

690-507
c.3

UNIVERSIDAD DE TARAPACA
FACULTAD DE CIENCIAS
DEPARTAMENTO DE QUIMICA

MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS
DIRECCION GENERAL DE AGUAS

MINISTERIO DE AGRICULTURA
CORPORACION NACIONAL FORESTAL

BIBLIOTECA
de la
DIRECCION GENERAL AGUAS

**RED NACIONAL MINIMA
DE CONTROL DE LAGOS
PRIMERA REGION**

**ESTUDIO DE LOS LAGOS
CHUNGARA Y COTACOTANI**

INFORME FINAL

E. Quintana St.
P. Mladinic P.
N. Hrepic G.

1989

El presente trabajo se realizó con el financiamiento de la Dirección General de Aguas (Ministerio de Obras Públicas), la Corporación Nacional Forestal (Ministerio de Agricultura) y la Universidad de Tarapacá (Vice-Rectoría Académica).

Los autores agradecen la colaboración de los ayudantes de investigación Sr. Carlos Molina y Srta Jacqueline Zepeda.

INDICE

	Pag.
INTRODUCCION	1
MATERIALES Y REACTIVOS	5
PARTE EXPERIMENTAL	7
Muestreo	7
- Preservación de muestras	9
Procedimientos analíticos	9
GEOMORFOLOGIA	13
FACTORES FISICOS	18
Valores de pH	18
Temperatura	18
Conductividad	24
- Transparencia	26
FACTORES QUIMICOS	29
Oxígeno disuelto	29
Incubaciones de oxígeno "in situ"	32
Alcalinidad	32
Dureza	33
Concentración iónica	34
Silice	34
Nitratos	37
Fosfatos	39
Indice de estado trófico (TSI)	40
CONCLUSIONES	45
BIBLIOGRAFIA	48
APENDICE 1. Programa de cálculo del % de saturación	52

INDICE DE TABLAS.

		Pag
TABLA N ^o 1	Parámetros morfométricos del lago Chungará.	15
TABLA N ^o 2	Parámetros morfométricos de la laguna Cotacotani.	15
TABLA N ^o 3	Algunos datos morfométricos de los lagos de la I Región.	17
TABLA N ^o 4	Resultado de los análisis realizados en el lago Chungará, estación "A".	19
TABLA N ^o 5	Resultado de los análisis realizados en el lago Chungará, estación "B".	20
TABLA N ^o 6	Resultado de los análisis realizados en la laguna Cotacotani, estación "C".	21
TABLA N ^o 7	Resultado de los análisis realizados en la laguna Cotacotani, estación "D".	22
TABLA N ^o 8	Contenidos de oxígeno disuelto (mg/L) incubaciones "in situ".	22
TABLA N ^o 9	Indice de estado trófico completo y sus parámetros asociados.	4
TABLA N ^o 10	Indice de estado trófico del lago Chungará.	42
TABLA N ^o 11	Indice de estado trófico de la laguna Cotacotani.	44

INDICE DE FIGURAS.

		Pag.
FIG. N ^o 1	Lago Chungará y laguna Cotacotani, ubicación de las estaciones de muestreo, "A", "B", "C", "D".	8
FIG. N ^o 2	Batimetría del lago Chungará.	16
FIG. N ^o 3	Perfiles verticales de temperatura, lago Chungará, estación "A".	23
FIG. N ^o 4	Perfiles verticales de temperatura, laguna Cotacotani, estación "D".	23
FIG. N ^o 5	Temperaturas superficiales del lago Chungará, ciclo anual, datos puntuales, 1982-87.	25
FIG. N ^o 6	Temperaturas superficiales de la laguna Cotacotani, ciclo anual, datos puntuales, 1983-87	25
FIG. N ^o 7	Perfil vertical de luminosidad.	28
FIG. N ^o 8	Contenidos superficiales de oxígeno disuelto (% de saturación), lago Chungará, estación "A".	30
FIG. N ^o 9	Contenidos superficiales de oxígeno disuelto (% de saturación), laguna Cotacotani, estación "D".	30
FIG. N ^o 10	Contenidos superficiales de sílice, lago Chungará, estación "A".	35
FIG. N ^o 11	Perfil vertical de sílice, lago Chungará, estación "A".	35

	Pag.
FIG. N ^o 12 Contenidos superficiales de sílice, laguna Cotacotani, estación "D".	36
FIG. N ^o 13 Perfil vertical de sílice, laguna Cotacotani, estación "D".	36
FIG. N ^o 14 Perfil vertical de nitratos, lago Chungará y laguna Cotacotani.	38
FIG. N ^o 15 Índice de estado trófico (TSISD), lago Chungará (1982 - 1984).	43

INDICE DE ABREVIATURAS.

UTA	= Universidad de Tarapacá.
DGA	= Dirección General de Aguas.
NBS	= National Bureau of Standard.
UV-VIS	= Ultravioleta - Visible.
na	= No analizado.
<ld	= Menor que el límite de detección.
OD1	= Contenido de oxígeno disuelto.
OD2	= Contenido de oxígeno disuelto en botella oscura (post - incubación).
OD3	= Contenido de oxígeno disuelto en botella clara (post - incubación).
t _i	= Tiempo inicial (incubación).
t _f	= Tiempo final (incubación).
TI	= Tiempo de incubación.
$\frac{O}{d}$	= Grados alemanes de dureza.
TSI	= Índice de estado trófico.
TSI _{SD}	= Índice de estado trófico (disco secchi).
TSI _{Chl}	= Índice de estado trófico (clorofila).
TSI _{TP}	= Índice de estado trófico (fósforo).

INTRODUCCION.

En la provincia de Parinacota, Primera Región, Chile, a 190 km de la ciudad de Arica y junto a la frontera Chileno-Boliviana, se encuentran las lagunas Chungará y Cotacotani.

La laguna Chungará está ubicada entre los paralelos 18' 10'' Sur y 18' 29'' Sur a una altura de 4520 m.s.n.m.. Su superficie es de aproximadamente 10 km², con una profundidad máxima de 32 m y una capacidad de almacenamiento de agua a nivel medio de 385 millones de metros cúbicos.

La laguna de Cotacotani está ubicada a 4 km al noroeste de la laguna Chungará y pertenece a la hoya del río Lauca. Tiene una superficie aproximada de 6 km² y un volumen de 30 millones de metros cúbicos de agua almacenada (1).

Estos cuerpos de agua fueron formados por las lavas del volcán Parinacota, cuando un río de lava andesítica cerró el valle del antiguo río Lauca que venía del sur, en la ribera norte de la laguna Chungará (2).

En Marzo de 1962 se dió comienzo a la utilización de las aguas del altiplano ariqueño en beneficio de la agricultura del valle de Azapa, con la inauguración de la obra de captación construida en la laguna de Parinacota y conocida como "Canal Lauca". Este canal permite la conducción del agua desde la laguna de Parinacota hasta la quebrada de Cosapilla, afluente del río San José, el cuál la lleva hasta el valle de Azapa (3).

En Abril de 1964, entró en funciones la obra de captación de agua de la laguna Cotacotani. Esta permite, a

través del río Desaguadero, llevar un volumen regulado hacia la laguna de Parinacota (3).

El año 1965 inició actividades la Central Hidroeléctrica de Chapiquiña, que utiliza como fuente energética el agua conducida por el canal Lauca (3).

El 20 de Abril de 1965 es creada la "Reserva Forestal Lauca", según Decreto Supremo N^o 284 del Ministerio de Agricultura (3).

El año 1966, se inició la ejecución del proyecto denominado "Impulsión Ajata" con el objetivo de bombear agua de la laguna Chungará hacia la laguna Cotacotani (3).

Por Decreto Supremo N^o 270 del Ministerio de Agricultura, se declaró el 11 de Agosto de 1970 "Parque Nacional de Turismo", los terrenos denominados "Reserva Forestal Lauca" y el 15 de Diciembre de 1981, el Parque Nacional Lauca es declarado por la UNESCO integrante de la red internacional de Reservas de la Biósfera. Esta red, integrada por zonas protegidas representativas de los principales tipos de ecosistemas del mundo, tiene como objetivo la conservación de la naturaleza y la investigación científica al servicio del hombre. Este Parque servirá como sistema de referencia para medir los impactos del hombre sobre el ambiente (3).

El año 1981, la firma Ricardo Edwards C. Ingenieros Ltda. hizo entrega al Ministerio de Obras Públicas del informe denominado "Plan maestro de acción inmediata para el sistema de riego del valle de Azapa" (4,5). Las faenas de

construcción del sistema, fueron iniciadas en Enero de 1983 por la firma Belfi Ltda. y en Octubre del mismo año se comenzó a bombear el agua a la laguna Cotacotani.

En Octubre de 1982, el Grupo de Contaminación Ambiental de la Universidad de Tarapacá (UTA), inició un estudio sistemático de las aguas de la laguna Chungará y laguna Cotacotani, con la finalidad de determinar su calidad química y su posible utilización como agua de riego y potabilidad (1,6,7).

En Mayo de 1983, es evacuado por la Dirección de Investigación de la Universidad de Tarapacá el documento de circulación restringida "Algunas consideraciones sobre la puesta en marcha del proyecto denominado: Plan maestro de acción inmediata para el sistema de riego del valle de Azapa" (3) que fué entregado a la Intendencia de la Primera Región, cuya filtración a la prensa local, desata la polémica nacional del problema de la laguna Chungará. Finalmente el 19 de diciembre de 1985, es acogido el recurso de amparo presentado ante la Corte Suprema, el cuál prohíbe la utilización de las aguas del lago Chungará.

En 1985, en la ciudad de Santiago, fué firmado un convenio de cooperación entre la Universidad de Tarapacá y las instituciones Dirección General de Aguas y Corporación Nacional Forestal, para realizar estudios relacionados con los cuerpos lénticos, laguna Chungará y laguna Cotacotani (8).

El proyecto entró en operación en Septiembre de 1986,

efectuándose 4 muestreos en total. Los primeros, fueron realizados en Septiembre de 1986 y Diciembre de 1986, fecha en que la ejecución del proyecto fué detenida debido a la exoneración del jefe de proyecto profesor Pedro Mladinic Pipcevic.

El proyecto fué reiniciado en Abril de 1987 y se realizaron dos muestreos en Mayo 1987 y Octubre 1987 fecha en que se completó el ciclo anual propuesto.

Se colectaron muestras de agua en duplicado en dos estaciones en la laguna Chungará y dos estaciones en la laguna Cotacotani, analizándose "in situ" la temperatura, pH, conductividad, transparencia, oxígeno disuelto y alcalinidad. En los laboratorios de la Universidad de Tarapacá, se analizaron además clorofila "a", amonio, nitratos, fósforo total, ortofosfato, silicato, sólidos disueltos, sólidos en suspensión, sodio, potasio, calcio, magnesio, sulfatos, cloruros, carbonatos y bicarbonatos. La segunda porción de muestra, fué enviada a la Dirección General de Aguas para efectuar los análisis en paralelo en sus laboratorios de Santiago.

Los resultados y conclusiones del estudio limnológico de las lagunas Chungará y Cotacotani son presentados en este informe.

MATERIALES Y REACTIVOS.

- Botella de muestreo de aguas de 2 lt de capacidad tipo Ruttner.
- Termómetro de inmersión, rango -2° a $+30^{\circ}$ C.
- Termómetro digital, rango 0 a 110° C, exactitud $\pm 0.2^{\circ}$ C certificado por la National Bureau of Standard (NBS).
- Disco Secchi de 25 cm de diámetro.
- Botellas BOD de 300 cc de capacidad, transparentes.
- Botellas BOD de 300 cc de capacidad, oscuras.
- Bote inflable tipo Zodiac con motor fuera de borda.
- Hieleras portátiles Coleman.
- pH-metro digital Extech modelo Oystey de terreno.
- pH-metro digital Orion-Research, modelo 701-A.
- Conductímetro digital Extech de terreno.
- Conductímetro Tacussel, tipo CD-7.
- Frascos plásticos de diversas capacidades con cierre hermético.
- Balanza semimicro analítica Sartorius, modelo 1712 MP8.
- Espectrofotómetro UV-VIS doble haz, PE 550-S.
- Espectrofotómetro de Absorción Atómica, PE 503.
- Estufa Kötterman con circulación de aire, control de tiempo y temperatura.
- Mufla Heraeus.
- Equipo para filtración al vacío Whatman, de 7 cm de diámetro.
- Equipo para filtración al vacío Sartorius, SM-16511.
- Filtros Whatman GF/C de 7 cm de diámetro.

- Filtros de membrana Sartorius 200-S, tipo 13400 de 4.7 cm de diámetro.
- Filtros de membrana Sartorius 200-S, tipo 13400 de 2.5 cm de diámetro.
- Crisoles de Gooch de 2.5 cm de diámetro.
- Columnas de vidrio para reducción con amalgama, 20 x 0.5 cm.
- Microbureta Resistance de 5.00 ml.
- Micropipetas Eppendorf Repeater 4780.
- Micropipetas Brand de 50-250 ml y 200-1000 ml.
- Tips y combitips plásticos.
- Electrodo selectivo de amonio Orion Research, modelo 95-10-00.
- Balsas para incubación de oxígeno con anclas.
- Material de vidrio de uso corriente en laboratorio.
- Reactivos Merck p.a.

PARTE EXPERIMENTAL.

Muestreo: En la laguna Chungará se establecieron dos estaciones de muestreo. La primera, denominada estación "A", se ubicó en la zona de mayor profundidad (Fig. N^o 1). En esta estación se tomaron muestras de 0, 15 y 30 m de profundidad. La segunda, denominada estación "B", fué ubicada en la punta del muelle de la casa de bombas, tomándose muestras a 0, 5 y 10 m de profundidad.

En la laguna Cotacotani, también se establecieron dos estaciones de muestreo. La primera, denominada estación "C", se ubicó en la bocatoma de la laguna (nacimiento del río Desaguadero), tomándose muestras a 0, 5 y 10 m de profundidad. La segunda estación de muestreo, denominada estación "D", fué ubicada en el centro de la laguna principal (Fig. N^o 1) y se tomaron muestras a 0, 5 y 10 m de profundidad.

Las muestras fueron tomadas en un bote inflable tipo Zodiac con una botella tipo Ruttner de dos litros de capacidad.

El período de muestreo se extendió por trece meses entre Septiembre de 1986 hasta Octubre de 1987. En este período se efectuaron los cuatro muestreos antes mencionados en las siguientes fechas: 1-2 de Septiembre de 1986; 18-19 de Diciembre de 1986; 20-21-22 de Mayo de 1987; 6-7 de Octubre de 1987.

