



GLA 1061

ASPECTOS DE HIDROLOGIA GLACIAL EN
LA PATAGONIA

Este trabajo (traducido al inglés) forma parte de la publicación "Glaciological Studies in Patagonia 1985-1986". Data Center for Glaciar Research, Japanese Society of Snow and Ice. (Marzo, 1987)



PUBLICACION INTERNA E.H. 87/2

SANTIAGO, Marzo 1987

DIRECCION GENERAL DE AGUAS
DEPARTAMENTO DE HIDROLOGIA

Informe elaborado por el Sub-Departamento de Estudios Hidrológicos por:

Ing. Humberto Peña T.

Ing. Fernando Escobar C.

Geógrafo Carlos Garín O. (Cartografía)

Resumen: En este estudio se presentan diferentes aspectos relativos a la hidrología glacial de la Región Patagónica. Para ello se han utilizado fundamentalmente estadísticas hidrológicas recolectadas por ENDESA y la Dirección General de Aguas (DGA), e información de rendimientos en áreas no englacadas obtenidas del estudio "Balance Hidrológico Nacional, XI Región, DGA, 1984".

El análisis efectuado permitió hacer una estimación de los caudales específicos de las áreas con hielo y una caracterización de la variación estacional de éstas descargas. Además, se analizó la relación entre el caudal, la temperatura del aire y la precipitación. Por último, se destaca la importancia de las crecidas por vaciamiento violento de lagunas glaciares en la región (Jökulhlaup) y las características propias de la zona que favorecen dicho fenómeno.

1. Introducción

Los Hielos Patagónicos Norte y Sur (HPN y HPS) dan origen a cuatro grandes sistemas hidrográficos; tres de los cuales drenan hacia el Pacífico y uno hacia el Atlántico (ver Figs. 1a y 1b). Además, un gran número de sistemas menores alcanzan directamente el Océano Pacífico a través de fiordos y lagos, luego de un corto recorrido.

Estos grandes sistemas son: 1) la cuenca del río Baker que drena al borde oriental del HPN, 2) la cuenca del río Pascua que drena la vertiente Norte del HPS, 3) la cuenca del río Serrano que drena el borde Sur del HPS, todos los cuales descargan en el Pacífico, y 4) la cuenca del río Santa Cruz que drena la vertiente oriental del HPS y cruza la Pampa Argentina hasta el Atlántico (Figs. 1a y 1b). En este estudio se consideraron:

las cuencas del río Nef y del río Colonia, en la parte alta de la cuenca del río Baker, la cuenca del río Pascua; las cuencas del lago Viedma y del lago Argentino, las cuales constituyen la cuenca del río Santa Cruz, y las cuencas del río Paine y del río Grey en la cuenca del río Serrano.

El conocimiento acerca de la hidrología de estos ríos, especialmente en lo que respecta a las contribuciones de los glaciares, es actualmente muy limitado. Esto se debe principalmente a las condiciones adversas para las mediciones (condiciones climáticas, dificultades de acceso, baja densidad de población), y también, debido a las características hidrográficas que en la mayoría de los casos impide las mediciones directas de las descargas de los glaciares, por la presencia de fiordos y lagos. Todos estos problemas han provocado un retraso en la instalación de una red de control hidrológica que permita la adecuada caracterización de los aportes glaciares, estando hasta la fecha, las mediciones sistemáticas orientadas hacia el desarrollo y explotación en el largo plazo (después del año 2000) de los importantes recursos hidroeléctricos potenciales de la región.

En este estudio, las características hidrológicas de las contribuciones de los HPN y HPS son analizadas exclusivamente basándose en la información medida regularmente en las estaciones fluviométricas existentes.

2.- Información analizada

En este estudio se ha utilizado la información de caudales, precipitación y temperatura del aire obtenida por los Servicios Estatales Chilenos (ENDESA, DGA) y antecedentes fluviométricos publicados por el Servicio Hidrológico Argentino (Agua y Energía Eléctrica, A y E). En las Figs. 1a,

1b y 2 se presenta un detalle de las estaciones de control y de la información utilizada.

Las áreas aportantes de las cuencas fueron identificadas analizando el siguiente material: cartografía publicada por el Instituto Geográfico Militar, IGM, a escala 1: 250.000 y en algunos casos a escala 1: 50.000, fotografías aéreas trimetrogón tomadas en 1944-45 y fotografías verticales tomadas en 1974-75 por USAF; y antecedentes obtenidos de Lliboutry (1956) y Bertone (1960). Además, fueron de mucha utilidad algunos datos proporcionados por el estudio "Balance Hidrológico Nacional, XI Región, DGA, 1984" y por publicaciones técnicas referentes a la evaluación de recursos hídricos en la región (ENDESA, 1975 y 1980) y al análisis de crecidas (Peña y Escobar, 1983).

3.- Régimen hidrológico y caudales específicos.

