajo de la bocatoma), llegando a corregir las primitivas curvas de descarga y a descubrir defectos capitales en los primeros años de observaciones. Demostró por correlación de lluvias, que la estadística anterior a 1946 no puede tomarse en cuenta. A la luz de todos los antecedentes a su disposición, el ingeniero Andrés Benítez, de Endesa, reconstituyó una estadística de gastos medios mensuales bastante completa desde 1946 a 1960, que continuó en los años posteriores. En años anteriores a 1950, el promedio anual oscila de 1,20 a 1,60 m<sup>3</sup>/seg. Algunas crecidas superan los 3,0 m<sup>3</sup>/seg y los estiajes de Octubre bajan hasta 0,50. En años posteriores a esa fecha, los promedios anuales están entre 0,65 y 0,75 m<sup>3</sup>/seg. En los estiajes llegan a 300 y 400 l/seg los gastos medios mensuales; en los meses de abundancia sólo por excepción alcanza el gasto medio a 1,0 m<sup>3</sup>/seg. Parece ser un hecho probado y generalizado que los caudales de

los ríos y aguadas de la cordillera en el Norte Grande han mermado notablemente en la última década. Debido a la carencia de observaciones en años anteriores, no tenemos un cuadro completo del fenómeno hidrológico que permita una adecuada interpretación.

Con dicha estadística se han podido determinar las probabilidades de los gastos, cuyo resumen se da en Tabla Nº 1. Las cifras anotadas, con sobrada elocuencia establecen la necesidad de mejorar el gasto del Lauca con el aprovechamiento integral de sus fuentes de origen.

Tabla Nº 1

*Probabilidad de ocurrencia de gastos del río Lauca en Estancia El Lago*

Probabilidad %	Gasto (m <sup>3</sup> /seg)
20	1,30
30	1,08
40	0,91
50	0,79
60	0,68
70	0,59
80	0,51
90	0,43
95	0,39

Aguas abajo de bocatoma, el río Lauca recibe en territorio chileno una decena de afluentes, de los cuales el río

Guallatire (con gasto del orden de 1,0 m<sup>3</sup>/seg) y el Quiburcanca son los principales.

Veintisiete análisis químicos de las aguas del río Lauca nos permiten conocer sus condiciones. En la mayoría de ellos la conductividad se mantiene entre 500 y 600 M. Mohs. En contadas oportunidades alcanza este índice a 800 y nunca desciende de 400 M. Mohs. La reacción pH oscila entre 7 y 8, es decir, tiene como todas las aguas del sistema, una ligera alcalinidad. El ion carbonato está permanentemente ausente y el potasio acusa presencia ínfima. El boro llega con cierta frecuencia a valores cercanos a 3 PPM. Todos estos índices permiten dar a las aguas del Lauca la calificación de *excelente a buena* para la agricultura.

### 3. EVAPORACIÓN Y PLUVIOMETRÍA

Desde un primer momento nos dimos cuenta que la evaporación era factor notable en el problema que tratábamos de resolver. La laguna Chungará —no teniendo desagüe a la vista— tiene una descarga importante por este concepto. La ciénaga y las otras fuentes también pierden agua por evaporación, en desmedro finalmente, del caudal del Lauca. El primer esfuerzo era conocer la magnitud de la evaporación mes a mes en este clima de la Puna, sobre la que había poca experiencia y opiniones contradictorias. Se instalaron para este fin en sitios seleccionados a orillas de las lagunas, evaporímetros sencillos, tipo U.S. Weather Bureau-Class A. Una dificultad grave en el invierno era el congelamiento de los estanques, problema sin solución práctica. Simultáneamente con los registros diarios de evaporación había que hacer lecturas de las precipitaciones durante el día, para cuyo efecto se instalaron pluviómetros en la vecindad de los evaporímetros. El período de nuestras observaciones abarca casi dos años hidrológicos. (1961-62). La Dirección de Riego, por su parte, continuó el registro en el presente año, y sus resultados han sido muy concordantes con los nuestros.

En primer lugar cabe señalar que la evaporación anual en estas alturas es mucho menor de lo que siempre se había supuesto. Para Chungará la evaporación anual es de 1.200 mm; en la Ciénaga de Parinacota y en Cotacotani es alrededor de 1.000 mm anuales. En cambio, siempre se hablaba de cifras del orden de 2.500 a 3.000 mm, y aún de 1 cm diario.

En los meses de pleno verano —Enero a Marzo— la evaporación es sólo de

80% de la de los meses de invierno, lo que se explica por los cielos cubiertos en el "invierno boliviano". En Octubre se alcanza el máximo de evaporación, con cifras del orden de 140 mm.