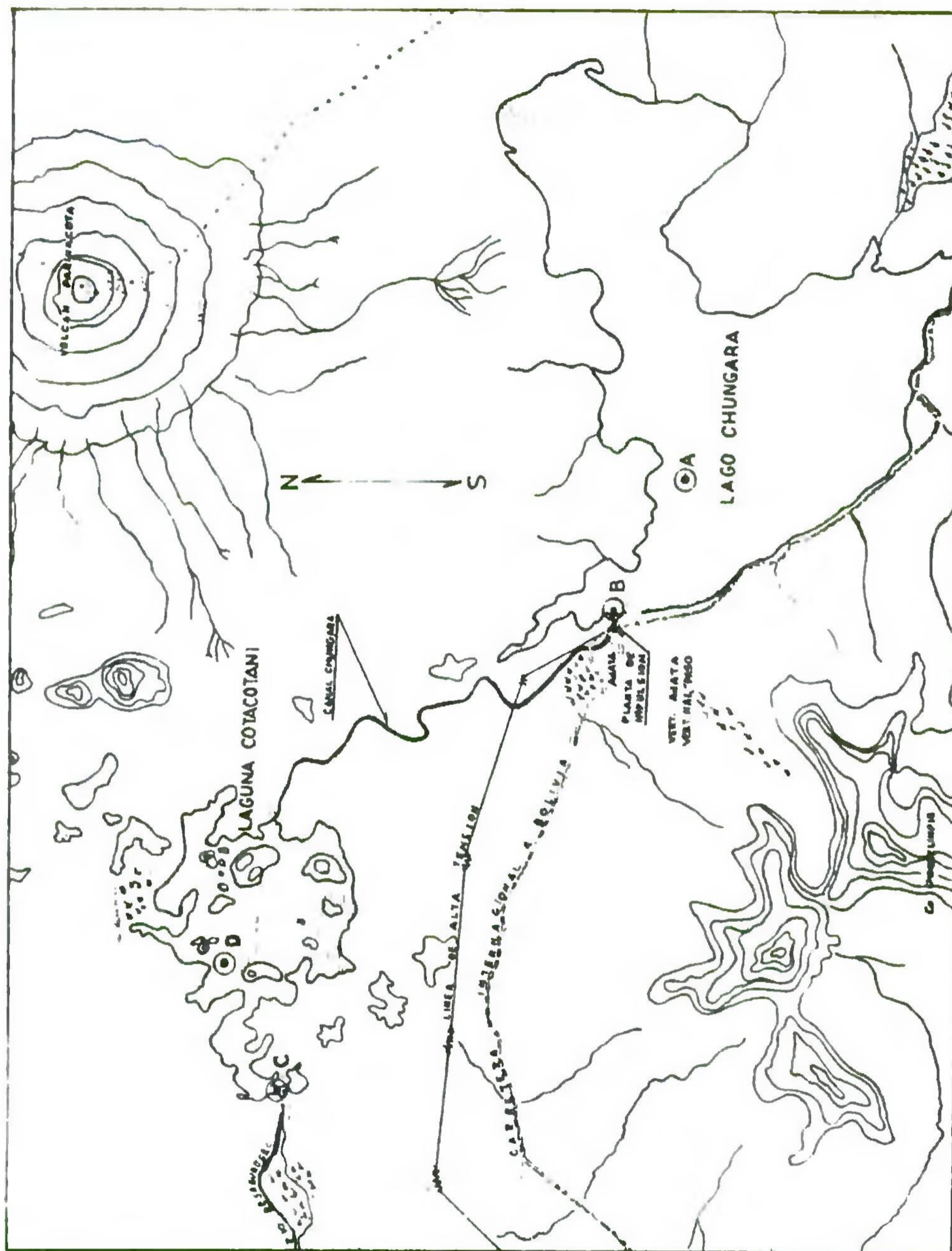


Fig. N° 1 Lago Chungará y laguna Cotacotani
ubicación de las estaciones de
muestreo, "A", "B", "C", "D".

Preservación de muestras: Debido a que ciertos parámetros químicos en las aguas pueden sufrir cambios significativos en corto tiempo, la temperatura, pH, conductividad y alcalinidades fueron determinados "in situ". Las muestras tomadas para oxígeno disuelto e incubaciones "in situ" fueron fijadas con solución de sulfato de manganeso (II) y yoduro alcalino. Las muestras destinadas al análisis de cationes por absorción atómica fueron pasadas a través de un filtro de membrana de 0.45 μ m de diámetro de poro y fijadas a $\text{pH} \leq 2$ con HNO_3 2.5 M. Otra porción de muestra destinada al análisis del ión amonio, fué preservada a $\text{pH} \leq 2$ con H_2SO_4 2.5 M. Las muestras tomadas para el análisis de clorofila, fueron filtradas "in situ" en filtros de membrana de 0.45 μ m de diámetro de poro y preservadas en una mezcla refrigerante en cápsulas Petri en ausencia de luz hasta su análisis en laboratorio. El resto de las muestras fué refrigerada a 4°C en frascos plásticos herméticos.

Procedimientos analíticos: Se emplearon los procedimientos analíticos prescritos por la American Public Health Association, American Water Works Association and Water Pollution Control Federation (9).

- Conductividad específica, test # 205: Se empleó en las medidas de conductividad un conductímetro digital Extech con celdas de 1 cm a la temperatura ambiente in situ y se corrigieron a 25°C .

- Temperatura, test # 212: Las mediciones de temperatura se realizaron con un termómetro de inmersión de mercurio y se

- chequearon con un termómetro digital certificado por la NBS.
- pH, test # 423: El pH se midió "in situ" con un pH-metro digital Extech realizándose calibración de dos puntos a pH 10 y pH 7.
 - Transparencia : Se midió la transparencia de los cuerpos de agua mediante disco secchi de 25 cm de diámetro.
 - Oxígeno disuelto, test # 421: Las muestras fueron colectadas en botellas BOD de 300 ml, fijándose el oxígeno con solución de sulfato de manganeso (II) y yoduro alcalino. El precipitado resultante, se disolvió en laboratorio con H_2SO_4 y se tituló con solución de tiosulfato de sodio estándar.
 - Alcalinidad, test # 403: Se empleó un procedimiento potenciométrico, valorando con HCl 0.02 N con micropipeta. Los resultados obtenidos fueron expresados como alcalinidad a pH 8.3 y pH 3.7.
 - Clorofila "a": Se filtró un volumen de agua adecuado en filtro de membrana de 0.45 μm de diámetro de poro Sartorius SM 13400, y se extrajo la clorofila por maceración mecánica en acetona y se centrifugó para separar el extracto. Se midió la absorbancia de la muestra contra blanco de acetona, realizándose un barrido espectral entre 750 nm y 665 nm en espectrofotómetro UV-VIS de doble haz con una resolución de 2 nm (10).
 - Amoníaco, test # 417-E: Se empleó un electrodo de ión selectivo Orion 95-10-00 de membrana permeable al gas disuelto. El ión amonio en solución es convertido en amoníaco al llevar la solución a pH \approx 11 con una base

fuerte. Este método es aplicable a concentraciones de 0.03 a 1.40 mg/L. Las lecturas se efectuaron por el método de adición de estándar.

- Nitratos, test # 419-C: Se determinó nitratos por método espectrofotométrico, previo paso de las muestras, por una columna reductora cargada con amalgama de cadmio que provoca la reducción de los nitratos a nitritos. Los nitritos fueron tratados con sulfanilamida y acomplexados con la N-(1-naftil)-etilendiamina que produce una laca coloreada que fué medida a 543 nm en un espectrofotómetro UV-VIS.

- Fósforo, etapa de filtración, test # 424-A: Una porción adecuada de muestra, fué pasada por filtro de membrana Sartorius SM 13400 de 0.45 μ m de diámetro de poro. Los filtros de membrana fueron previamente descontaminados con agua destilada. Esta porción de muestra se empleó en la determinación de fósforo filtrable reactivo ($P-PO_4^{-3}$).

- Fósforo filtrable reactivo, test # 424-F: Se determinó el fósforo como ortofosfato en una muestra filtrada (test 424-A) al hacerla reaccionar en medio ácido con tartrato de potasio y antimonilo para formar el heteropoliácido fosfomolibdico el cual fué reducido por el ácido ascórbico a azul intensamente coloreado (azul de molibdeno). Se efectuaron las mediciones en espectrofotómetro UV-VIS contra blanco reactivo.

Silice (SiO_2), test # 425-D: La silice reacciona con el molibdato de amonio a $pH \sim 1.2$ para formar el ácido molibdosilícico. La adición de ácido oxálico previene la interferencia de fosfatos. El ácido moliobdosilícico es

reducido con ácido amino naftol sulfónico. Se midió las muestras en espectrofotómetro UV-VIS a 815 nm.

Sólidos en suspensión (residuo no filtrable), test 209-D: Se filtró la muestra de aguas por filtro de membrana Sartorius de 0.45 μ m de diámetro de poro en crisol de Gooch, se secó en estufa a 103-105^o C y se determinó su contenido por gravimetría.

Sólidos disueltos (residuo filtrable), test # 209-B: Una alícuota adecuada del filtrado de residuos no filtrables, se evaporó en cápsula de porcelana y se secó a peso constante a 180^o C y se determinó gravimétricamente.

Metales filtrables disueltos, test # 302-A, test # 303-A: Las muestras de agua filtradas y preservadas a pH \leq 2 fueron analizadas por espectroscopia de absorción atómica, sodio, potasio y magnesio por aspiración directa a la llama aire-acetileno y calcio por llama de óxido nitroso.

Cloruros, test # 407-A: El contenido de cloruros fue determinado por el método de Mohr y por titulación potenciométrica.

Sulfatos, test 426-B: En muestras filtradas, se determinó gravimétricamente el ión sulfato, previa separación de interferentes con resina de intercambio iónico Merck I.

GEOMORFOLOGIA.

El desarrollo geológico del altiplano andino en la Primera Región, muestra una composición tectónica quebrada en dirección norte-sur que va subiendo en forma de escaleras desde la cordillera de la costa hasta el altiplano. Existen restos precámbricos de cordillera base en algunas partes de la cordillera de la costa y de la precordillera. También se conocen piedras metamorfas del Palioceno y sedimentos postorógenos del terciario, del jurásico y del cuaternario (2).

La zona del altiplano consiste de un piso riolítico del terciario que en su interior contiene series de piedras más antiguas. Los riolitos terciarios del altiplano forman un plateau volcánico que está cubierto de volcanes andesíticos del cuaternario. El plateau volcánico del terciario con la formación riolítica cuya edad en ignimbritos ha sido calculada en 10.0 ± 0.4 a 4.24 ± 0.05 mioaños (Ruthland et al 1985), conforman la planicie de altura del altiplano y está surcada por una red de drenajes (ríos) del joven terciario hasta el pleistoceno. La red de aguas del joven terciario hasta el pleistoceno fué influenciada en forma considerable en su recorrido por los volcanes jóvenes. La laguna Chungará fué creada cuando un río de lava andesítica cortó el valle del antiguo río Lauca (hoy río Chungará) que venía del sur, cerrando la ribera norte (2).

La laguna Chungará, está ubicada a $18^{\circ} 15'$ Sur y $69^{\circ} 9'$ Oeste a 4520 m.s.n.m. en el altiplano Chileno junto a la

frontera Chileno-Boliviana. Esta laguna, es la mayor del sector en la provincia de Parinacota junto a la laguna de Cotacotani que se encuentra a 4 km al noroeste y a 20 m más baja que la laguna Chungará (3) en la latitud $18^{\circ} 11'$ Sur y $69^{\circ} 13'$ Oeste.

La laguna Chungará, es alimentada por las aguas de una hoya cerrada de aproximadamente 260 km^2 , con un espejo de agua de 20 km^2 de superficie. Los aportes superficiales se producen a través del río Chungará, vertientes Ajata y Mal Paso y el estero Sopocalane. La salida de aguas se produce por evaporación y filtraciones subterráneas (4).

La laguna de Cotacotani está formada por cuatro lagunas de diferente tamaño de las cuales tres están conectadas mediante un canal y un bajo natural cuya cota de fondos es 4497 m.s.n.m. La laguna Cotacotani tiene como afluentes el río Benedicto Morales y el estero El Encuentro. Su salida de aguas da origen al río Desaguadero que vierte sus aguas en las ciénagas de Parinacota donde nace el río Lauca (2,4,5).

Según Karzulovic (3), la laguna Chungará y la laguna de Cotacotani, tuvieron origen en grandes erupciones del terciario superior al cuaternario, que sepultaron, bajo rellenos de lavas y flujos piroclásticos, amplias extensiones del plateau riolítico TV y de las antiguas redes de drenaje.

Ambos cuerpos de agua no presentan una gran profundidad, siendo la laguna Chungará la que alcanza una mayor profundidad máxima (40 m), el doble de la laguna Cotacotani. Los parámetros morfométricos (Tabla N^o 1 y Tabla N^o 2)

fueron obtenidos de un informe del sub-departamento de estudios hidrológicos de la Dirección General de Aguas (11) y la batimetría (Fig. N^o 2) de Villwock y colaboradores (2).

TABLA N^o 1

Parámetros morfométricos del lago Chungará

-Largo máximo	(Lm) :	9.0 km
-Ancho máximo	(Bm) :	7.0 km
-Ancho medio	(B) :	2.7 km
-Profundidad máxima	(Zm) :	40.0 m
-Profundidad media	(Z) :	4.8 m
-Relación profundidad media/máxima	(Z:Zm) :	0.12
-Area superficial	(A _o) :	24.3 km ²
-Volumen	(V) :	20 x 10 ⁶ m ³
-Desarrollo de línea de la costa	(DL) :	1.987
-Línea de la costa	(L) :	35 km

TABLA N^o 2

Parámetros morfométricos de la laguna Cotacotani

-Largo máximo	(Lm) :	4.95 km
-Ancho máximo	(Bm) :	4.00 km
-Ancho medio	(B) :	1.72 km
-Profundidad máxima	(Zm) :	20.00 m
-Profundidad media	(Z) :	8.0 m
-Relación profundidad media/máxima	(Z:Zm) :	0.38
-Area superficial	(A _o) :	8.50 km ²
-Volumen	(V) :	6.5 x 10 ⁶ m ³
-Desarrollo de línea de la costa	(DL) :	4.45
-Línea de la costa	(L) :	51.5 km

Sin embargo, existen discrepancias entre los parámetros morfométricos entregados por el informe Garín (11), los estudios realizados por Karzulovic (5) y los de Villwock (2), así por ejemplo, la profundidad máxima para el lago Chungará del informe Garín es de 40 m, Karzulovic indica 32

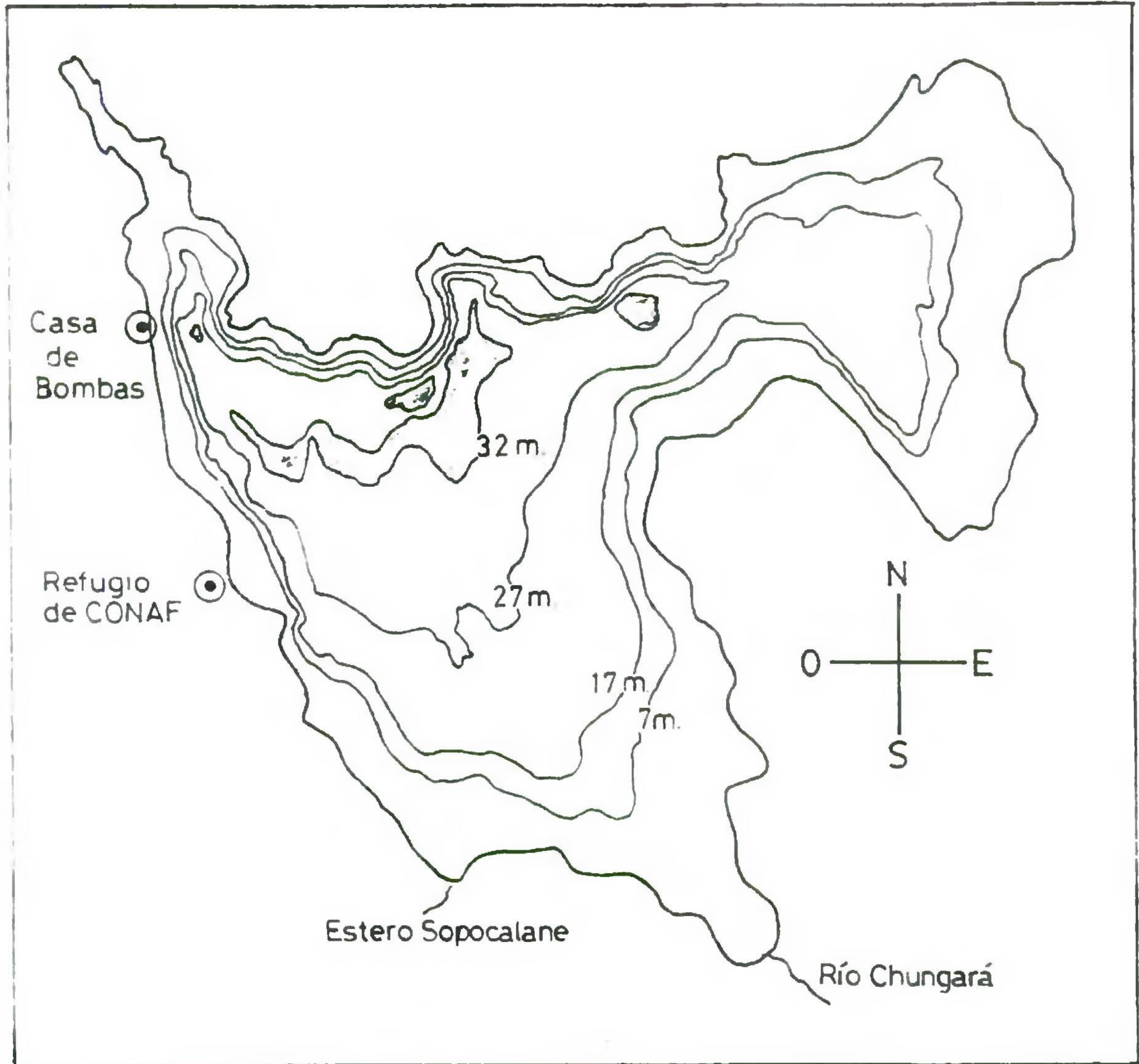


Fig. N^o 2 Batimetría del lago Chungará.

m. Durante los muestreos realizados en Chungará entre los años 1984 al 87, la sonda no descendió más de 30 a 32 m en la zona de mayor profundidad (estación "A").