3.1 Caudal específico medio

La información fluviométrica disponible permitió estimar los caudales específicos en siete subcuencas que drenan extensas áreas de los HPN y HPS (ver Tabla 1 y Figs. 1a y 1b). Sin embargo, considerando que algunas estaciones fluviométricas están ubicadas bastante lejos de la salida de los glaciares, y por lo tanto, sus áreas de drenaje incluyen extensas cuencas intermedias, en general sin glaciares, el caudal específico estimado para el área total no representa propiamente al caudal específico de los campos englaciados. Problema que se abordó, calculando un caudal a la salida de los frentes glaciares (Tabla 1), restando de la descarga medida en la estación de control, la escorrentía generada en la cuenca intermedia. Para ello se utilizó la información existente acerca de rendimientos en áreas no englaciadas (Balance Hidrológico Nacional, XI Región, DGA, 1984). El valor calculado de esta forma representa la descarga del campo de hielo y áreas de montañas ad-

yacentes, incluyendo glaciares y áreas libres de hielo, las cuales drenan a los valles de salida en los frentes glaciares. También, en esta evaluación se incorporan los glaciares de menores dimensiones separados de los campos de hielo. Finalmente, y solo como referencia, se calculó el caudal específico suponiendo que la esorrentía en el frente del glaciar provenía exclusivamente desde las áreas cubiertas de hielo (Tabla 1, Figs. 1a y 1b) despreciando la contribución de las áreas libres de hielo de las montañas adyacentes.

Es necesario destacar que los valores calculados anteriormente, no son más que una primera aproximación debido a las numerosas fuentes de error involucradas en los cálculos, de los cuales las más importantes son: la determinación de la divisoria de los hielos y de los límites de la cuenca, y el error en la estimación de los aportes de las cuencas intermedias. Con respecto a este último error, se puede observar en los valores estimados que se muestran en la Tabla 1, que la contribución de la cuenca intermedia al caudal medido en la estación fluviométrica está comprendido entre un 5 y un 20% de la descarga total de la cuenca, con la excepción de las cuencas del río Nef y Colonia que presentan contribuciones de un 40 y un 30%, respectivamente. Estos errores podrían explicar ciertas discrepancias, tales como el valor extremadamente alto del caudal específico en la zona del glaciar Nef comparado con el menor valor de la cuenca vecina del río Colonia.

Los valores que se entregan en la Tabla 1 sugieren las siguientes conclusiones:

- El caudal específico medio en la zona de los Hielos Patagónicos fluctúa entre 144 y 245 l/s/Km² (incluyendo las áreas cubiertas de hielo y las áreas adyacentes y eliminando el valor para la cuenca del río Nef).
- Si se acepta que los flujos de condensación y evaporación, y la contribución neta de hielo en los glaciares, a nivel anual,

son despreciables en comparación con la precipitación anual, se obtienen valores de precipitación anual media de 4.500 a 7.700 mm/año como promedio para las zonas de acumulación y ablación. Estos antecedentes sugieren valores por sobre los 8.000 mm/año para la zona de acumulación, considerando que las precipitaciones medidas en las vecindades del campo de hielo no exceden los 3.500 mm/año.

3.2 Variación estacional del caudal: Análisis de frecuencia.

Para este análisis, se utilizó la información medida en el río Pascua en la desembocadura del lago O'Higgins, la cual presenta las siguientes ventajas:

- Se dispone de un registro de niveles del lago (registro del volumen almacenado), lo que permite deducir la estadística de caudales del río Pascua, eliminando el efecto regulador de los lagos (O'Higgins y San Martín). A esta estadística se le denominará Régimen Natural (R.N.) del río Pascua.
- Un gran porcentaje del caudal medido proviene desde la zona cubierta de hielo (84%) según los valores estimados en la Tabla 1.

La distribución estacional del caudal medio de este río está estrechamente relacionado a la variación de la temperatura y es independiente de la precipitación la cual no muestra una variación estacional definida (Fig. 3). Consecuentemente, el caudal máximo ocurre en Enero, alcanzando valores de aproximadamente 400 l/s/Km² (considerando las áreas cubiertas de hielo y áreas de montañas adyacentes), el cual es 4,5 veces mayor que el caudal observado en los meses de invierno. La distribución estacional del caudal de los diferentes ríos que drenan los Hielos Patagónicos es similar, no así, la de otros ríos de la región con una pequeña influencia glacial, como es el caso del río

Ibáñez, el cual muestra un máximo secundario en el mes de Mayo, debido probablemente a la precipitación. En este caso, el caudal de Enero es aproximadamente 3 veces mayor que el de invierno (Figs. 4a y 4b).

El análisis de frecuencia de los caudales mensuales muestra valores relativamente constantes de la desviación estandar a través del año. lo cual se refleja en el paralelismo de las curvas de variación estacional de las diferentes probabilidades de excedencia (Fig. 5, Tabla 2). Por su parte los ríos con menor influencia glacial muestran mayor variabilidad y la desviación estandar presenta tendencias estacionales (Fig. 6, Tabla 3). Es interesante destacar que en este último caso las curvas de variación estacional para altas probabilidades de excedencia tienden a ser similares a las correspondientes a cuencas con gran influencia glacial, debido a la disminución de los caudales máximos de Mayo y Noviembre para esas altas excedencias.

4. Relaciones entre caudales y variables meteorológicas

Para entender las fluctuaciones a largo plazo de las masas de Hielo Patagónicas, es de gran interés conocer la relación entre las variables meteorológicas y los caudales a nivel diario y anual. Además, este aspecto es de la mayor importancia en la hidrología práctica, en problemas tales como la previsión de caudales, evaluación de recursos, cálculo de crecidas, etc.