Las precipitaciones en la región del Lauca Superior —conocidas por el pluviómetro de Parinacota desde 1933— son bastante variables de un año a otro y se producen casi exclusivamente en los meses de verano. El promedio anual es de 350 mm. Hay máximos anuales superiores a 500 mm y mínimos que no llegan a 100 mm.

### 4. APROVECHAMIENTO DE LAS CUENCAS

Los antecedentes hidrológicos recogidos en casi dos años de observaciones en el sistema del Lauca Superior, nos han permitido obtener algunas conclusiones de interés en la solución del problema que nos ocupa, sin pretender —como es obvio— organizar en forma definitiva el programa de aprovechamiento. Los dos informes en que están contenidos han sido útiles para orientar los trabajos de proyecto e investigaciones posteriores. Vamos a estudiar una a una las cuencas que hemos descrito e investigado.

#### A) Cuenca de Chungará

Debe tratarse esta hoya como un embalse de superficie. Tiene alimentación superficial desde sus afluentes río Chungará, Estero Sopocolane y vertientes Mal Paso y Ajata, y de las precipitaciones en el área mojada. Por otra parte, tiene sin duda alimentaciones subterráneas desde los cerros vecinos, en especial a través de las lavas permeables del faldeo del Volcán Parinacota.

A su vez, no teniendo un desagüe de superficie, el agua se descarga por evaporación y por filtraciones hacia las cuencas vecinas de menor cota, especialmente hacia la de Cotacotani.

Una de las ideas directrices en el plan de un posible aprovechamiento de la laguna de Chungará, ha sido llegar a rebajar la cota de su espejo de agua a fin de disminuir la superficie evaporante, y de comunicarla con la laguna de Cotacotani a través de un túnel. Para analizar los aportes que podría entregar, hemos planteado dos veces la *ecuación del embalse*. Una vez, en las condiciones naturales para conocer el comportamiento de la cuenca en lo que se refiere a filtraciones subterráneas, imposibles de medir directamente en forma práctica. Otra, en condiciones futuras de aprovechamiento con cota rebajada en 20 m, compatible con el

de nivel necesario para el escurrimiento gravitacional entre ambos lagos.

**Ecuación del Embalse.** La ecuación del embalse —como es sabido— es una igualdad que establece que los volúmenes de agua de las recargas es igual al volumen de las descargas más (o menos) un volumen de "almacenamiento". Las magnitudes se expresan en m<sup>3</sup>.

$$a_1 + a_2 + a_3 = d_1 + d_2 + d_3 \pm V$$

en que:

$a_1$  = Suma de los aportes de superficie

$a_2$  = Agua caída en el área mojada

$a_3$  = Alimentación subterránea

$d_1$  = Pérdidas por evaporación

$d_2$  = Pérdidas por filtraciones

$d_3$  = Descarga artificial

$V$  = "Almacenamiento", déficit o superávit del embalse.

El problema es evaluar los distintos términos de la ecuación. Algunos ofrecen menores dificultades que otros, porque se pueden medir. Algunos, como las filtraciones, son imposibles de conocer sin entrar en costosas experiencias que no se justifican.

#### a) Balance hidrológico en condiciones naturales<sup>2</sup>

Hemos medido mes a mes la evaporación y la superficie evaporante (curva de superficie inundada vs. cota del espejo de agua); las precipitaciones en el área mojada; los aportes de superficie a través de los gastos medios mensuales de los tributarios; y, el "almacenamiento", para cuyo efecto hacíamos lecturas periódicas de un limnómetro instalado en la laguna y disponíamos de la curva de capacidad. Faltaron por determinar los escurrimientos subterráneos,  $a_3$  y  $d_2$ . En realidad sólo era posible determinar la diferencia y no cada cifra por separado. Para este efecto es de utilidad la aplicación de la ecuación del embalse en condiciones naturales, escrita en su forma:

$$d_2 - a_3 = a_1 + a_2 - d_1 \pm V$$

Haciendo el reemplazo de valores, mes a mes, se demuestra que los aportes subterráneos superan a las fugas en 2 millones de m<sup>3</sup>. La descarga artificial  $d_3$  es en este caso cero. En seguida, en base a ciertas estimaciones razonables de los aportes subterráneos a la laguna,

<sup>2</sup>No entraremos a detallar cifras ni cálculos, sino que indicaremos el procedimiento y los resultados.