Una profundidad media de 4.8 m para el lago Chungará (11) parece demasiado pequeña ya que la mayor área del lago se encuentra en la cota de profundidad mayor que 7 m (Fig. N^o 2). También existen diferencias entre el área superficial, Garín indica 24.3 km² y el dato aportado por Karzulovic es de 19 km².

Respecto a la laguna Cotacotani, también existen discrepancias entre los valores entregados en el informe Garín respecto de Karzulovic. El área superficial según Garín, es de 8.5 km² y Karzulovic indica 6 km².

Algunos antecedentes que demuestran estas diferencias pueden apreciarse en la tabla N^o 3.

Tabla N^o 3

Algunos datos morfométricos de los lagos de la I Región.

Fuente	Lago	Volúmen	Area
Edwards, Karzulovic año 1981 (5,4)	Chungará	385 x 10 ⁶ m ³	19 km ²
	Cotacotani	30 x 10 ⁶ m ³	6 km ²
Merino año 1984 (12)	Chungará	114 x 10 ⁶ m ³	24.3 km ²
	Cotacotani	6.8 x 10 ⁶ m ³	8.5 km ²
Garín año 1985 (11)	Chungará	20 x 10 ⁶ m ³	24.3 km ²
	Cotacotani	6.5 x 10 ⁶ m ³	8.5 km ²

FACTORES FISICOS.

Valores de pH: La medida de pH es una de los más importantes test en química de aguas, las aguas naturales comunmente tienen valores de pH en un rango de 4 a 9 unidades, valores superiores a 9, indican la presencia de carbonatos y bicarbonatos de metales alcalinos y alcalinotérreos (9). El lago Chungará presenta valores de pH en un rango de 8.9 a 9.53 con contenidos superficiales de 41.2 mg/L de carbonatos y 365 mg/L de bicarbonatos (Tabla N^o 4). La laguna Cotacotani tiene valores de pH menores que el lago Chungará (Tabla N^o 7) y un promedio de 8.77 unidades de pH. Los contenidos de carbonatos de 25 mg/L son aproximadamente la mitad que en el lago Chungará y los contenidos de bicarbonatos son de 231.3 mg/L.

Temperatura: Las mediciones de temperatura fueron realizadas en cada muestreo entre las 9:00 y 10:00 AM en todas las estaciones y profundidades seleccionadas (Tablas N^o 4,5,6,7). No existen variaciones importantes de temperatura en el perfil vertical tanto en el lago Chungará (Fig. N^o 3) como en la laguna Cotacotani (Fig. N^o 4). La mayor diferencia de temperatura (rango) en el lago Chungará (Estación "A"), entre el agua superficial y a 30 m fué de 2^o C en Diciembre de 1986. En la laguna Cotacotani (Estación "D") la mayor diferencia de temperatura entre el agua superficial y 10 m fué de 1.5^o C el mes de Diciembre, en el resto de los muestreos la diferencia fué menor de 1^o C.

Tabla N^o 4

Resultado de los análisis realizados en el lago Chungará
período 1986 - 1987.
Estación "A"

Parámetros medidos	Sep. 86	Dic. 86	May. 87	Oct. 87	Sep. 86	Dic. 86	May. 87	Oct. 87	Sep. 86	Dic. 86	May. 87	Oct. 87
Profundidad (m)	0	0	0	0	15	15	15	15	30	30	30	30
Temperatura (°C)	4.7	10	5.9	7.5	4.3	8.3	5.8	6.6	4.1	8.0	5.7	6.0
pH	9.15	9.19	9.38	8.9	9.12	9.19	9.53	8.90	9.10	9.12	9.40	8.90
Conductividad esp. (uS/cm 25° C)	1457	1333	1305	1280	1464	1347	1323	1281	1462	1332	1336	1284
Transparencia (DS m)	6.0	8.5	6.0	7	-	-	-	-	-	-	-	-
Oxígeno disuelto (mg/m ³)	5.89	5.13	6.78	6.93	5.72	5.10	6.56	6.93	5.52	4.93	6.60	6.50
Alcalinidad pH 8.3 (mg/L)	nd	51.0	45.9	38.7	nd	40.8	43.9	38.5	nd	30.7	42.8	43.0
Alcalinidad pH 3.7 (mg/L)	345	365	474	454	344	362	500	488	363	361	471	525
Clorofila "a" (mg/m ³)	2.02	2.02	na	0.98	3.79	3.79	na	0.82	1.98	1.98	na	0.66
N - NO ₃ ⁻ (ug/L)	15	na	250	111	14	na	192	64	13	na	222	82
P - PO ₄ ³⁻ tot. (ug/L)	601	937	1012	804	569	896	1030	820	619	986	1026	826
P - PO ₄ ³⁻ (ug/L)	584	745	848	796	584	755	824	764	584	783	872	772
SiO ₂ (ug/L)	890	754	3474	973	780	1248	3166	1128	1350	3990	3146	1051
Sólidos dis. (mg/L)	991	1129	985	1006	990	1139	1001	1033	992	1130	992	1021
Sólidos susp. (mg/L)	1.50	3.60	2.53	0.70	1.30	2.50	2.36	0.90	2.10	3.10	1.87	0.80
Sodio (mg/L)	132	135	140	132	133	135	140	132	133	131	140	136
Potasio (mg/L)	26.7	27.1	30.0	28.2	25.6	27.1	30.0	27.4	24.6	27.8	30.0	27.1
Calcio (mg/L)	45.8	47.0	47.5	55.6	46.4	47.0	48.8	54.8	46.5	47.0	48.8	54.4
Magnesio (mg/L)	85.9	89.6	87.5	86.9	84.4	89.6	87.5	84.5	84.3	89.6	87.5	85.2
Sulfatos (mg/L)	356	347	347	324	356	354	350	327	352	353	354	334
Cloruros (mg/L)	54.5	58.6	56.3	54.2	54.5	58.6	56.4	52.6	54.9	59.3	56.4	53.7
Carbonatos (mg/L)	56.6	49.0	35.8	23.2	51.3	49.0	35.8	23.2	45.5	45.3	35.7	25.8
Bicarbonatos (mg/L)	305	346	416	396	315	342	403	423	325	348	403	454

Tabla N° 5

Resultado de los análisis realizados en el lago Chungará
período 1986 - 1987.
Estación "B"

Parámetros medidos	Sep. 86	Dic. 86	May. 87	Oct. 87	Sep. 86	Dic. 86	May. 87	Oct. 87	Sep. 86	Dic. 86	May. 87	Oct. 87
Profundidad (m)	0	0	0	0	5	5	5	5	10	10	10	10
Temperatura (°C)	4.6	10.2	5.4	9.6	na	na	5.3	6.8	4.0	8.1	5.2	5.6
pH	9.12	9.16	9.40	8.90	na	na	9.43	8.90	9.07	9.08	9.39	8.90
Conductividad esp. (uS/cm 25°C)	1480	4341	1335	1268	na	na	1336	1273	1474	1357	1333	1268
Transparencia (DS m)	6.0	5.5	5.0	6	-	-	-	-	-	-	-	-
Oxígeno disuelto (mg/m ³)	5.92	5.11	6.79	7.38	na	na	6.66	7.16	5.80	5.06	6.50	5.84
Alcalinidad pH 8.3 (mg/L)	nd	34.7	43.7	47.2	na	na	39.6	38.7	nd	51.0	42.6	43.0
Alcalinidad pH 3.7 (mg/L)	351	362	459	516	na	na	471	522	352	361	471	514
Clorofila "a" (mg/m ³)	2.21	2.21	na	1.38	na	na	na	1.82	4.03	4.06	na	0.40
N - NO ₃ ⁻ (ug/L)	14	na	212	68	na	na	148	94	14	na	176	108
P - PO ₄ ³⁻ tot. (ug/L)	601	937	1048	790	na	na	1014	798	624	986	1302	808
P - PO ₄ ³⁻ (ug/L)	596	852	860	760	na	na	854	756	602	769	854	744
SiO ₂ (ug/L)	300	1604	3040	1357	na	na	3080	1227	230	1756	2804	1038
Sólidos dis. (mg/L)	1006	1138	979	1011	na	na	989	1035	1006	1132	980	994
Sólidos susp. (mg/L)	0.70	1.30	1.42	0.90	na	na	1.08	1.80	2.80	3.20	5.08	1.60
Sodio (mg/L)	137	131	140	134	na	na	138	136	136	131	140	136
Potasio (mg/L)	27.6	27.1	30.0	27.0	na	na	30.0	26.6	26.5	27.1	30.0	27.4
Calcio (mg/L)	49.0	47.5	47.5	54.0	na	na	47.5	55.5	46.2	47.0	50.0	51.4
Magnesio (mg/L)	83.2	89.6	87.5	84.8	na	na	87.5	87.5	87.3	88.8	87.5	82.3
Sulfatos (mg/L)	354	353	354	326	na	na	343	319	364	352	350	329
Cloruros (mg/L)	55.2	58.3	56.3	53.6	na	na	56.3	53.0	54.5	58.8	56.3	53.6
Carbonatos (mg/L)	52.6	41.6	35.8	28.3	na	na	35.7	23.2	52.9	61.2	35.8	25.8
Bicarbonatos (mg/L)	321	357	363	443	na	na	416	454	322	316	416	443

Tabla N^o 6

Resultado de los análisis realizados en la laguna Cotacotani.
período 1986 - 1987.
Estación "C"

Parámetros medidos	Sep. 86	Dic. 86	May. 87	Oct. 87	Sep. 86	Dic. 86	May. 87	Oct. 87	Sep. 86	Dic. 86	May. 87	Oct. 87
Profundidad (m)	0	0	0	0	5	5	5	5	10	10	10	10
Temperatura (°C)	6.1	10.2	5.3	12.1	na	na	5.3	10.3	5.8	11.0	na	na
pH	8.64	9.40	9.48	8.6	na	na	4.38	8.60	8.59	8.84	na	na
Conductividad esp. (uS/cm 25°C)	860	770	712	695	na	na	711	697	874	781	na	na
Transparencia (DS m)	3.0	5.5	3.5	3.5	-	-	-	-	-	-	-	-
Oxígeno disuelto (mg/m ³)	6.07	5.49	7.27	7.38	na	na	7.31	7.45	5.87	5.24	na	na
Alcalinidad pH 8.3 (mg/L)	nd	26.5	23.6	38.4	na	na	21.6	38.0	nd	27.5	na	na
Alcalinidad pH 3.7 (mg/L)	216	222	287	306	na	na	284	302	216	217	na	na
Clorofila "a" (mg/m ³)	2.23	2.23	na	<1d	na	na	na	<1d	1.99	1.99	na	na
N - NO ₃ ⁻ (ug/L)	11	na	91	46	na	na	66	40	10	na	na	na
P - PO ₄ ³⁻ tot. (ug/L)	194	584	604	352	na	na	562	342	188	557	na	na
P - PO ₄ ³⁻ (ug/L)	183	286	464	330	na	na	462	332	166	289	na	na
SiO ₂ (ug/L)	6060	26467	254	1418	na	na	369	1468	5670	20015	na	na
Sólidos dis. (mg/L)	565	651	499	518	na	na	493	536	570	656	na	na
Sólidos susp. (mg/L)	1.40	2.90	1.76	0.50	na	na	2.57	1.90	10.5	3.00	na	na
Sodio (mg/L)	77	57	61	56	na	na	61	56	75	57	na	na
Potasio (mg/L)	7.7	7.6	10.0	8.4	na	na	10.0	8.1	7.8	7.6	na	na
Calcio (mg/L)	48.3	47.3	48.0	50.0	na	na	49.4	50.0	47.8	46.8	na	na
Magnesio (mg/L)	36.4	43.3	40.6	40.7	na	na	40.0	40.0	37.2	43.3	na	na
Sulfatos (mg/L)	185	167	161	147	na	na	157	155	185	177	na	na
Cloruros (mg/L)	27.7	27.0	24.1	22.8	na	na	22.9	23.3	27.4	27.3	na	na
Carbonatos (mg/L)	<1d	31.8	22.7	23.0	na	na	22.8	22.8	<1d	33.0	na	na
Bicarbonatos (mg/L)	263	207	244	256	na	na	244	253	263	198	na	na

Tabla N^o 7

Resultado de los análisis realizados en la laguna Cotacotani.
período 1986 - 1987.
Estación "D"

Parámetros medidos	Sep. 86	Dic. 86	May. 87	Oct. 87	Sep. 86	Dic. 86	May. 87	Oct. 87	Sep. 86	Dic. 86	May. 87	Oct. 87
Profundidad (m)	0	0	0	0	5	5	5	5	10	10	10	10
Temperatura (°C)	5.7	11.7	5.3	9.6	na	10.3	5.3	9.2	5.4	10.2	5.3	8.8
pH	8.52	8.77	9.33	8.30	na	8.76	9.31	8.40	8.60	8.75	9.29	8.40
Conductividad esp. (uS/cm 25°C)	850	780	711	697	na	781	708	692	859	795	715	695
Transparencia (DS m)	2.5	7.0	4.0	4.5	-	-	-	-	-	-	-	-
Oxígeno disuelto (mg/m ³)	6.10	5.04	7.05	7.19	na	5.10	7.05	6.30	5.87	5.04	7.02	6.47
Alcalinidad pH 8.3 (mg/L)	nd	23.5	22.3	36.7	na	29.6	22.5	33.4	nd	29.1	17.4	33.0
Alcalinidad pH 3.7 (mg/L)	214	221	299	280	na	224	284	289	214	223	286	346
Clorofila "a" (mg/m ³)	3.40	2.03	na	0.33	na	3.40	na	<ld	1.23	1.23	na	<ld
N - NO ₃ ⁻ (ug/L)	12	na	60	33	na	na	107	70	11	na	66	40
P - PO ₄ ³⁻ tot. (ug/L)	188	474	600	332	na	488	598	342	200	478	586	334
P - PO ₄ ³⁻ (ug/L)	186	292	476	324	na	299	462	330	174	283	494	330
SiO ₂ (ug/L)	5710	25612	145	2292	na	25368	376	2670	5880	28526	231	2496
Sólidos dis. (mg/L)	564	623	490	538	na	640	487	532	556	631	507	528
Sólidos susp. (mg/L)	1.20	2.80	1.83	0.50	na	10.1	2.77	1.40	3.60	3.50	5.97	0.90
Sodio (mg/L)	74	57	59	54	na	57	58	59	74	60	61	57
Potasio (mg/L)	8.4	7.6	9.0	8.1	na	7.3	9.4	8.0	7.8	7.6	9.4	8.4
Calcio (mg/L)	46.0	46.8	48.8	48.8	na	47.7	50.0	52.0	47.1	47.3	50.0	49.9
Magnesio (mg/L)	37.2	43.3	40.0	40.7	na	43.3	40.0	40.7	35.6	43.3	40.0	39.5
Sulfatos (mg/L)	181	165	159	206	na	166	160	203	175	169	161	210
Cloruros (mg/L)	27.0	26.5	22.9	24.3	na	26.3	25.4	24.3	27.4	29.3	25.3	24.1
Carbonatos (mg/L)	nd	28.2	22.7	22.0	na	35.5	22.7	20.0	nd	34.3	22.8	19.8
Bicarbonatos (mg/L)	261	213	244	234	na	202	244	244	262	203	244	197