4.1 Caudal anual

De acuerdo a lo anterior, se intentó establecer relaciones simples entre el caudal medio anual del río Pascua (R.N.), la precipitación anual y la temperatura media anual. Desafortunadamente, el período con información es demasiado corto para obtener conclusiones definitivas. En todo caso, se

observa una gran independencia entre las variables (Fig. 7), lo que hace suponer que se deberían estudiar relaciones más complejas. Comparando variaciones de los glaciares y variaciones meteorológicas, Aniya y Enomoto (1986) tampoco pudieron encontrar relaciones claras.

Al describir el régimen hidrológico, se mencionó la estrecha relación del caudal con la variación estacional de la temperatura. Esta concordancia se debe a dos motivos: la validez de la temperatura como un indicador de la tasa de fusión y el aumento del área pluvial con la elevación de la línea de nieves.

4.2 Caudal diario

El análisis de los caudales diarios efectuado en el río Grey (estación 7b) muestra una fuerte dependencia del caudal de un día con el correspondiente al del día anterior y con la temperatura media diaria, y una relativa independencia con la precipitación, como se muestra en la Fig. 8.

En la Tabla 4 se presentan los resultados del análisis de correlaciones efectuado para los caudales del río Grey durante el período primavera-verano de 1982-83. En ella se muestran las dos ecuaciones de regresión de mejor ajuste con dos y tres variables independientes. Es necesario destacar, sin embargo, que estos resultados sobrevaloran la influencia del caudal del día anterior debido al efecto regulador de los lagos ubicados aguas arriba de la estación de control. Si se acepta que la descarga se origina exclusivamente en las áreas cubiertas de hielo, considerando que la contribución estimada de la cuenca intermedia es de aproximadamente 5% (ver Tabla 1), el coeficiente multiplicador de la temperatura sería de aproximadamente 1,4 mm/°C, el cual representa un valor habitual del factor grado día.

5.- Crecidas por vaciamiento de represas glaciales.

En distintos trabajos efectuados en los Hielos Patagónicos, se han estudiado crecidas repentinas generadas por el vaciamiento de represas glaciales (Jökulhlaup). Los casos más conocidos se refieren a las crecidas del Glaciar Moreno (Lliboutry, 1956; Liss, 1970), del glaciar Colonia (Lliboutry, 1956) y del glaciar Dickson (Peña y Escobar, 1983). Considerando la gran extensión de las áreas cubiertas de hielo, la existencia de grandes lagos terminales que producen un importante efecto regulador y la baja densidad de población, lo que hace improbable la observación directa de estos fenómenos, es posible suponer que la ocurrencia de este tipo de crecidas constituye una importante característica de la región y no el resultado de situaciones excepcionales.

Existen algunas condiciones en los Hielos Patagónicos que contribuyen en la generación de estas crecidas glaciares, ellas son:

1) La relativamente baja diferencia de altura entre las áreas cubiertas de hielo y la elevación de los frentes glaciales, lo que origina un drenaje deficiente, y un movimiento del hielo poco definido o una convergencia de las lenguas glaciales efluentes. En estas circunstancias se producen un gran número de lagos marginales y condiciones favorables para el almacenamiento del agua.

- Las características térmicas de los glaciares, su alta tasa de fusión y la magnitud de la precipitación facilita la existencia de grandes volúmenes de agua líquida en las regiones englaciadas.

- El rápido avance que experimentan periódicamente algunas lenguas glaciales pueden producir el bloqueo de la red de drenaje y causar la formación de represas glaciales.

- Las recientes variaciones glaciales, las cuales en ocasiones modifican el equilibrio dinámico pre-existente en los sistemas de drenaje glaciales y pro-glaciales.

Este aspecto de la hidrología glacial en la Patagonia es del mayor interés y debería ser investigado en el futuro por su importancia para el desarrollo de los recursos hídricos regionales.

TABLA N° 1 Areas, caudales y caudales específicos en cada cuenca.

CUENCAS	AREAS (km ²)			CAUDALES (m ³ /s)		CAUDALES ESPECIFICOS (l/s/km ²)		
	A	B	C	A	B	A	B	C
RIO NEF	1.064	212	180	105	62	99	292	332
RIO COLONIA	1.612	630	320	131	91	81	144	244
LAGO O'HIGGINS	4.169	2.000	1.720	510	430	122	215	246
LAGO VIEDMA	7.450	1.218	990	266	212	36	174	198
LAGO ARGENTINO	8.100	2.090	1.530	440	401	54	192	245
RIO PAINE	535	219	88	43	36	80	164	366
RIO GREY	621	465	327	120	114	193	245	327

A = área total
 B = áreas cubiertas de hielo y montañas adyacentes
 C = áreas cubiertas de hielo

TABLA N° 2 Variación estacional de los caudales medios mensuales en el Río Pascua (Caudal natural, Q)