Nacimiento del río Desaguadero o Lauca Superior en la Laguna de Cotacotani.

se concluyó que las fugas ubterráneas anuales pueden alcanzar un valor cercano a 6,3 millones de  $m^3$ . Se planteó el problema de qué porcentaje de estas fugas van a parar en las condiciones actuales a la laguna de Cotacotani, volumen que debe ser respetado en todos los casos.

Para este efecto, se hizo la determinación mes a mes de la diferencia entre los aportes de superficie a la laguna de Cotacotani y las descargas del río Desaguadero. Totalizan alrededor de 4,5 mill. de  $m^3$  y podemos suponer que el 70% de ellos proviene de la laguna de Chungará. Es decir, debemos respetar un volumen anual de 3 mill. de  $m^3$  procedente de esta fuente.

El excedente de las fugas de Chungará, que es del orden de otros 3 mill. de  $m^3$ , debe perderse en otras hoyas vecinas.

#### b) Balance hidrológico en condiciones de explotación

La cota del espejo de agua de la laguna Chungará se ha rebajado a un mínimo de 497,50; la de Cotacotani a 492,0. La cota de regulación de Chungará en su actuación como embalse, se fija en 499,0. El término V (almacenamiento) en situación de régimen de explotación a la vuelta de un año debe ser cero. La evaporación y el agua caída deben calcularse en base a la superficie rebajada.

La incógnita por despejar en estas condiciones es la descarga artificial de que interesa conocer.

Repartida la cifra encontrada en los segundos del año, arroja un gasto cons-

tante posible de explotar de 160 l/seg, que puede ser extraído y controlado en la forma que exija la demanda.

#### c) Aprovechamiento accidental de Chungará

La situación expuesta se alcanzaría en el estado de régimen. Sin embargo, hay un aprovechamiento de gran importancia en el estado de transición desde la cota actual (4.517,00) hasta la de regulación propuesta (4.499,0) y consiste en el volumen fósil de agua que habría que vaciar para lograr el rebaje. De acuerdo con la curva de capacidad dicho volumen sería aproximadamente 300 mill. de  $m^3$ .

Si nos propusiéramos efectuar el vaciamiento de la laguna, p. ej. en 10 años con escurrimiento continuo, el caudal adicional del Lauca en dicho período puede incrementarse en 0,90  $m^3$ /seg. Para Endesa, en la Central Chapiquiña, significa este mayor gasto del Lauca, un incremento de energía producida de 600 mill de KW-hr. que por sí pagaría la obra del túnel. Aparte de ello, habría que agregar el riego adicional durante 10 años de 300 a 400 Hás. en el Valle de Azapa.

#### B) Cuencas de Cotacotani y Parinacota

Conviene tratarlas en conjunto por su conexión a través del río Desaguadero. Se ha comprobado en los dos años de observaciones que la suma de los aportes de superficie a la laguna de Cotacotani es casi siempre inferior a la descarga del río Desaguadero, lo que no deja dudas acerca de la alimentación subterránea que ella recibe desde

las nieves de los Payachata y, sobre todo, desde la laguna Chungará.

La solución que se ha propuesto para esta laguna es aprovechar su fosa céntrica, bien definida, como un pequeño embalse regulador "de paso", y secar todo el anillo exterior de aguas bajas rebajando 3 m su espejo de agua (hasta la cota 492). Se conseguiría así disminuir considerablemente las pérdidas por evaporación, ganando un caudal continuo de 80 a 90 l/seg. por este concepto.

\* \* \*

De las observaciones hidrométricas sistemáticas, hemos podido calcular los gastos mensuales de todas las corrientes en juego, y analizar el significado hidrológico de diferentes soluciones en las cuales cabe pensar.

Veamos dichas soluciones, desde la más simple a la más compleja y cara. El gráfico N° 3 muestra con sobrada elocuencia el significado de estas soluciones para el hidrógrafo del Lauca.

#### 1° Río Lauca en sus condiciones actuales

Se deja el Lauca en sus condiciones actuales, sin ninguna obra nueva en su curso superior. Se dispone de un gasto muy variable, con mínimos de estiaje inferiores a 0,50  $m^3$ /seg.