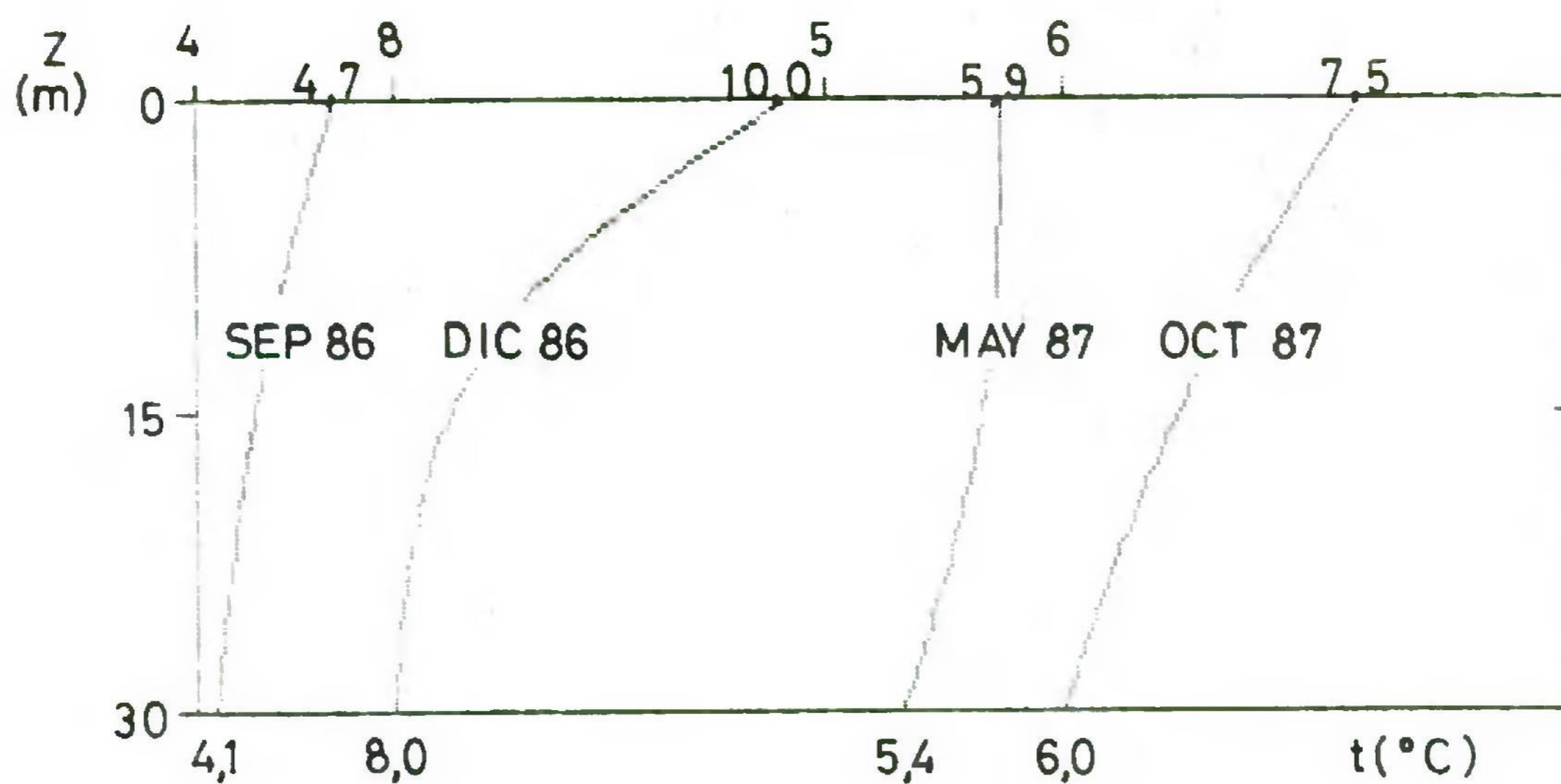


Fig. N^o 3 Perfiles verticales de temperatura lago Chungará, estación "A".

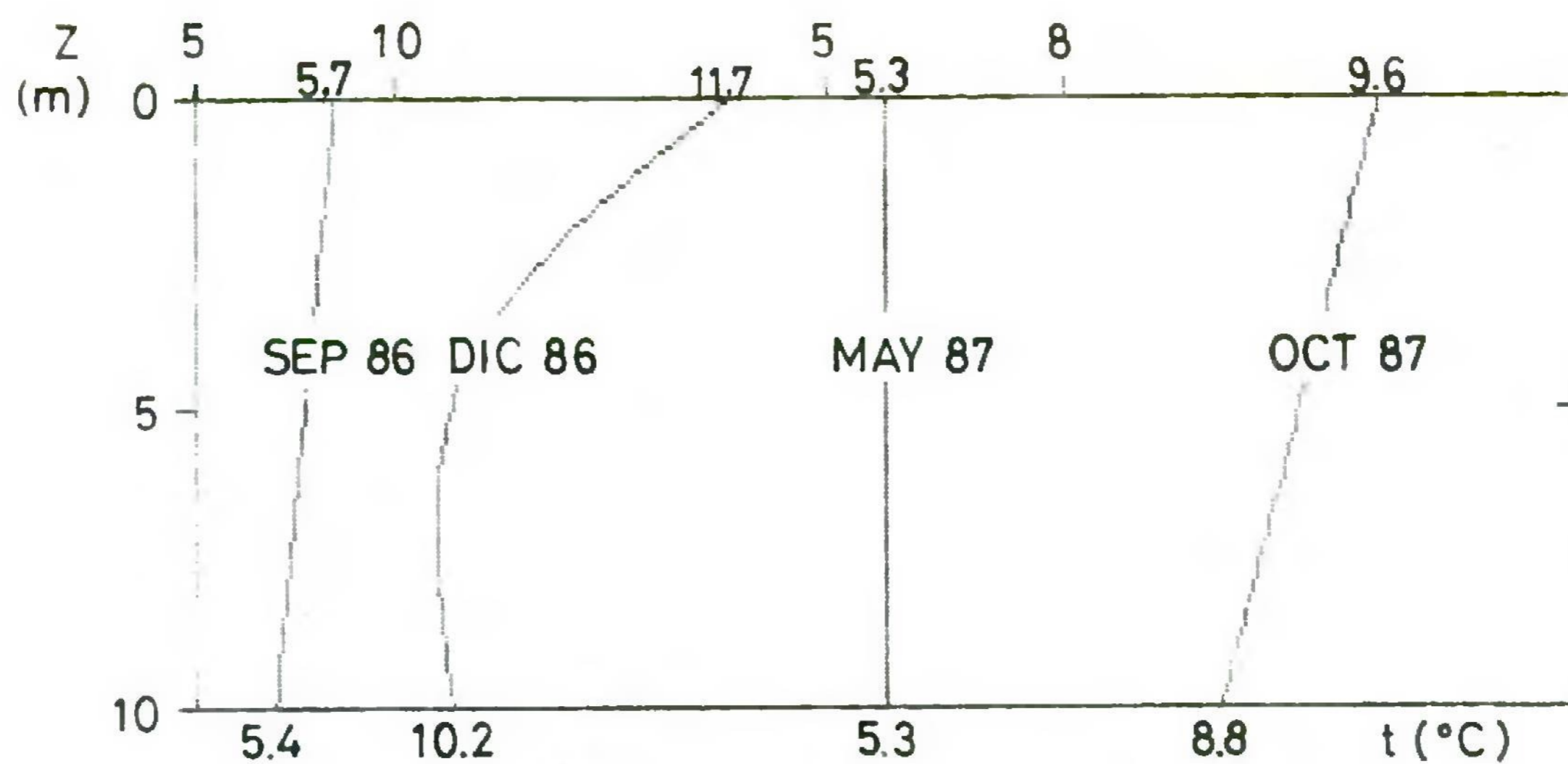


Fig. N^o 4 Perfiles verticales de temperatura laguna Cotacotani, estación "D".

En los meses del "invierno boliviano" (época de lluvias de verano), la temperatura superficial de las lagunas Chungará y Cotacotani asciende sobre los 8° C (Tablas N^o 4,5,6,7), siendo los meses de Junio, Julio y Agosto (época de las heladas), los de más bajas temperaturas. El ciclo anual de temperaturas en Chungará aparentemente mantiene su tendencia a través de los años, ya que no se aprecian diferencias importantes entre los años 1982 a 1987 (Fig. N^o 5). Sin embargo, se debe considerar que excepto el año 1983, el resto de los datos son valores puntuales. Particularmente difícil se hace determinar la tendencia del ciclo anual en la laguna de Cotacotani, ya que solamente se dispone de datos puntuales entre 1983 y 1987 (Fig. N^o 6). Sin embargo, se podría predecir un comportamiento similar al del lago Chungará, dadas sus características geomorfológicas.

Con los datos que se dispone, se podría decir que ambos cuerpos de agua presentan una variación de temperatura del orden de 10° en su ciclo anual. Por ejemplo en el caso del lago Chungará el año 1983 presentó un máximo de 13.5° C y una mínima de 3° C (6), si lo comparamos con un lago de la zona sur del país como es el caso del lago Ríñihue, el año 1975-76 presentó un máximo de 20° C y una mínima de 7° C (13).

Conductividad: De acuerdo a estudios anteriores (1,6,7) tanto el lago Chungará como la laguna de Cotacotani muestran una leve tendencia a aumentar la conductividad con la profundidad (Tablas N^o 4,7), sin embargo durante el muestreo

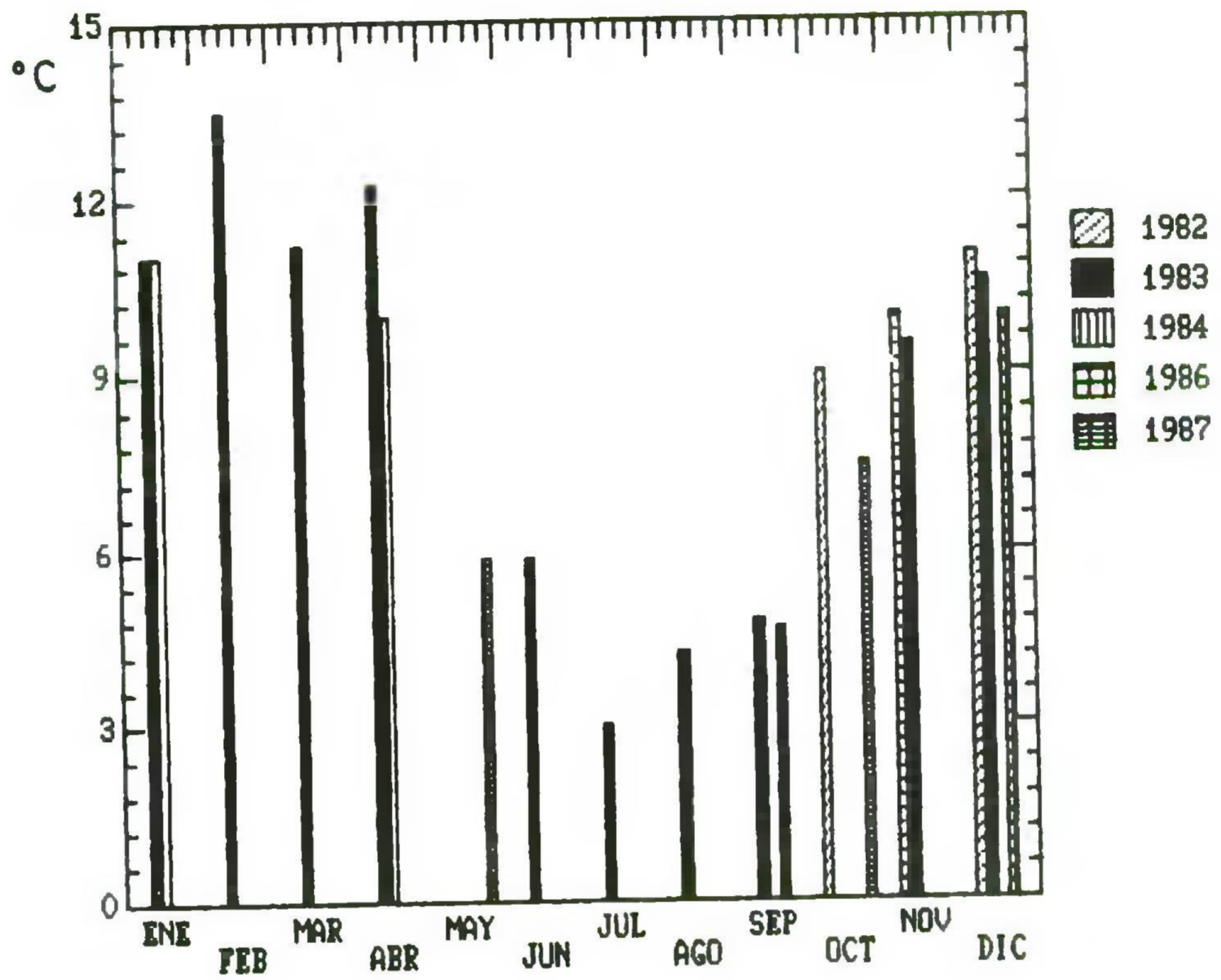


Fig. N° 5 Temperaturas superficiales lago Chungará, ciclo anual datos puntuales, 1982-87.

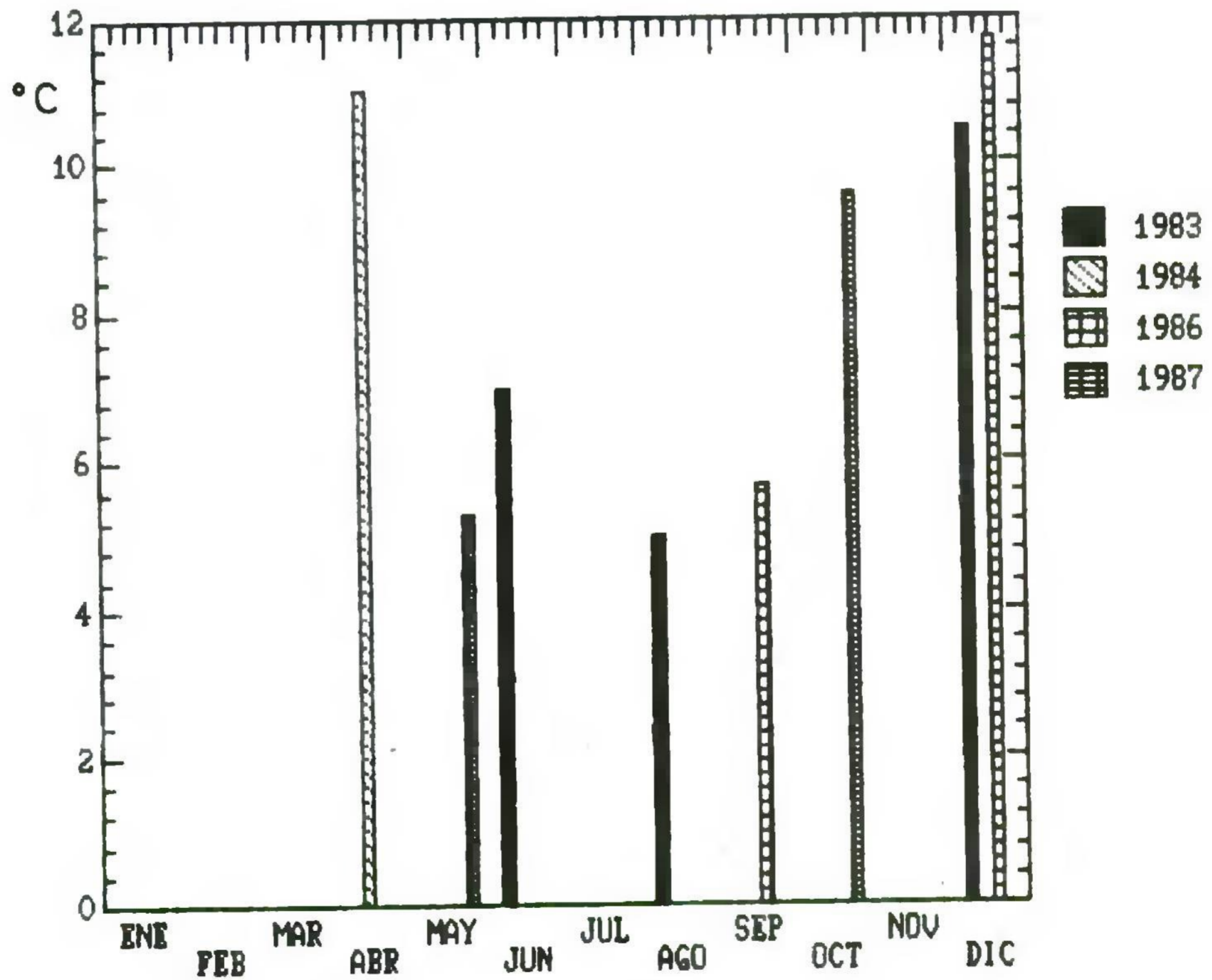


Fig. N° 6 Temperaturas superficiales laguna Cotacotani, ciclo anual datos puntuales, 1983-87.

de Septiembre-86 a Octubre-87, muestran una suave tendencia a disminuir, quizás debido al incremento de pluviosidad de ese periodo. La conductividad promedio en el periodo 86-87 es de 1348 uS cm^{-1} para el lago Chungará y de 757 uS cm^{-1} para la laguna Cotacotani, valores que no difieren de los anteriormente determinados por otros trabajos (1,2,4,6,7,14,15,16,17), 1399 uS cm^{-1} para Chungará y 848 uS cm^{-1} para Cotacotani entre los años 1982 a 1984.