Mes	Q m ³ /s	σ m ³ /s	Cv	Qmin m ³ /s	Qmax m ³ /s	Q/ \bar{Q}
ENERO	1.167	179	0,15	835	1.564	1,81
FEBRERO	1.028	127	0,12	767	1.233	1,59
MARZO	933	212	0,23	457	1.186	1,45
ABRIL	755	154	0,20	478	1.102	1,17
MAYO	562	154	0,27	364	854	0,87
JUNIO	377	217	0,58	147	811	0,58
JULIO	262	122	0,47	87	520	0,41
AGOSTO	269	94	0,35	154	413	0,42
SEPTIEMBRE	343	112	0,33	172	542	0,53
OCTUBRE	403	104	0,26	264	683	0,62
NOVIEMBRE	698	203	0,29	224	1.062	1,08
DICIEMBRE	945	190	0,20	683	1.255	1,00
ANUAL	645	69	0,11	543	825	1,00

σ = desviación estandar Cv = σ/Q \bar{Q} = caudal anual medio

TABLA N° 3. Variación estacional de los caudales medios mensuales en el Río Ibáñez (Q)

Mes	Q m ³ /s	σ m ³ /s	Cv	Q _{min} m ³ /s	Q _{máx} m ³ /s	Q/ \bar{Q}
ENERO	251	50	0,20	411	160	1,60
FEBRERO	212	50	0,23	329	121	1,35
MARZO	155	23	0,15	213	102	0,99
ABRIL	169	54	0,32	345	76	1,08
MAYO	170	69	0,41	356	47	1,08
JUNIO	121	67	0,55	298	17	0,77
JULIO	82	38	0,47	208	28	0,52
AGOSTO	86	34	0,39	162	13	0,55
SEPTIEMBRE	76	37	0,49	191	12	0,48
OCTUBRE	115	34	0,29	235	43	0,73
NOVIEMBRE	211	75	0,36	454	105	1,34
DICIEMBRE	240	41	0,17	351	156	1,53
ANUAL	157	23	0,15	201	104	1,00
σ = desviación standard Cv = σ/Q \bar{Q} = caudal anual medio						

TABLA N° 4. Relaciones entre el caudal medio diario (Q), la temperatura media del aire (T) y la precipitación (P) en la cuenca del río Grey.

Regresión N°	Variable Independiente	Coefficiente de Correlac.
1	Q _{i-1}	0,929
2	Q _{i-1} , T _i	0,936
3	Q _{i-1} , T _{i-1}	0,949
4	Q _{i-1} , P _i	0,933
5	Q _{i-1} , P _{i-1}	0,931
6	Q _{i-1} , T _{i-1} , P _{i-1}	0,952
7	Q _{i-1} , T _i , T _{i-1} , P _{i-1}	0,952
8	Q _{i-1} , T _{i-1} , T _{i-2} , P _{i-1}	0,952

El subíndice "i" indica el día.

Las mejores regresiones con 2 y 3 variables independientes son:

Regresión 3 : $Q_i = 0,913 Q_{i-1} + 5,16 (T_{i-1} - 7,4)$

Regresión 6 : $Q_i = 0,902 Q_{i-1} + 2,47 P_{i-1} + 5,42 [(T_{i-1}) - 7,7]$

FIG. 1b. Hielo Patagónico Sur

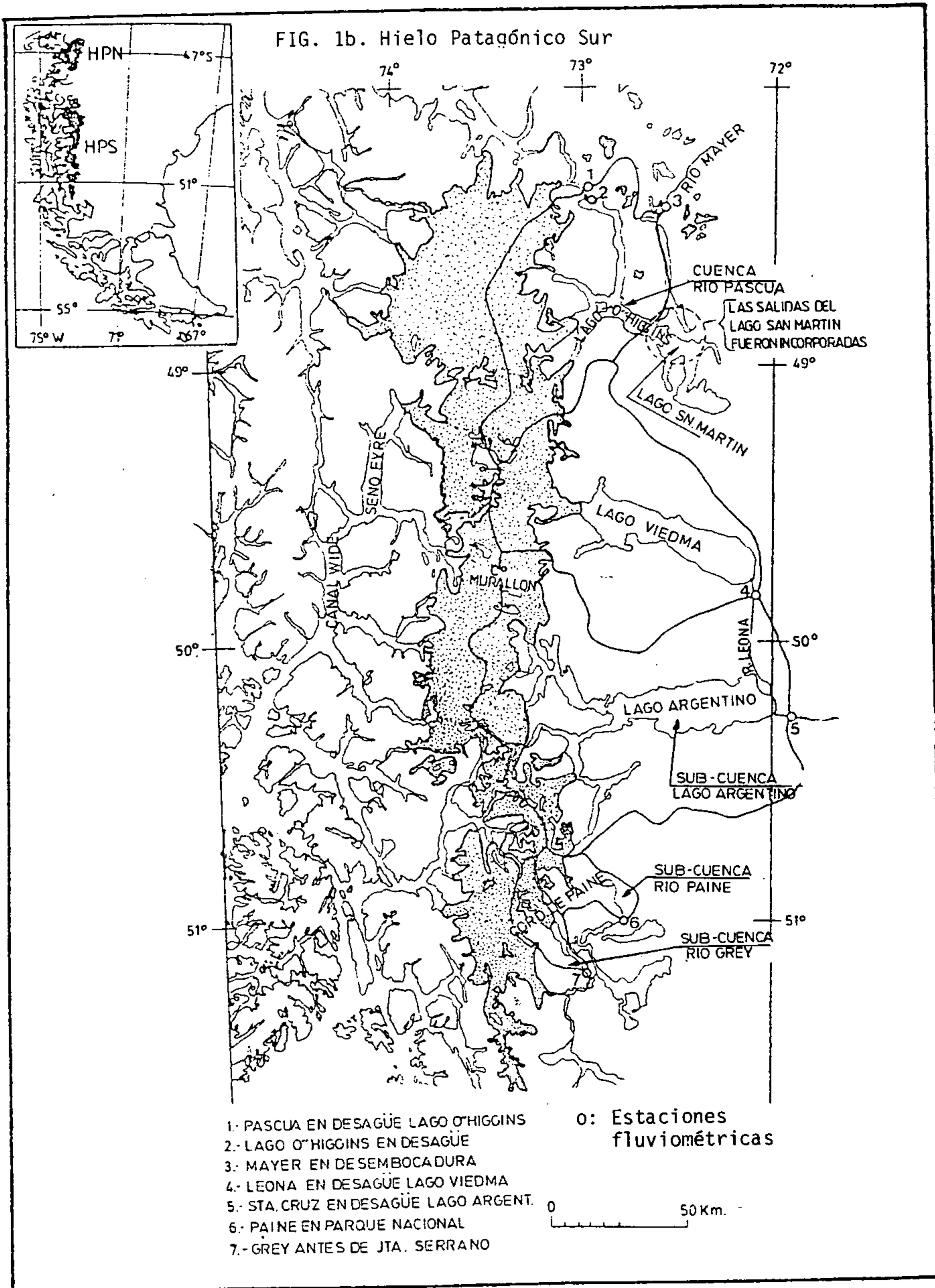
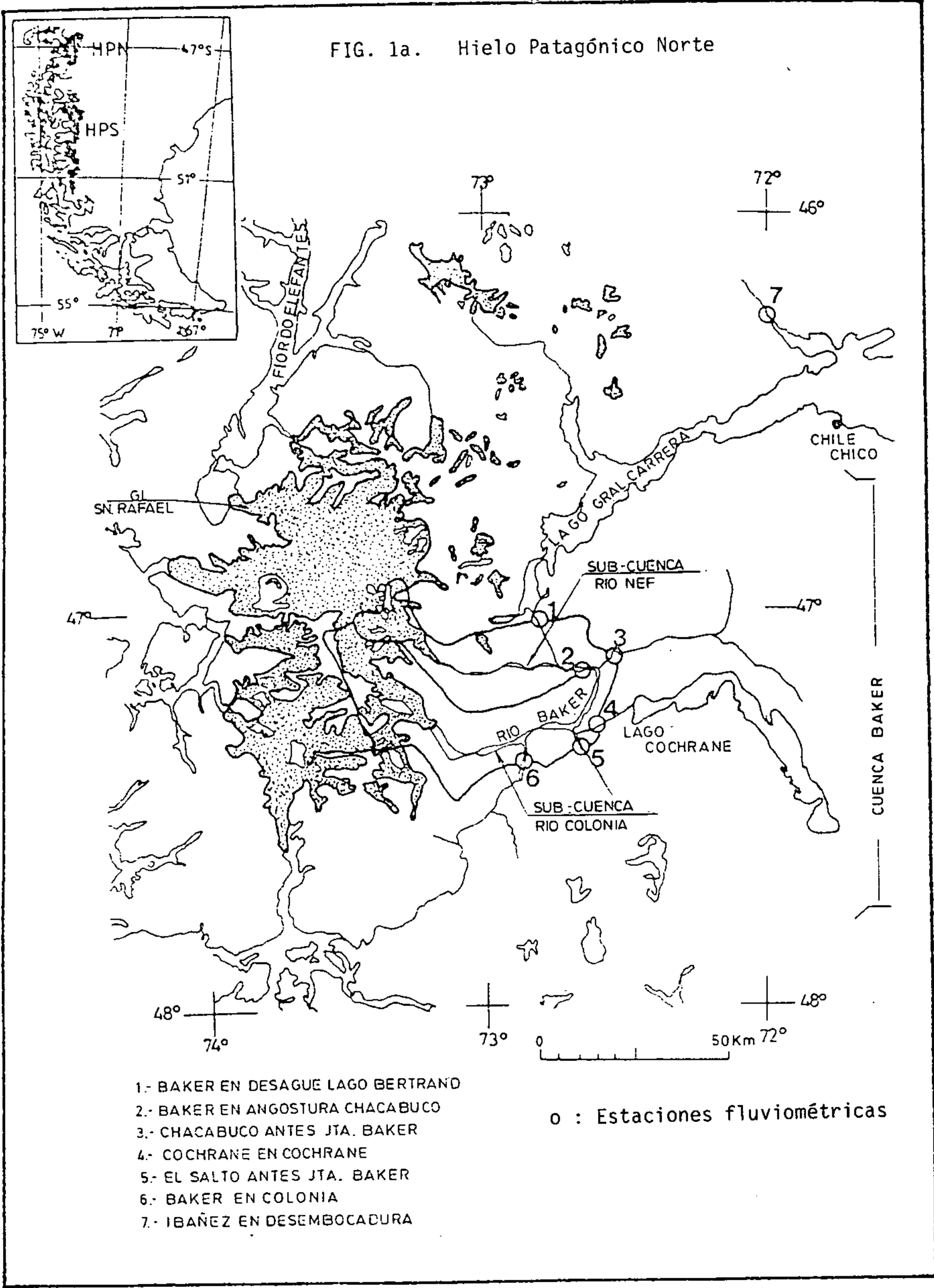