#### 2° Encauzamiento de las vertientes de la Ciénaga y del río Desaguadero, sin regulación.

Una idea existente desde que se hicieron los primeros proyectos del Lauca, ha sido la de ejecutar una red de drenaje en las Ciénagas de Parinacota. Sin embargo, nosotros —al conocerlas más de cerca— nos dimos cuenta que en buena parte estas vegas o bofedales son artificiales, formados con el riego constante extraído al río Desaguadero y a las vertientes, por los naturales de la región. Además contribuye a su fomento el hecho de que las vertientes no poseen cauces definidos que conduzcan sus aguas hacia el talweg de la depresión. De allí que propusimos en esta solución parcial, reunir las tres vertientes de primera magnitud del lado norte en un solo cauce que lleve sus aguas directamente a la bocatoma del Canal Lauca. Igualmente, propusimos la canalización del río Desaguadero por el borde sur de las Ciénagas para evitar el paso a su través. Recogería además las aguas de la vertiente Ojos de Agua y de las 5 pequeñas vertientes que encuentra en su camino.

De los anteproyectos que hicimos de estas obras, resultó que el Canal Pari-

nacota Norte tiene una longitud de 6 km desde su nacimiento en la vertiente de Chacurpujo hasta el vaciamiento en bocatoma. Recibe un ramal secundario de 4,3 km que recoge las aguas de Chubire y Copapujo.

El Canal Parinacota Sur tiene un desarrollo de 8.340 km, desde su nacimiento en el rápido del río Desaguadero hasta la bocatoma del Canal Lauca.

Ambos canales se consultan revestidos con losas de concreto prefabricadas y sus secciones se han calculado con holgura por lo que pueden servir de dren en el camino. En 1962, el costo de las obras ascendía a E<sup>9</sup> 750.000.

3º Canalización de las vertientes de la Ciénaga y del río Desaguadero, con rebaje y regulación de la laguna Cotacotani.

En esta solución se consulta la canalización de las vertientes de la Ciénaga y del río Desaguadero, en combinación con sacar provecho de la capacidad de almacenamiento de la fosa central de Cotacotani para regular el río Desaguadero. Se conseguirá esto último rebajando la laguna de su cota actual (4.500) a la de 4.492 y construyendo un pequeño tranque con cota de coronamiento de 495,0.

Después de un tanteo previo, se concluye que con la regulación propuesta puede llegarse a un gasto constante aprovechable de 0,780 m<sup>3</sup>/seg. para el Lauca, excepto naturalmente en los

meses de crecidas del propio río en que es superior.

Las dos soluciones siguientes interconectan las tres cuencas en estudio.

4º Canalización de las vertientes de la Ciénaga y regulación de Cotacotani, en combinación con túnel de conexión entre las lagunas de Chungará y Cotacotani.

Sería la enunciada, la fórmula de aprovechamiento integral de los recursos del Lauca. Como se vio, de la Laguna de Chungará se puede obtener un gasto constante de 0,160 m<sup>3</sup>/seg. Habría que vaciar este gasto a través de un túnel de sección mínima de 4,5 km de longitud a la laguna de Cotacotani. De la boca de salida a la fosa central de Cotacotani habría que construir un pequeño canal de 1,6 km a la cota de 495,0. El resto de las obras sería igual al indicado para la solución 3ª).

El túnel de comunicación es difícil de ejecutar debido a la calidad de los terrenos que atraviesa. Aunque no hay

opinión unánime de cuál es el origen cierto del portezuelo entre ambas lagunas<sup>3</sup>, es seguro que se trata de materiales no consolidados. Sólo sondeos bien dirigidos podrían aclarar la duda. A fines de 1962 se practicaron dos sondeos, pero no fueron concluyentes al respecto.

En esta solución, el gasto constante del río Lauca en bocatoma ascendería a 0,910 m<sup>3</sup>/seg. Se consigue, además, el importante aprovechamiento accidental del que se habló anteriormente.

5º Canalización de las vertientes de las Ciénagas; regulación en Cotacotani combinada con un canal alimentador desde el río Chungará.

Esta solución es una variante del caso anterior. Aquí no se usaría la laguna de Chungará como "canal", sino que los afluentes de superficie de ella se llevarían en un canal revestido de unos 28 km por la ribera sur de la laguna Chungará hasta Cotacotani, franqueando el portezuelo de Ajata por un corto