Transparencia: Tanto en el lago Chungará como en la laguna Cotacotani, la máxima transparencia fué encontrada en el mes de Diciembre con 8.5 m para Chungará y 5.5 m para Cotacotani. El resto de los muestreos la transparencia fué relativamente pareja siendo el secchi mínimo para Chungará de 6 m y de 3 m para Cotacotani, ambas mediciones efectuadas en el mes de Septiembre de 1986.

En los muestreos realizados por Mladinic y colaboradores (1,6,7) en el lago Chungará el año 1982-84, el secchi promedio fué de 6.9 m siendo el secchi mínimo de 5 m y el máximo de 10 m.

En Mayo de 1986 se efectuó la determinación del perfil de luminosidad en la estación "A" del lago Chungará desde la superficie hasta una profundidad de 30 m donde la influencia de la luz es de un 0.027% de la luz superficial ($0.4 \text{ uE m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). El mes de Mayo, el secchi medido en el lago Chungará fué de 6 m ($120 \text{ uE m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) lo que indicaría un 8% de la luz superficial. La luminosidad global medida como radiación fotosintética activa (PAR) es muy alta, en Mayo de 1986 a

las 11:16 AM era de $2400 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (entre 400 y 700 nm). Para luz de 545 nm de longitud de onda, una transmisión mayor en la profundidad del 92%, indica que reina la luz verde poco utilizable para las plantas verdes (2).

En líneas generales, se toma como límite inferior de la zona eufótica, aquella que recibe la influencia de un 1% de luz superficial, sobre la cual es posible, una positiva productividad primaria neta. Para el muestreo de Mayo, el límite de 2 secchi fué de 12 m (1.51% de influencia de la luz) y el límite de la zona eufótica fué de 13 m (1% de influencia de la luz) (Fig. N^o 7).

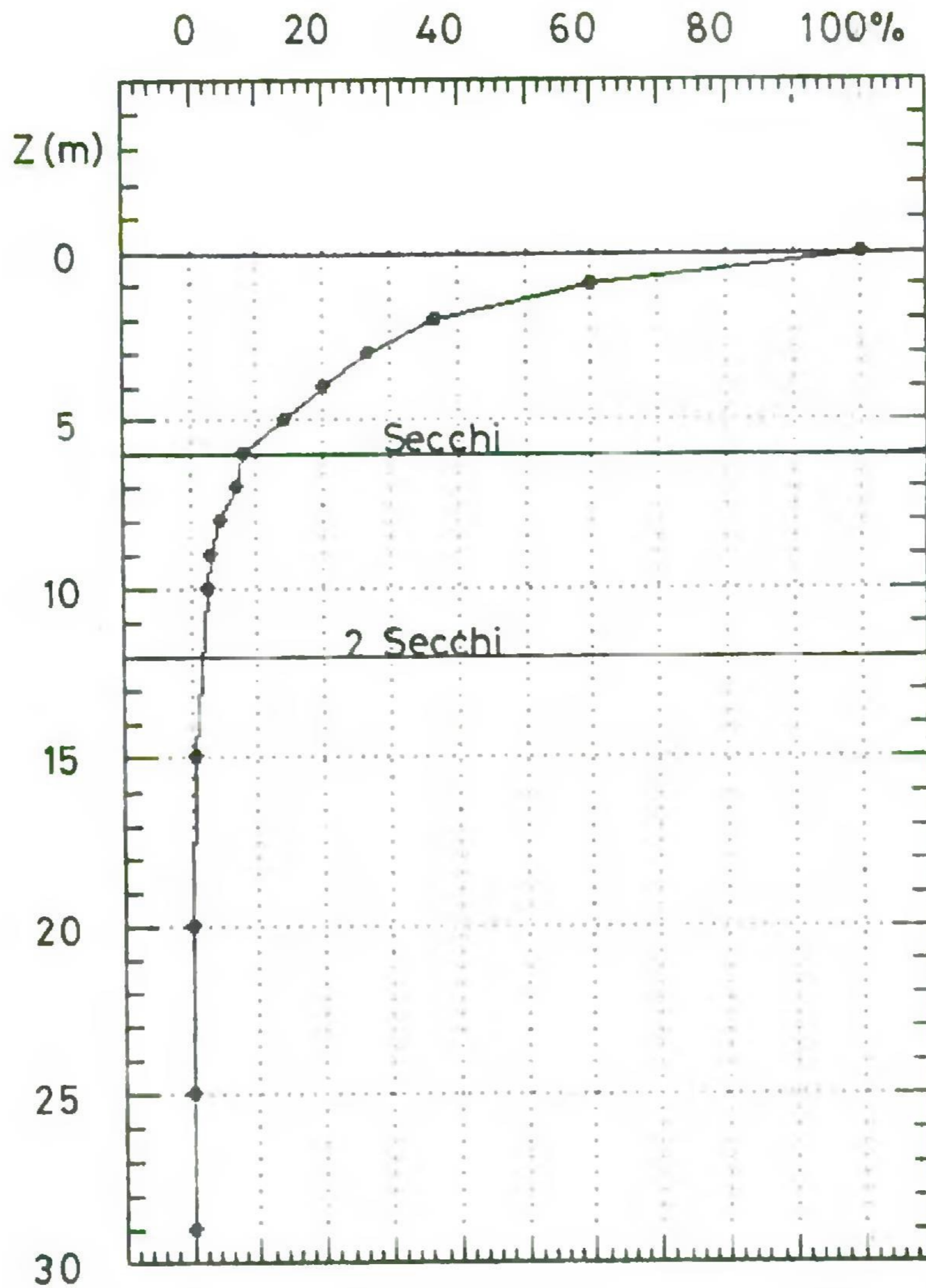


Fig. N^o 7 Perfil vertical de luminosidad
& de influencia fotónica ($\mu E m^{-2} s^{-1}$)
lago Chungará, estación "A"
21.05.87, 11:05 AM.

FACTORES QUIMICOS.

Oxígeno disuelto: La distribución de oxígeno disuelto en el periodo de muestreo (86-87) en el lago Chungará, muestra una tendencia a la saturación en los meses de menor temperatura (Mayo-Octubre), alcanzando valores de sobresaturación, en el muestreo efectuado en Octubre del 87 en las muestras superficiales (Fig. N^o 8). En el perfil vertical se observa una tendencia a disminuir el % de saturación al aumentar la profundidad. A 0 m el promedio del % de saturación era de 90.1, a 15 m de 87.0% y a 30 m 83.6%. El % de saturación es mayor en la orilla que al centro del lago con valores promedio de 93.0% y 90.1 % respectivamente.

La laguna Cotacotani, presenta un perfil de % de saturación similar al lago Chungará, siendo encontrado en el mes de Octubre valores de sobresaturación (Fig. N^o 9). En el perfil vertical, los valores promedio de saturación son de 94.5% a 0 m, 91.9% a 5 m y 89.4% a 10 m.

Los valores de concentración teórica de oxígeno disuelto, fueron calculados de acuerdo a los criterios de Mortimer (18) para una presión atmosférica de 0.568 atm para el lago Chungará y de 0.570 atm para la laguna Cotacotani, estimadas a partir de:

$$\ln Ph = 5.25 \ln (1-h/44.3) \quad \text{Ecuación 1}$$

considerando altitudes de 4520 m.s.n.m. para el lago Chungará y 4497 m.s.n.m. para la laguna Cotacotani.

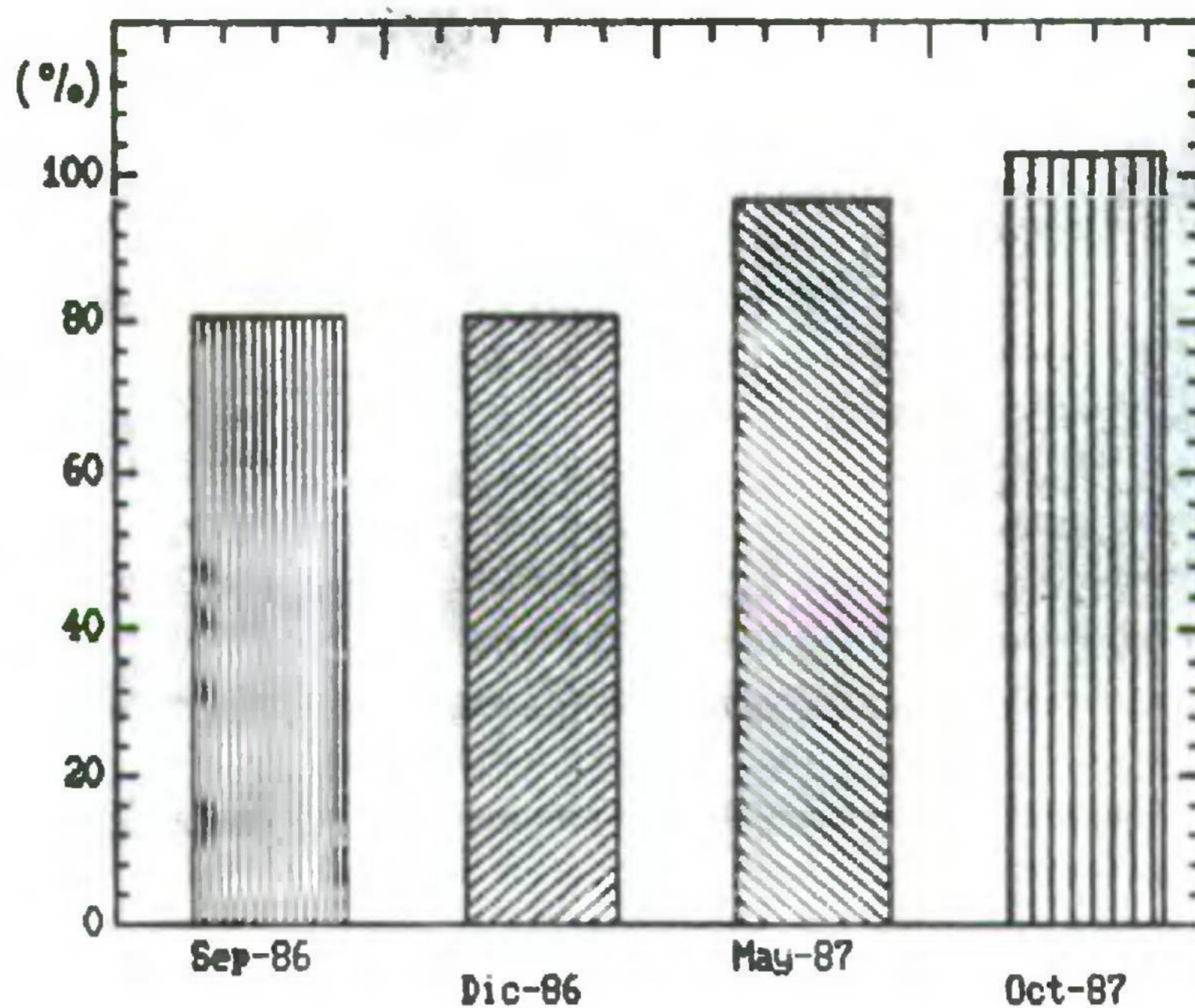


Fig. N^o 8 Contenidos superficiales de oxígeno disuelto (% de saturación) Chungará, estación "A".

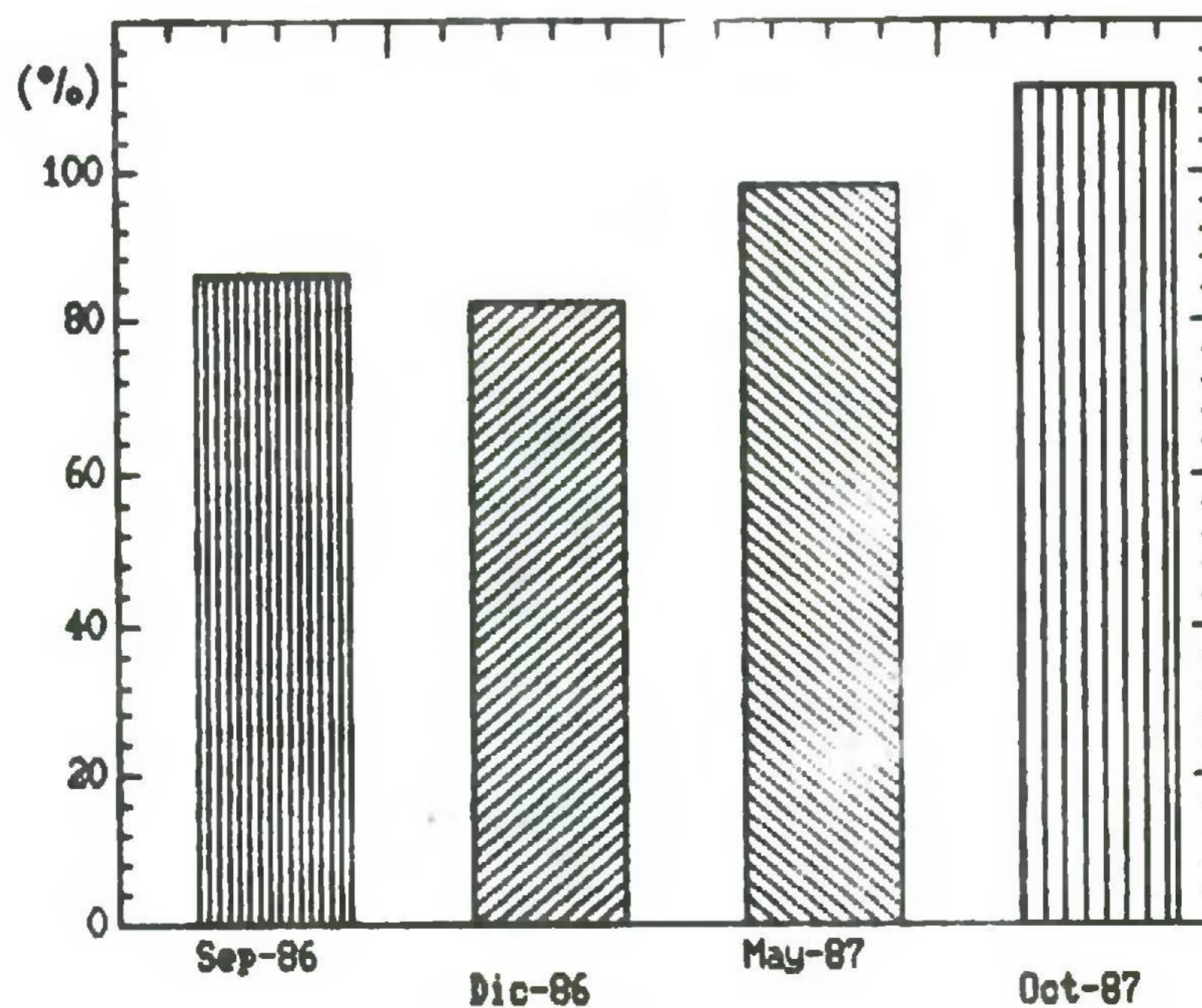


Fig. N^o 9 Contenidos superficiales de oxígeno disuelto (% de saturación) laguna Cotacotani, estación "D".