FIG. 1a. Hielo Patagónico Norte



- 1.- BAKER EN DESAGUE LAGO BERTRAND
- 2.- BAKER EN ANGOSTURA CHACABUCO
- 3.- CHACABUCO ANTES JTA. BAKER
- 4.- COCHRANE EN COCHRANE
- 5.- EL SALTO ANTES JTA. BAKER
- 6.- BAKER EN COLONIA
- 7.- IBAÑEZ EN DESEMBOCADURA

o : Estaciones fluviométricas

Fig. 2.- Estaciones fluviométricas

ESTACION	1960	1965	1970	1975	1980	1985	LAT.	LONG.	ALT.	AREA
							S	W	M.S.N.M	KM ²
IBAÑEZ EN DESEMBOCADURA (7a)	[Barra completa]						46° 16'	71° 59'	217	2,483
BAKER EN COLONIA (6a)	[Barra completa]						47° 18'	72° 51'	105	23,736
BAKER EN DES. LAGO BERTRAND (1a)	[Barra completa]						47° 02'	72° 52'	200	15,520
COCHRANE EN COCHRANE (4a)	[Barra completa]						47° 15'	72° 29'	106	2,916
CHACABUCO ANTES JTA. BAKER (3a)	[Barra completa]						47° 07'	72° 34'	-	1,148
EL SALTO ANTES JTA. BAKER (5a)	[Barra completa]						47° 20'	72° 41'	-	1,329
BAKER EN ANGOST. CHACABUCO (2a)	[Barra completa]						47° 09'	72° 36'	130	16,316
PASCUA EN DES. LAGO O'HIGGINS (1b)	[Barra completa]						48° 23'	72° 59'	289	13,300
LAGO O'HIGGINS EN DESAGÜE (2b)	[Barra completa]						48° 23'	72° 59'	285	-
MAYER EN DESEMBOCADURA (3b)	[Barra completa]						49° 35'	72° 36'	350	2,780
PAINE EN PARQUE NACIONAL (6b)	[Barra completa]						49° 58'	72° 47'	-	535
GREY ANTES JTA. SERRANO (7b)	[Barra completa]						51° 11'	73° 01'	50	621
LEONA EN DES. LAGO VIEDMA (4b)	PERIODO: 1955 - 1966						50° 16'	71° 54'	206	15,550
STA. CRUZ EN DES. LAGO ARGENTINO (5b)	PERIODO: 1955 - 1966						49° 47'	72° 05'	250	7,450

[Barra completa] AÑO COMPLETO
 [Barra incompleta] AÑO INCOMPLETO

a) Estaciones en Hielo Patagónico Norte
 b) Estaciones en Hielo Patagónico Sur
 4a,4b Estaciones Argentinas

FIG. 3 Distribución Estacional del Caudal Medio Mensual, temperatura del aire y precipitación.