#### RESUMEN DEL COSTO Y BENEFICIO DE LAS SOLUCIONES

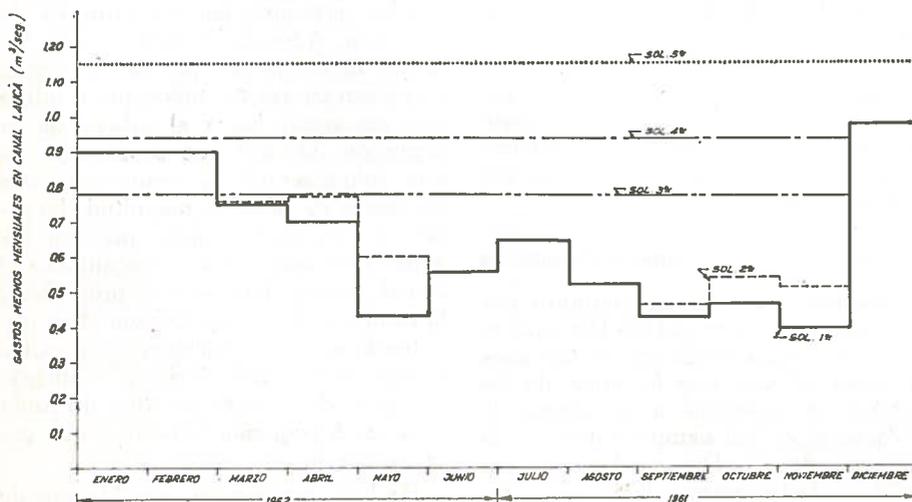
Solución	Costa total (miles de E <sup>9</sup> )	Hás. adic. en Azapa	Costo y Há adicional (E <sup>9</sup> )	Produc. anual (miles de E <sup>9</sup> )
1a.	—	—	—	—
2a.	750	75	10.000	64
3a.	1.030	292	3.560	234
4a.	2.675	611	4.370	489
5a.	2.818	1.080	1.500	864

#### AMPLIACION LAUCA

SIGNIFICADO HIDROLOGICO DE LAS DIVERSAS SOLUCIONES (1961 - 1962)

GRAFICO Nº 2

- RÍO LAUCA ACTUAL
- - - CANALIZACION DE LOS TRIBUTARIOS DE LA CIENAGA PARINACOTA (VERT. RÍO DESAGUADERO)
- · · OBRAS EN PARINACOTA Y EMBALSE COTACOTANI COMBINADO CON TUNEL CHUNGARA
- · · OBRAS EN PARINACOTA Y EMBALSE COTACOTANI COMBINADO CON CANAL CHUNGARA
- · · OBRAS EN PARINACOTA Y EMBALSE COTACOTANI



túnel. El diseño de este canal está en ejecución en estos momentos.

Haciendo la combinación de gastos medios mensuales, se concluye que el Lauca puede llegar a un gasto medio de 1,160 m<sup>3</sup>/seg. Es decir, sería ésta la solución más conveniente para el Lauca. No habría, sin embargo, aprovechamiento accidental de la Laguna Chungará por rebaje.

\* \* \*

Significado económico de las soluciones (Costos de mediados de Agosto de 1962)

El cuadro siguiente muestra, en forma muy resumida, una estimación del

<sup>3</sup>Un geólogo (Salas Olivares) opina que por debajo de las lavas de bloques se encontrará una zona espesa de morrenas y aluvium por sobre las volcanitas antiguas, en tanto que J. Karzulovic cree que se trata exclusivamente de efusivos y piroclásticos volcánicos, ligados a los centros volcánicos actuales. En su opinión serían rocas basálticas que se presentan en forma de coladas de lavas y también como materiales retrabajados y depositados en el portezuelo por la acción de lahares. También supone que por debajo se encuentra la formación riolítica.

beneficio de cada solución analizada, tanto en lo que se refiere a producción agrícola en el valle de Azapa como a generación de energía de Chapiquiña (caída de 1.000 metros). Los cálculos se han hecho a base de costos estimados a mediados de 1962. Se han computado las hectáreas adicionales que se podrían regar con las diversas soluciones, suponiendo una tasa de riego en Azapa de 15.000 m<sup>3</sup>/Há al año. Se anota el costo total de cada solución, el valor de la Há adicional y el bene-

ficio total anual (producción agrícola suponiendo que la Há rinde E<sup>2</sup> 500 por año más la energía hidroeléctrica, evaluando en E<sup>2</sup> 0,01 la ganancia líquida por KW - Hr generado).

\* \* \*

Finalmente, debemos decir que hay otros estudios que emprender en la región del nacimiento del río Lauca. Por ejemplo, por medio de sondajes exploratorios se podría evaluar la capacidad del embalse subterráneo de las Ciéna-

gas de Parinacota y llegar a formular un aprovechamiento de él mediante pozos. Se explotaría con la energía generada en la Central Chapiquiña.

Otra posibilidad es elevar hasta el Canal las recuperaciones del río aguas abajo de la bocatoma.

Sólo una vez que se tengan terminados los anteproyectos de todas las posibilidades, con sus correspondientes análisis económicos, se podrá decidir qué es lo de mayor conveniencia.

SANTIAGO, ENERO 1964.