La concentración no estándar, fué estimada por:

$$C_{\text{no est}} = C^* P W \quad \text{Ecuación 2}$$

La expresión $C^* P$ fué deducida de:

$$\ln C^* P = 7.7117 - 1.31403 \ln(t+45.93) + 5.25 \ln(1-h/44.3)$$

Ecuación 3

El cálculo de W fué realizado por:

$$W = \left[\frac{(1 - P_{wv}/P) * (1 - \theta P)}{(1 - P_{wv}) * (1 - \theta)} \right] \quad \text{Ecuación 4}$$

donde:

$$\ln P_{wv} = 11.8571 - (3840.70/T) - (216961/T^2)$$

Ecuación 5

y:

$$\theta = 0.000975 - (1.426 \times 10^{-5} t) + (6.436 \times 10^{-8} t^2)$$

Ecuación 6

donde:

- C^* = unidad de concentración estándar (ng dm^{-3})
- P_{wv} = presión de vapor de agua
- h = altura en km
- t = temperatura en $^{\circ}\text{C}$
- T = temperatura en $^{\circ}\text{Kelvin}$
- P_h = presión en atmósferas

Las ecuaciones 1, 2, 3, 4, 5 y 6, fueron programadas en un microprocesador (apéndice N^o 1) obteniéndose una distorsión no superior a un 0.05% en los cálculos.

Incubaciones de Oxígeno "in situ": El mes de Mayo de 1986 se realizaron las incubaciones de oxígeno para determinar productividad primaria. Se colocaron balsas en el lago Chungará en las estaciones "A" y "B" y en Cotacotani, estaciones "C" y "D" con cuelgas de botellas BOD de 300 ml claras y oscuras a distintas profundidades. Los resultados de este experimento (Tabla N^o 8) indicaron que el tiempo de exposición de 2 a 6 horas no fué suficiente para encontrar valores adecuados para el cálculo de la productividad, debido a la precisión analítica del método, es decir, cuerpos de agua con productividades mayores de 5 mg m^{-3} (10).

Tabla N^o 8.

Contenidos de oxígeno disuelto (mg/L)
incubaciones "in situ".

Estación	Z (m)	OD1	OD2 oscura	OD3 clara	ti	tf	TI
A	0	6.78	6.59	6.82			
A	15	6.56	6.47	6.60	15:40	18:08	02:28
A	30	6.60	6.60	6.66			
B	0	6.79	6.53	6.47			
B	5	6.66	6.01	6.50	10:04	15:56	05:52
B	10	6.50	6.34	6.34			
C	0	7.27	7.31	7.24			
C	5	7.31	7.24	7.31	12:40	17:04	04:24
D	0	7.05	6.34	7.05			
D	5	7.05	6.98	6.98	14:30	16:40	02:10
D	10	7.02	6.92	6.89			

Alcalinidad: La alcalinidad de un agua es considerada su capacidad cuantitativa para reaccionar con un ácido fuerte a un pH determinado. La alcalinidad es una medida de

propiedades agregativas de un agua y pueden ser interpretadas en término de una sustancia específica cuando la composición química de la muestra es bien conocida (9). La alcalinidad de ambos cuerpos de aguas es debida principalmente a los contenidos de carbonatos y bicarbonatos. En el lago Chungará, los contenidos promedio por profundidad fueron de 45.2, 41.1 y 41.2 mg/L a 0, 15 y 30 m (pH 8.3) y de 410.7, 410.8 y 429.5 mg/L a 0, 15 y 30 m (pH 3.7). En la laguna Cotacotani los contenidos promedio por profundidad fueron de 29.6, 28.5 y 26.5 mg/L a 0, 5 y 10 m (pH 8.3) y de 253.4, 265.8 y 267.5 mg/L a 0, 5 y 10 m (pH 3.7).

Dureza (Ca + Mg): Los contenidos de Calcio y Magnesio en el lago Chungará son bastante uniformes (Tabla N^o 4,5), no presentando variación estacional ni en profundidad significativa. La relación Ca:Mg es de 0.56 indicando una predominancia de magnesio sobre calcio. El contenido de Ca + Mg expresado como CaCO₃ es de 480.5 mg/L lo que es equivalente a 26.9 ^od (grados alemanes de dureza), lo que significa que el agua del lago es un agua dura (18 - 30^od) (19).

En la laguna Cotacotani, las variaciones verticales y horizontales son también bastante parejas (Tabla N^o 5,6), pero la relación Ca:Mg es de 1.21, lo que indica una leve predominancia de Ca sobre Mg, relación contraria a la del lago Chungará. Estudios preliminares recientes (20), revelan una fuerte capacidad de intercambio iónico (CIC) al ión Mg⁺²

en la fracción orgánica de los sedimentos de una laguna seca en Cotacotani, esto podría significar que en caso de filtrar las aguas desde el lago Chungará a la laguna de Cotacotani, parte del magnesio pudiese estar siendo retenido por la materia orgánica de las turbas en los sedimentos lacustres entre ambos cuerpos de agua. El contenido de $\text{Ca} + \text{Mg}$ expresado como CaCO_3 es de 287.9 mg/L, lo que corresponde a 16.1 $^{\circ}\text{d}$ que la cataloga como un agua semi-dura (8 - 18 $^{\circ}\text{d}$) (19).

Concentración iónica: La concentración iónica equivalente para la composición iónica, muestra la tendencia $\text{SO}_4^{=}$ > HCO_3^{-} > Cl^{-} > $\text{CO}_3^{=}$ para los aniones del lago Chungará, para la laguna Cotacotani la tendencia es de HCO_3^{-} > $\text{SO}_4^{=}$ > $\text{CO}_3^{=}$ > Cl^{-} .

Para los cationes del lago Chungará y la laguna Cotacotani, la concentración iónica equivalente para la concentración iónica es la misma, Mg^{+2} > Na^{+1} > Ca^{+2} > K^{+1} .

Silice (SiO_2): En el lago Chungará, los contenidos de silice muestran variabilidad estacional y en profundidad. El máximo contenido de silice alcanzado en la estación "A" se produce en Mayo con 3.47 mg/L (Fig. N^o 10), siendo en los otros meses de aproximadamente 1 mg/L. El promedio por profundidad en la estación "A", indica un incremento de SiO_2 hacia los 30 m (Fig. N^o 11).

En la laguna Cotacotani, las variaciones estacionales en los contenidos de silice es bastante más pronunciada que en Chungará (Fig. N^o 12).

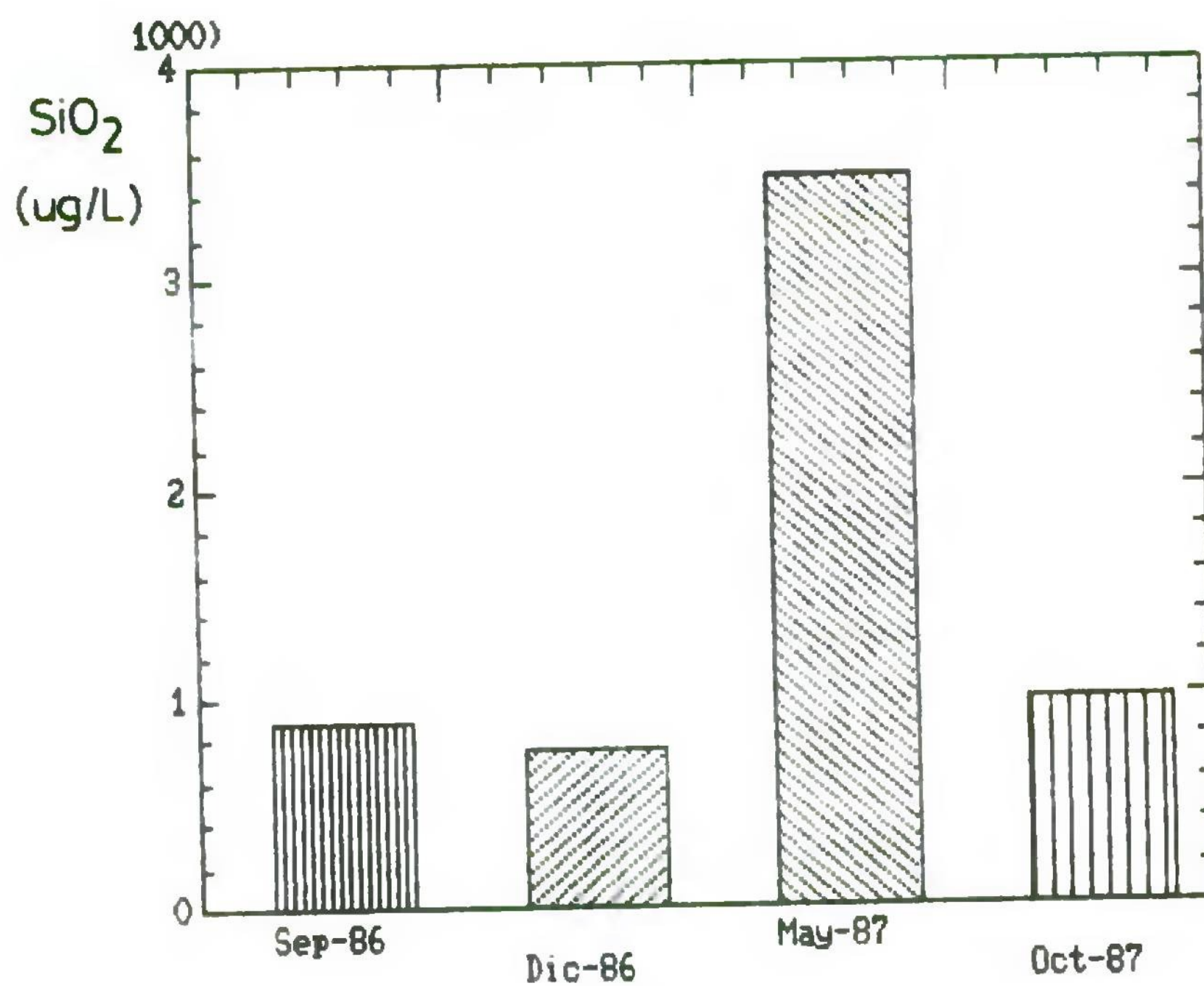


Fig. N^o 10 Contenidos superficiales de sílice lago Chungará, estación "A".

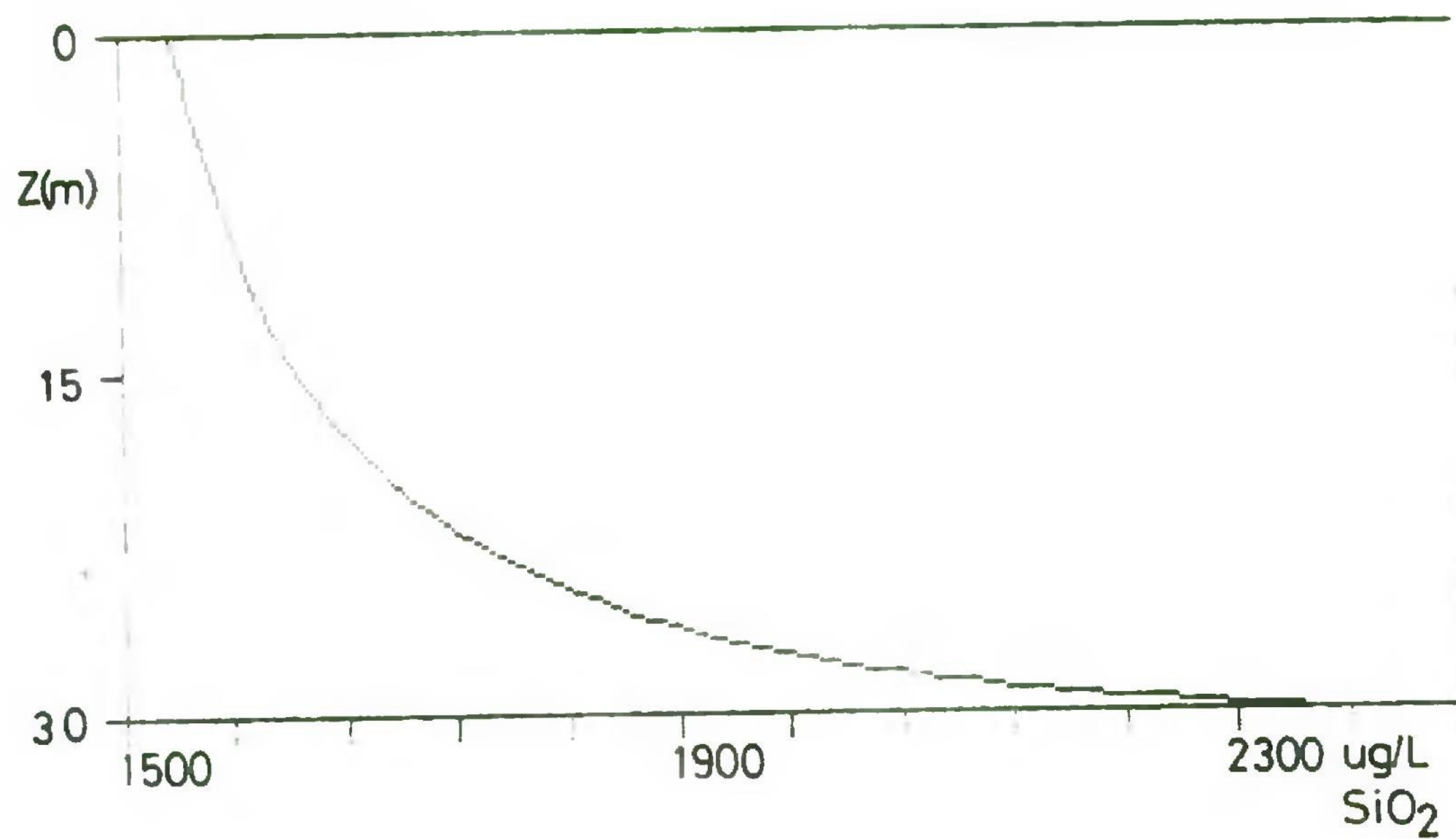


Fig. N^o 11 Perfil vertical de sílice lago Chungará, estación "A".

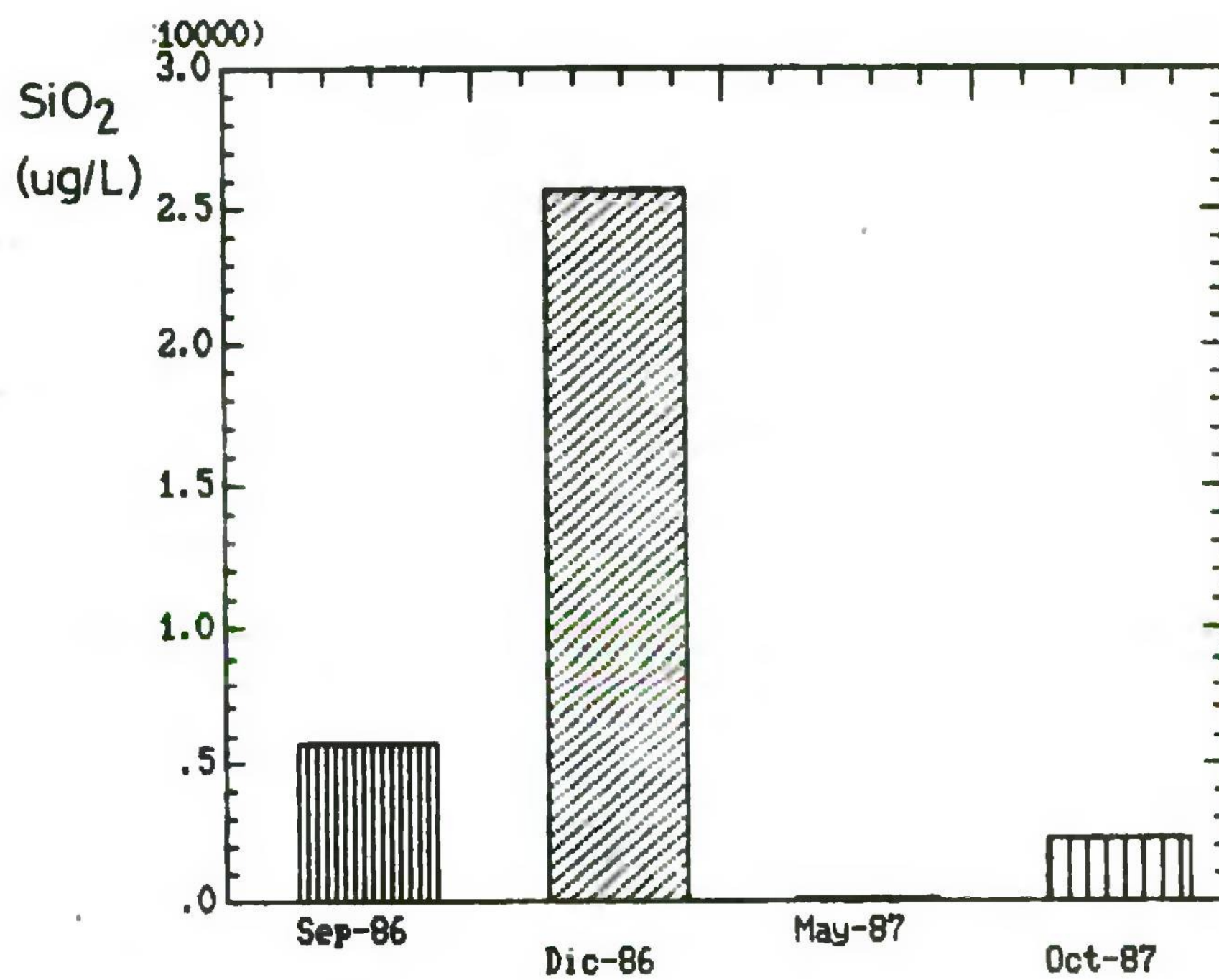


Fig. N^o 12 Contenidos superficiales de sílice laguna Cotacotani, estación "D".