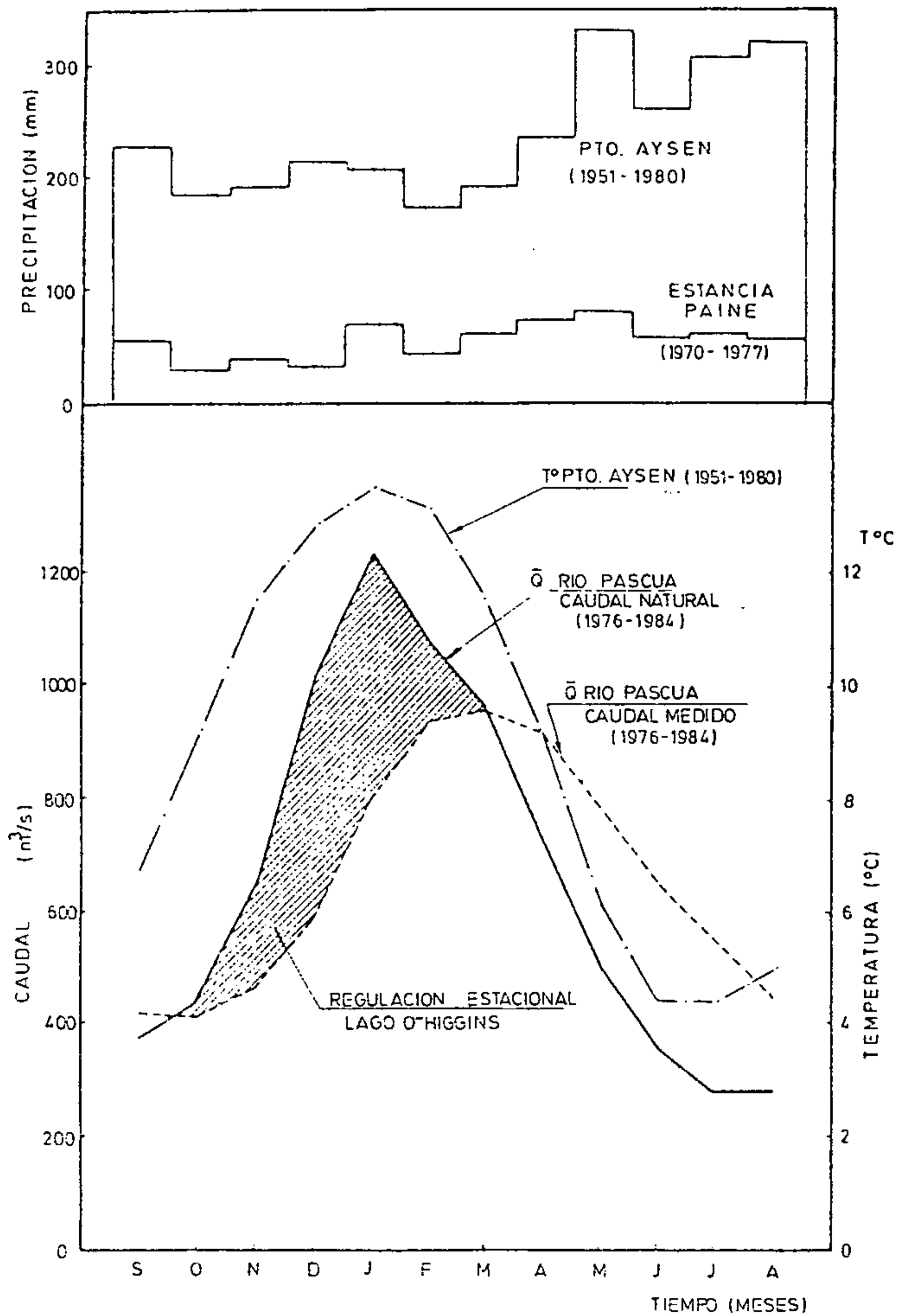


FIG. 4a.- Distribución estacional del caudal medio mensual en tres cuencas del Hielo Patagónico Sur, reguladas por sus respectivos lagos.