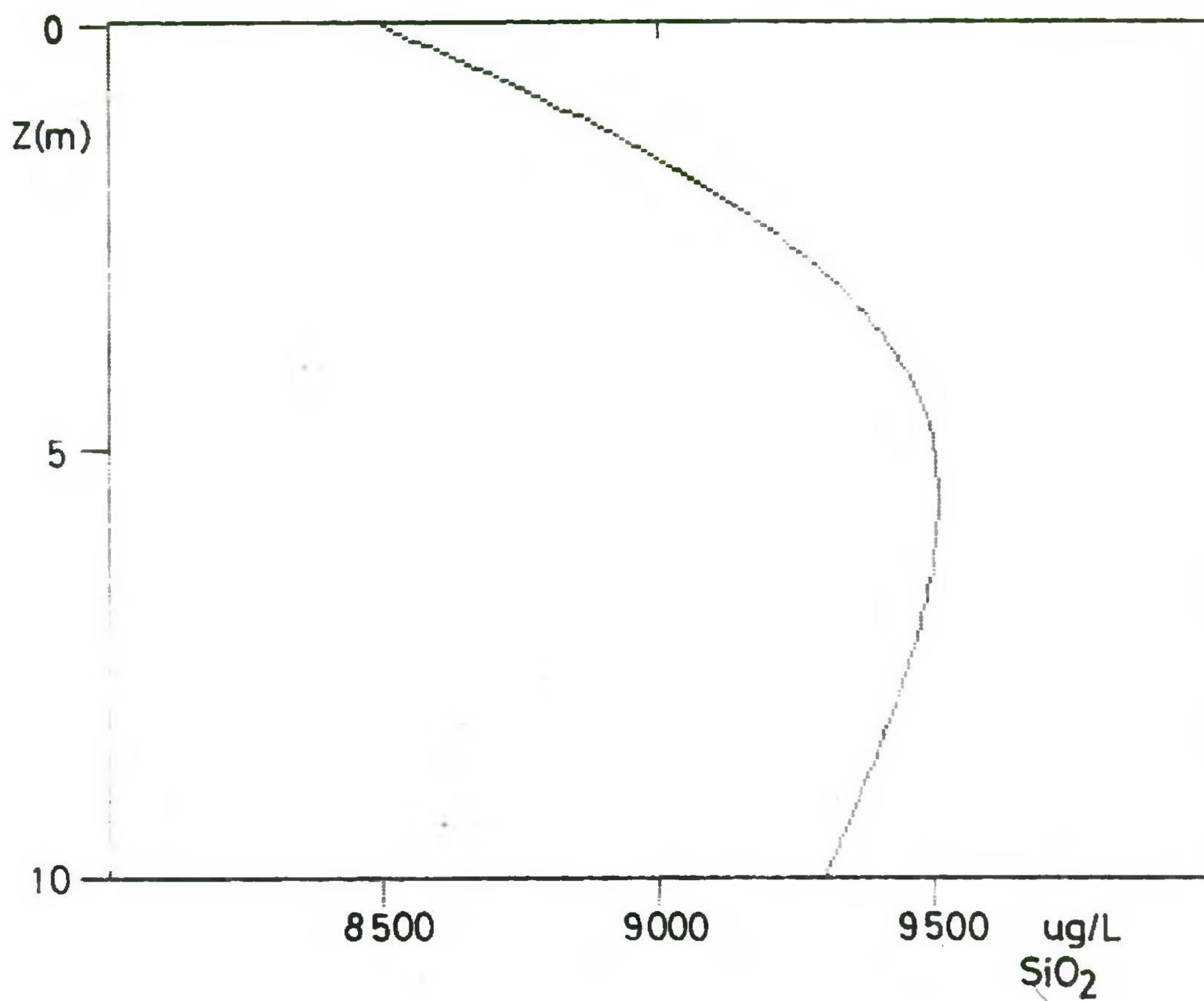


Fig. N^o 13 Perfil vertical de sílice laguna Cotacotani, estación "D".

En la Fig. N^o 13 se puede apreciar un pico de 25.6 mg/L en aguas superficiales y en profundidad.

Las variaciones de los contenidos de sílice, tanto en el lago Chungará como en la laguna Cotacotani, estarían indicando la actividad biogénica de estos cuerpos de agua.

Nitratos: Los contenidos de nitrato inorgánico muestran un pico de concentración tanto en profundidad como en superficie en el lago Chungará el mes de Mayo-87 (Tablas N^o 4,5), con contenidos de 250, 192 y 222 mg/L a 0, 15 y 30 m de profundidad. Los valores promedio por profundidades mantienen esta tendencia siendo mayores en superficie y profundidad, disminuyendo en la zona de 15 m. (Fig. N^o 14).

La laguna Cotacotani, tiene contenidos de nitrato inorgánico 22 veces menor que el lago Chungará, existiendo un pico de concentración el mismo mes que en Chungará (Tablas N^o 5,6) con contenidos de 60, 107 y 66 mg/L de NO_3^- a 0, 5 y 10 m de profundidad.

No fueron detectados contenidos de iones nitrito ni amonio en los análisis realizados en la Universidad de Tarapacá, sin embargo, los análisis del mes de Mayo de la Dirección General de Aguas revelan un contenido promedio de ión amonio de 92 ug/L en Chungará y 178 ug/L en Cotacotani. La discrepancia entre ambos laboratorios puede deberse a que parte del nitrato inorgánico se esté determinando como amonio (DGA), o que debido a la gran solubilidad de este ión, se esté determinando el "background" del laboratorio. Ensayos realizados en el laboratorio de la Universidad de

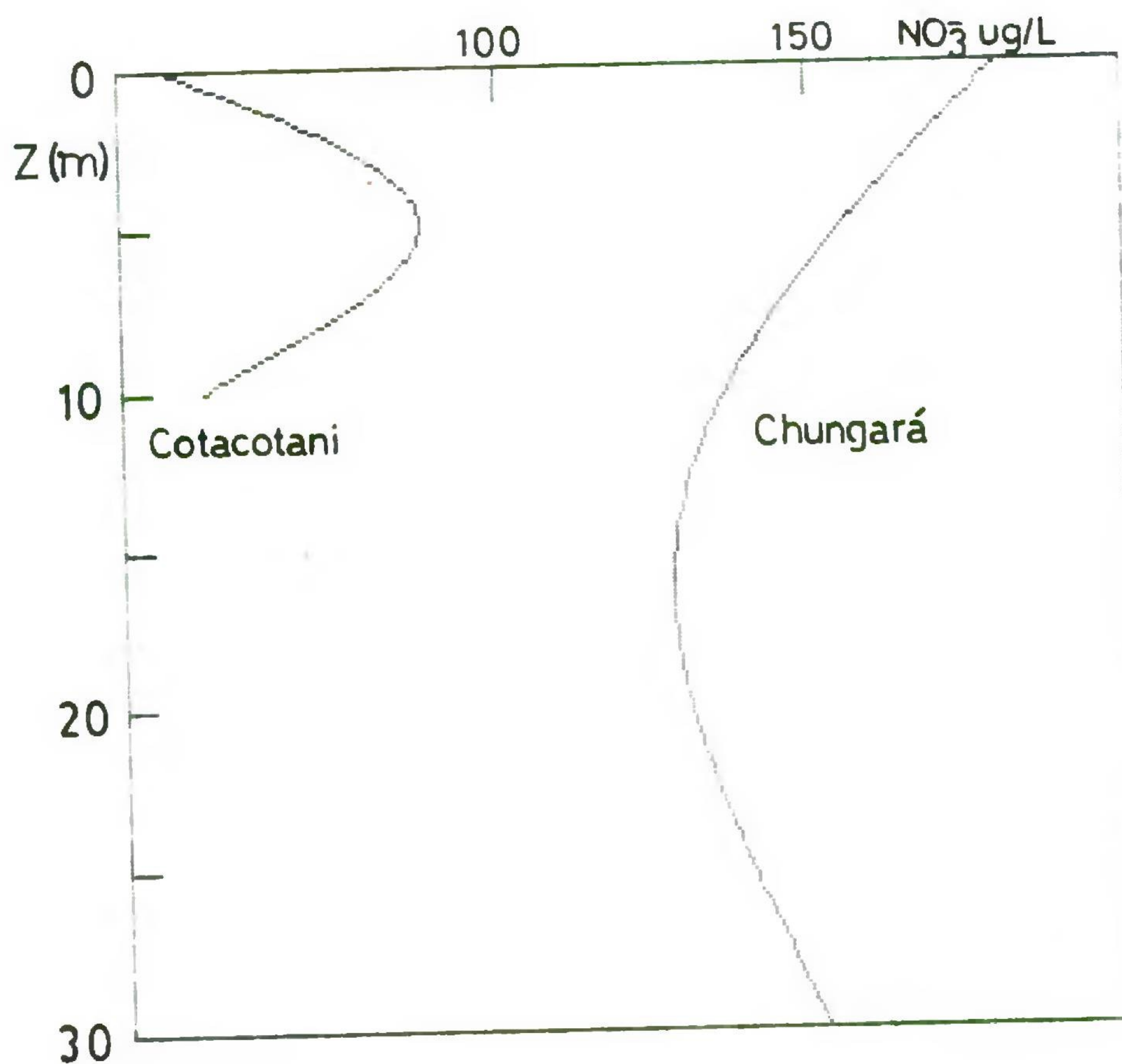


Fig. N^o 14 Perfil vertical de Nitratos lago Chungará, estación "A" laguna Cotacotani, estación "D".

Tarapacá, revelan que al exponer agua destilada al ambiente de los laboratorios por cortos periodos de tiempo, indican concentraciones entre 10 y 100 ug/L de ión amonio.

Fosfatos ($P-PO_4^{-3}$): Los resultados de fósforo en el lago Chungará, merecen especial atención. Los valores promedio de ortofosfato filtrable en la estación A, en el perfil vertical son de 743.2 a 0 m., 741.8 a 15 m. y 752.8 mg/L a 30 m., lo que indica una tendencia a aumentar con la profundidad, es decir con la cercanía de la fase sedimentos. Altos contenidos de fósforo han sido encontrados en sedimentos (21), lo que presupone un desplazamiento desde la fase sedimentos al cuerpo de agua. No se han efectuado estudios de contenidos de fósforo en sedimentos del lago Chungará, pero el incremento de su concentración con la profundidad estaría indicando una muy probable interrelación. Cuerpos de agua considerados no contaminados (21), tienen contenidos de fosfatos entre 0.031 y 0.091 mg/L. Si además contienen nitrógeno en niveles de concentración de aproximadamente 0.3 mg/L, provocarían una producción explosiva de algas. Experimentos realizados por Everett J. (10) en Canadá en lagos experimentales para interpretar si la producción primaria era una respuesta causada por la cantidad de fósforo y nitrógeno que se pudiesen agregar a un lago sin que cayese en problemas de eutroficación, indican que existe una relación entre la productividad y la carga de los nutrientes (fósforo y nitrógeno), en aquellos donde existían altas cargas de

nitrógeno y fósforo, la productividad era alta y en aquellos con solamente fósforo alto, la productividad era normal y similar a los lagos naturales.

En el caso del lago Chungará, los contenidos de nitrógeno son de aproximadamente 0.04 mg/L, entonces, existiendo una gran disponibilidad de fósforo, el limitante para una eutroficación explosiva debe ser el bajo contenido de nitrógeno.

Los contenidos de fósforo en aguas pueden dividirse en fósforo soluble y en suspensión, en el caso del lago Chungará, el contenido de fósforo soluble es de 87.6% y 12.4% el contenido de fósforo en suspensión.

En el caso de la laguna Cotacotani, los contenidos promedio de ortofosfato soluble en el perfil vertical son de 319.5 a 0 m., 476.0 a 5 m. y 399.5 ug/L a 10 m.. No se aprecia una estratificación significativa en este cuerpo de agua. Los contenidos de nitrógeno son bastante bajos (Tabla N^o 5), aproximadamente la mitad que en el lago Chungará, por lo tanto, a pesar de tener contenidos altos de fósforo, no se encuentra eutroficado.

Indice de estado trófico (TSI): El cálculo del índice de estado trófico se realizó por el sistema desarrollado por Carlson (22), que considera tres parámetros diferentes para establecer el TSI de los cuerpos de agua (lagos). Estos parámetros son: 1).- Luminosidad (disco secchi), 2).- Productividad (clorofila "a") y 3).- Nutrientes (fósforo total).

Las ecuaciones empleadas en el cálculo del TSI fueron:

$$1) \text{TSI}_{(SD)} = 10 * (6 - \frac{\ln SD}{\ln 2})$$

$$2) \text{TSI}_{(Chl)} = 10 * (6 - \frac{2.04 - 0.68 * \ln Chl}{\ln 2})$$

$$3) \text{TSI}_{(TP)} = 10 * (6 - \frac{\ln 48/TP}{\ln 2})$$

donde:

SD = disco secchi (m)
 Chl = Clorofila "a" (mg/m³)
 TP = fósforo total (mg/m³)

Los valores de índice trófico son estimados de la Tabla N^o 9 para los tres parámetros antes mencionados, Carlson considera un índice de 60 para un lago eutrófico, 50 para un meso-eutrófico y 40 para un mesotrófico.

Tabla N^o 9.

Índice de estado trófico completo
y sus parámetros asociados.

TSI	Disco secchi (m)	Fósforo superficial (mg/m ³)	Clorofila "a" superficial (mg/m ³)
0	64	0.75	0.04
10	32	1.5	0.12
20	16	3	0.34
30	8	6	0.94
40	4	12	2.6
50	2	24	6.4
60	1	48	20
70	0.5	96	56
80	0.25	192	154
90	0.12	348	427
100	0.062	768	1183

De acuerdo a los trabajos realizados por Mladinic et al (1,6,7) en el periodo 82-84, se dispone de abundante información respecto del parámetro luminosidad, así, entre diciembre de 1982 y abril de 1984, el TSI_(SD) del lago Chungará dió un promedio de 32.7, la distribución mensual, podemos apreciarla en la figura N^o 15.

Los resultados del cálculo del índice de estado trófico para el lago Chungará en los muestreos realizados entre septiembre-86 y octubre-87 se encuentran en la Tabla N^o 10.

Tabla N^o 10.

Índice de estado trófico del lago Chungará

Fecha	Secchi (m)	TSI	P-PO4 (mg/m3)	TSI	Clorofila "a" (mg/m3)	TSI
SEP-86	6.0	34.2	584	96.0	2.02	37.5
DIC-86	8.5	29.1	745	99.6	2.02	37.5
MAY-87	6.0	34.2	848	101.4	---	---
OCT-87	7.0	31.9	796	100.5	0.98	30.4

Tabla N^o 11.

Índice de estado trófico de la laguna Cotacotani

Fecha	Secchi (m)	TSI	P-PO4 (mg/m3)	TSI	Clorofila "a" (mg/m3)	TSI
SEP-86	3.0	44.2	186	79.5	3.40	42.5
DIC-86	5.5	35.4	292	86.0	2.03	37.5
MAY-87	3.5	41.9	476	93.1	---	---
OCT-87	3.5	41.9	324	87.5	0.33	19.7

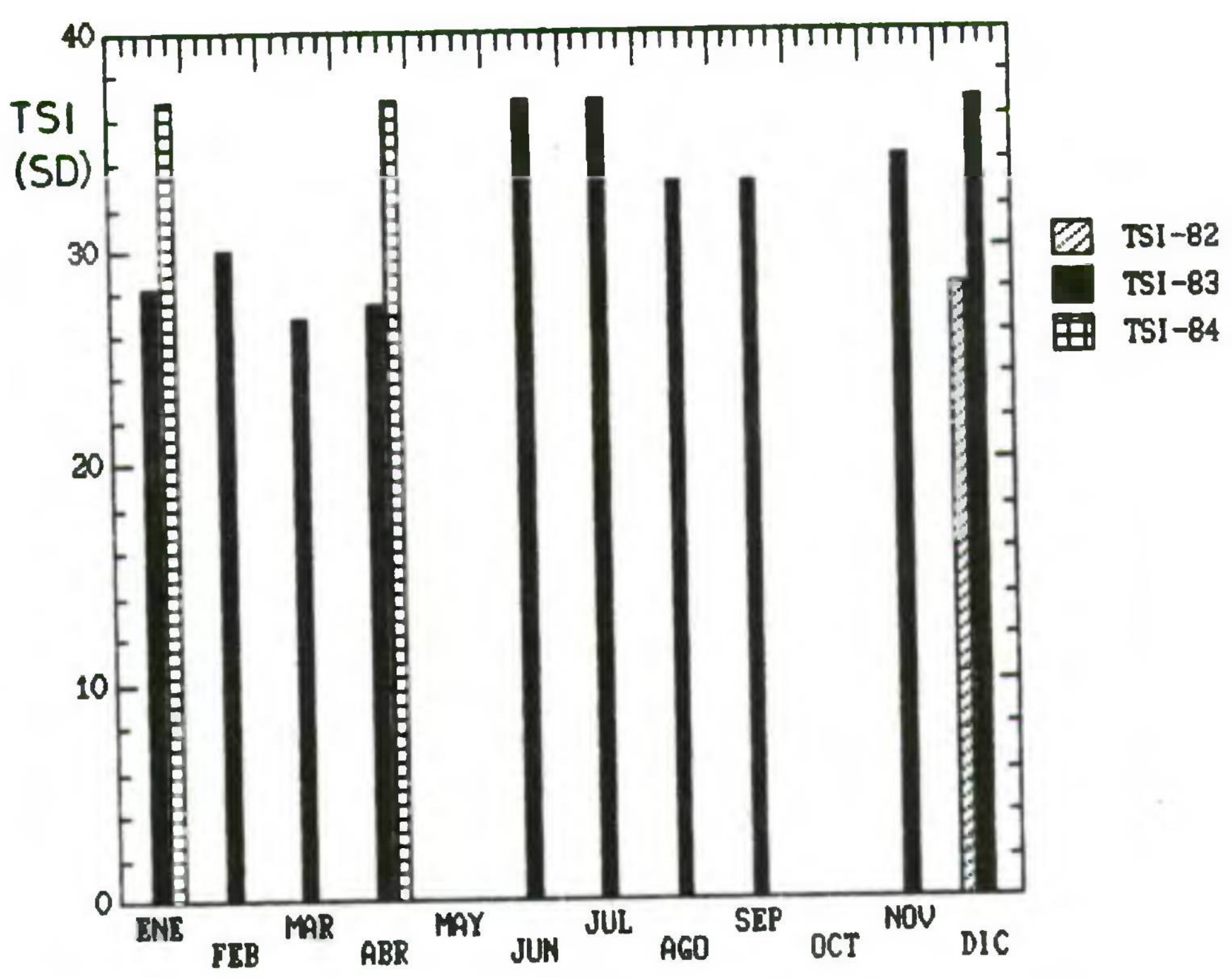


Fig. N^o 15 Índice de estado trófico (TSI_{SD}) lago Chungará (1982 - 1984).

CONCLUSIONES.

El lago Chungará y la laguna Cotacotani al tener un origen geológico común, clima, profundidad etc., presentan varias características de similitud. No muestran marcados cambios estacionales ni estratificación. Las especies químicas no varían significativamente de estación en estación ni en profundidad, excepto los contenidos de sílice, nitratos y fosfatos, especies asociadas a la actividad biogénica.

El lago Chungará y la laguna Cotacotani son cuerpos de aguas relativamente frías, el máximo superficial en Chungará fue de 10.2° C y la mínima de 4.6° C con un promedio de 7.9° C. La laguna Cotacotani, presentó una temperatura máxima superficial de 12.1° C, una mínima de 5.3° C con un promedio de 8.2° C.

Los contenidos de saturación de oxígeno son altos, el promedio superficial del lago Chungará fue de 91.1% alcanzando valores de sobresaturación en Octubre de 1987. En la laguna Cotacotani, los contenidos de oxígeno superficial fueron de 94.5% alcanzando valores de sobresaturación el mismo mes que en el lago Chungará.

El lago Chungará es un lago de aguas alcalinas de pH 9.2 con contenidos altos de carbonatos y bicarbonatos (41.2 y 365 mg/L respectivamente). La conductividad promedio fue de 1348 μ S/cm y el contenido de sólidos disueltos de 1034 mg/L. La laguna Cotacotani contiene aguas ligeramente alcalinas de pH 8.8 con contenidos de carbonatos y

Los valores promedios del $TSI_{(SD)}$ y TSI_{Chl} en el lago Chungará, son similares, 32.4 y 36.1 respectivamente. En contraposición, el $TSI_{(Tp)}$ es de 99.38. Estos valores estarían indicando que el lago Chungará es un cuerpo de agua Oligo-Mesotrófico por su TSI de luminosidad y clorofila, pero de acuerdo a la disponibilidad de fósforo, sería un lago Eutrófico.

En el caso de la laguna Cotacotani (Tabla N^o 11), en los muestreos realizados entre septiembre-86 y octubre-87, también son similares los valores del TSI de luminosidad y clorofila con promedios de 41.3 y 33.2, considerando estos criterios, la laguna Cotacotani sería un cuerpo de agua de tipo Oligo-Mesotrófico a Mesotrófico. Respecto a los contenidos de $P-PO_4^{-3}$, estos son bastante menores que el lago Chungará, pero su TSI_{Tp} promedio de 86.5 lo clasificaría como un cuerpo de aguas de tipo Eutrófico.

Los altos contenidos de fósforo en ambos cuerpos de agua indicarían una alta disponibilidad de nutrientes, que de no mediar otros factores limitantes, el delicado equilibrio que los mantiene podría destruirse, provocando una eutrofización explosiva.

bicarbonatos de 25 y 231 mg/L. La conductividad determinada fué de 757 uS/cm y el contenido de sólidos disueltos de 554 mg/L.

Las aguas del lago Chungará son duras con un promedio de 26.9 $^{\circ}$ d, y las de la laguna Cotacotani semi-duras con 16.1 $^{\circ}$ d.

La concentración iónica equivalente muestra la tendencia $\text{SO}_4^{=}$ > HCO_3^{-} > Cl^{-} > $\text{CO}_3^{=}$ para los aniones del lago Chungará, en la laguna Cotacotani la tendencia de los aniones es HCO_3^{-} > $\text{SO}_4^{=}$ > $\text{CO}_3^{=}$ > Cl^{-} y para los cationes de ambos cuerpos de agua, Mg^{++} > Na^{+} > Ca^{++} > K^{+} .

El Índice de Estado Trófico del lago Chungará, calculado en función de la luminosidad ($\text{TSI}_{\text{SD}} = 32.4$) indica que se trata de un cuerpo de agua Oligo-Mesotrófico, clasificación que es concordante con el Índice de Estado Trófico calculado en base a los contenidos de clorofila ($\text{TSI}_{\text{Chl}} = 36.1$). Por otra parte, el Índice de Estado Trófico calculado por el contenido de fósforo ($\text{TSI}_{\text{Tp}} = 99.38$) indicaría que se trata de un lago Eutrófico. Sin embargo, pese a los contenidos altos de fósforo, el lago presenta una productividad primaria menor que 5 mg m^{-3} (valor estimado a partir de las incubaciones de oxígeno).

En el lago Chungará, los contenidos de fósforo son altos (743.2 ug/L de P-PO_4^{-3} superficial) mientras que los contenidos de nitrógeno son bajos (180.5 ug/L de N-NO_3^{-} superficial), esto estaría indicando, que los contenidos de nitrógeno en el lago Chungará serían el factor limitante de una eutroficación explosiva. En el caso de la laguna

Cotacotani, el Índice de Estado Trófico calculado por luminosidad (TSI_{SD}) es de 41.3 y el calculado por clorofila (TSI_{Chl}) de 33.2, lo que la clasificaría como un lago de tipo Oligo-Mesotrófico a Mesotrófico. Los contenidos de fósforo son aproximadamente la mitad que en Chungará, 319.5 ug/L de $P-PO_4^{-3}$ superficial, y la concentración de nitrógeno de 46.5 ug/L de $N-NO_3^-$ superficial, indicando también al nitrógeno como factor limitante de una posible eutroficación.

En base a las determinaciones efectuadas y lo anteriormente expuesto, se hacen necesarios una serie de estudios complementarios a los ya realizados, entre los cuales se pueden sugerir estudios de sedimentología, para determinar la composición y comportamiento de intercambio de los sedimentos lacustres, especialmente los ciclos de los nutrientes. Además, controlar especies tóxicas como boro, arsénico, y seguimiento de los contenidos de fósforo y nitrógeno. También es necesario efectuar estudios de interrelación de especies con los nutrientes antes mencionados y determinar con mayor exactitud la productividad primaria.

BIBLIOGRAFIA.

- 1.- Mladinic P., Hrepic N. y Quintana E. "Características físicas y químicas de las aguas de los lagos Chungará y Cotacotani", Idesia, 8, 1984.
- 2.- Villwock W. et al. "Geologisch-ökologische Untersuchungen am Lago Chungará/Nordchile: Zielsetzungen und erste Ergebnisse", Idesia, 9, 1985.
- 3.- Mladinic P., Osorio A., Sanzana J., Arqueros C., Hrepic N., Pinto M. y Thomann R., ALGUNAS CONSIDERACIONES SOBRE LA PUESTA EN MARCHA DEL PROYECTO DENOMINADO: "PLAN MAESTRO DE ACCION INMEDIATA PARA EL SISTEMA DE RIEGO DEL VALLE DE AZAPA", documento de circulación restringida, 14 ejemplares, departamento de investigación y desarrollo científico, UTA, Marzo 1983.
- 4.- Karzulovic J., PLAN MAESTRO DE ACCION INMEDIATA PARA EL SISTEMA DE RIEGO DEL VALLE DE AZAPA, REGION DE TARAPACA, INSTANCIA FINAL, documentos de trabajo, Tomo I, Ministerio de Obras Públicas, Santiago de Chile, 1981.
- 5.- Edwards R., Karzulovic J., PLAN MAESTRO DE ACCION INMEDIATA PARA EL SISTEMA DE RIEGO DEL VALLE DE AZAPA, REGION DE TARAPACA, INSTANCIA FINAL, informe general, Ministerio de Obras Públicas, Santiago de Chile, 1981.

- 6.- Mladinic P., Quintana E. y Hrepic N., "Condiciones físicas y químicas de las aguas de los lagos Chungará y Cotacotani. I Región", informe final de proyecto, UTA, Marzo 1985.
- 7.- Mladinic P., Hrepic N., Quintana E., "Caracterización física y química de las aguas de los lagos Chungará y Cotacotani", Arch. Biol. Med. Exp., 20, pag. 89-94, 1987.
- 8.- OPERACION PARCIAL DE LA RED NACIONAL MINIMA DE CONTROL DE LAGOS, convenio de cooperación, Universidad de Trapacá, Corporación Nacional Forestal y Ministerio de Obras Públicas.
- 9.- Mary Ann H. Franson, Editor, STANDARD METHODS for the Examination of Water and Wastewater, edición 15, 1981.
- 10.- Bahamonde N., Cabrera S., Ed., EMBALSES FOTOSINTESIS Y PRODUCTIVIDAD PRIMARIA, Campo de acción N^o 5, Curso-Taller, Universidad de Chile, Enero 1983.
- 11.- Garín C., PARAMETROS MORFOMETRICOS DE LA RED NACIONAL MINIMA DE CONTROL DE LAGOS, informe del sub-departamento de estudios hidrológicos, Dirección General de Aguas, publicación interna E.H.85/11, Santiago, Diciembre de 1985.

- 12.- Merino R., RED NACIONAL MINIMA DE CONTROL DE LAGOS, Ministerio de Obras Públicas - Dirección General de Aguas, Depto. Hidrología, Publicación interna E.H. 85/II, Diciembre 1985.
- 13.- Campos H., Arenas J., Steffen W. y Agüero G., "Physical and chemical limnology of lake Rihue (Valdivia, Chile)", Arch.Hidrobiol., 84, 4, 405-429, 1978.
- 14.- Lara E., SEGUIMIENTO DE LA CALIDAD QUIMICA DE LAS AGUAS DEL SISTEMA CHUNGARA LAUCA-AZAPA, Informe DEX.1/85, Sección Agroeconomía, Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, 1985.
- 15.- Zambrano L., "Calidad de las aguas del lago Chungará, de los ríos Lauca y Vitor y de un pozo de Chaca", Boletín Técnico No 22, Universidad de Chile, Facultad de Agronomía, Estación Experimental Agronómica, Maipú, 1966.
- 16.- Osorio A., Torres A., de la Riva F., TECNIFICACION DEL REGADIO EN LOS VALLES COSTEROS DE LA PROVINCIA DE ARICA, Informe de Actividades, Universidad de Tarapacá, Departamento de Agronomía, 1982.
- 17.- Sanzana J., ESTUDIO LIMNOLOGICO EN EL LAGO CHUNGARA, Informe Final de Proyecto, Universidad de Tarapacá, 1984.

- 18.- Mortimer C.H., "The oxygen content of air-saturated fresh waters over ranges of temperature and atmospheric pressure of limnological interest", INTERNATIONALE VEREINIGUNG FÜR THEORETISCHE UND ANGEWANDTE LIMNOLOGIE, 22, 1981.
- 19.- Análisis del Agua, E. Merck, Darmstadt, 85-89, 1974.
- 20.- Cabrera M., Pachá S., Rojas S., "Migración de las aguas del lago Chungará a la laguna de Cotacotani: Modelo de intercambio iónico, ión magnesio", informe de unidad de investigación, depto. de química, UTA, 1988.
- 21.- Holt R., Timmons D., Latterell J., "Acumulation of Phosphates in Water", J. Agr. FOOD. CHEM., Vol. 18, No 5, 1970.
- 22.- Carlson R., "A trophic state index for lakes", LIMNOLOGY AND OCEANOGRAPHY, 22, 2, pag 361-369, Marzo 1977.

APENDICE N^o 1.

Programa para calcular % de saturación de oxígeno.

```
5 PRINT "Calculo del % de saturación":PRINT
10 PRINT "Ingrese el contenido de O2 (mg/dm3)";:INPUT OX
20 PRINT "Ingrese la temperatura (°C)";:INPUT T
30 PRINT "Ingrese la presión (atm.)";:INPUT PH
40 PRINT "Ingrese la altura (km)";:INPUT H
50 REM Calculo de teta
60 TETA=0.000975-(1.426E-5*T)+(6.436E-8*T^2)
70 REM Cálculo de la presión de vapor
80 KELVIN=273+T
90 WV=11.8571-(3840.70/KELVIN)-(216961/(KELVIN)^2)
100 PWV=2.718281828^WV
110 REM Cálculo de W
120 A=(1-PWV/PH)*(1-TETA*PH)
130 B=(1-PWV)*(1-TETA)
140 W=A/B
150 REM Cálculo de CP con corrección de altura
160 LNCP=7.7117-1.31403*LOG(T+45.93)+5.25*LOG(1-H/44.3)
170 CP=2.718281828^LNCP
180 REM Cálculo de la conc. no estándar C
190 C1=CP*W
200 C2=OX:R=(C2*100)/C1
300 PRINT:PRINT
310 PRINT "Conc. estándar  =";C1
320 PRINT "Cont. oxígeno  =";C2
330 PRINT "% de saturación =";R
```