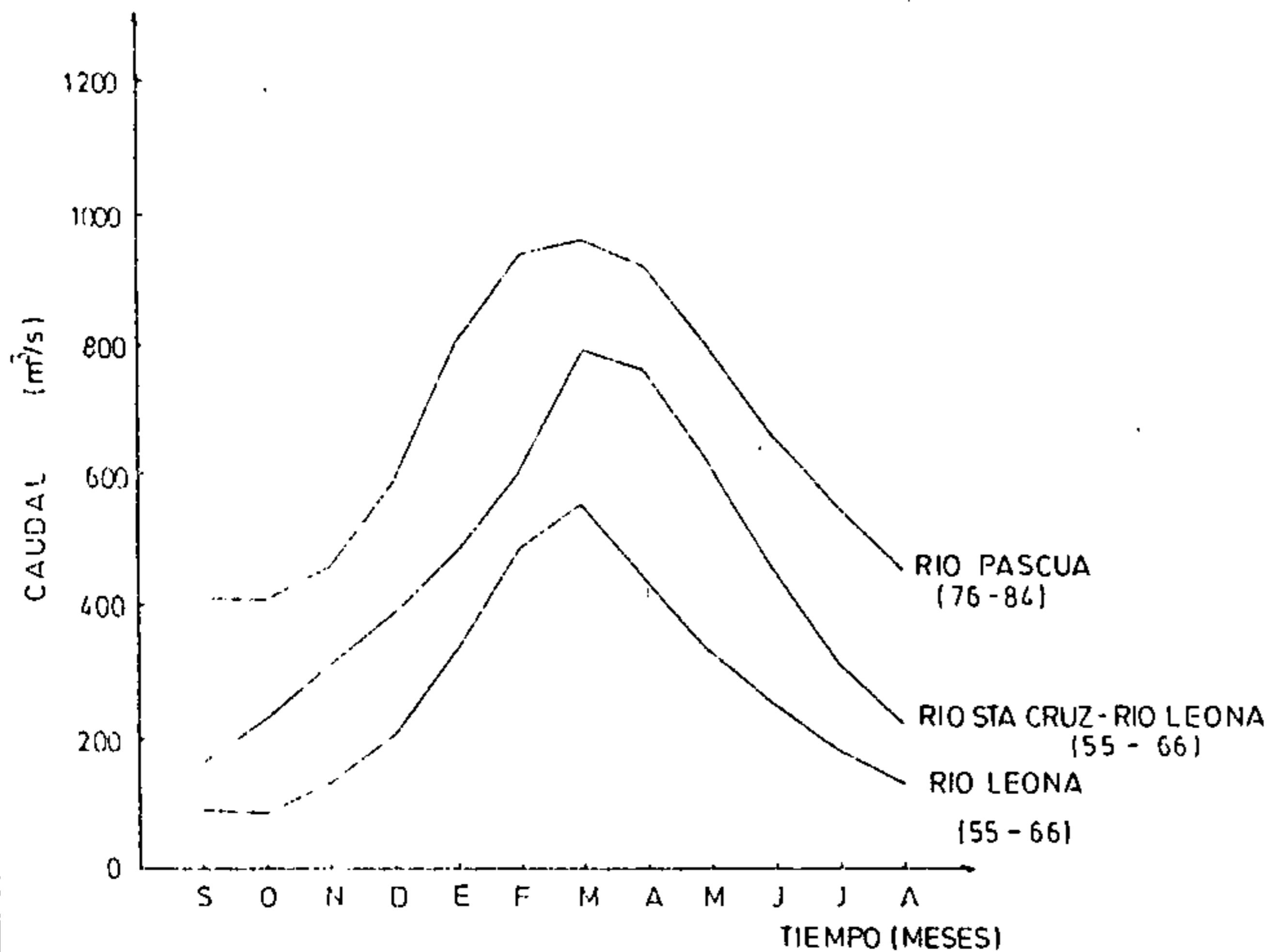


FIG. 4b.- Distribución estacional del caudal medio mensual (dividido por el caudal medio) del Río Pascual con fuerte influencia glaciar y del Río Ibáñez con baja influencia glaciar.

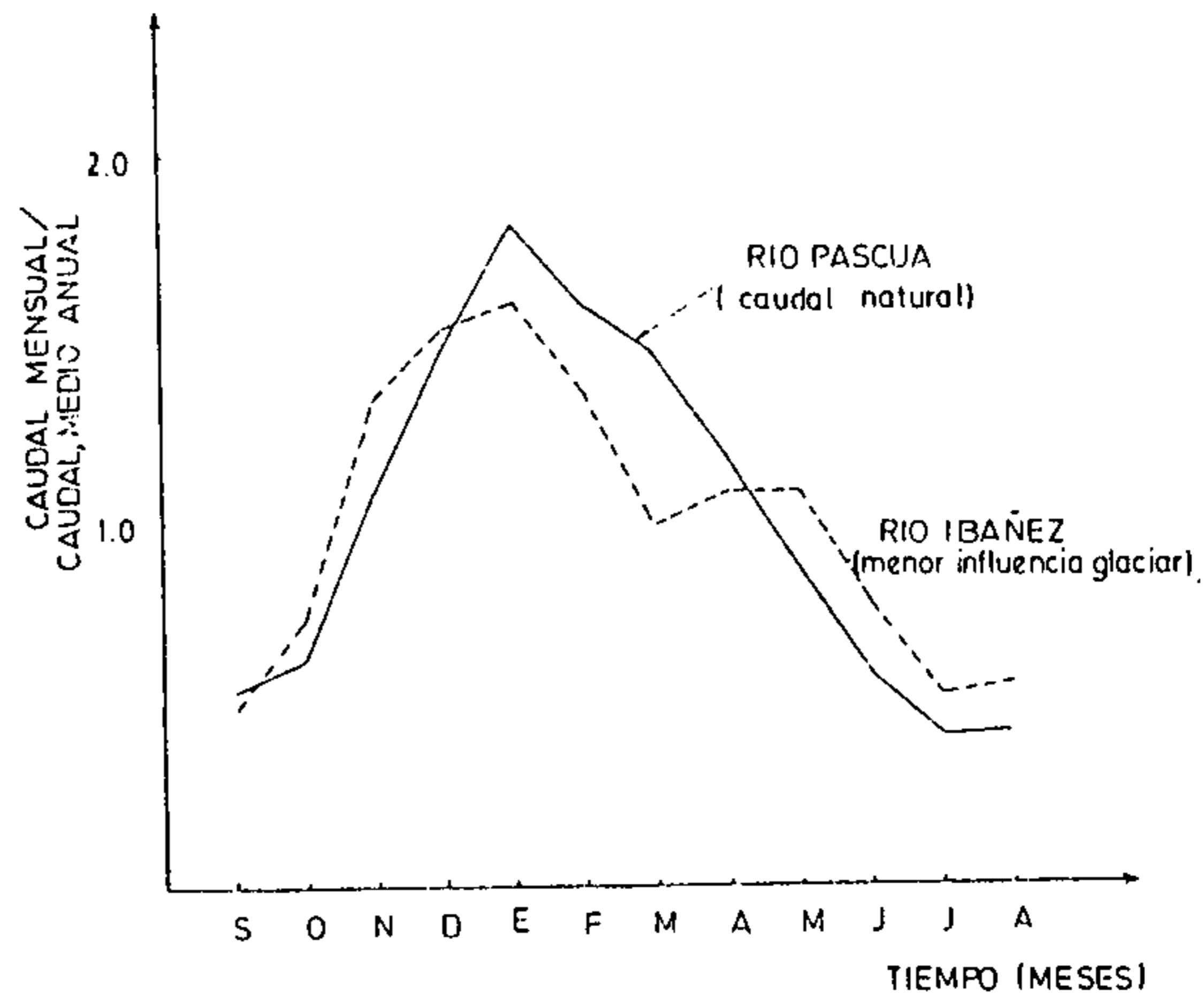


FIG. 5.- Curvas de variación estacional del caudal medio mensual en el Río Pascua (caudal natural)

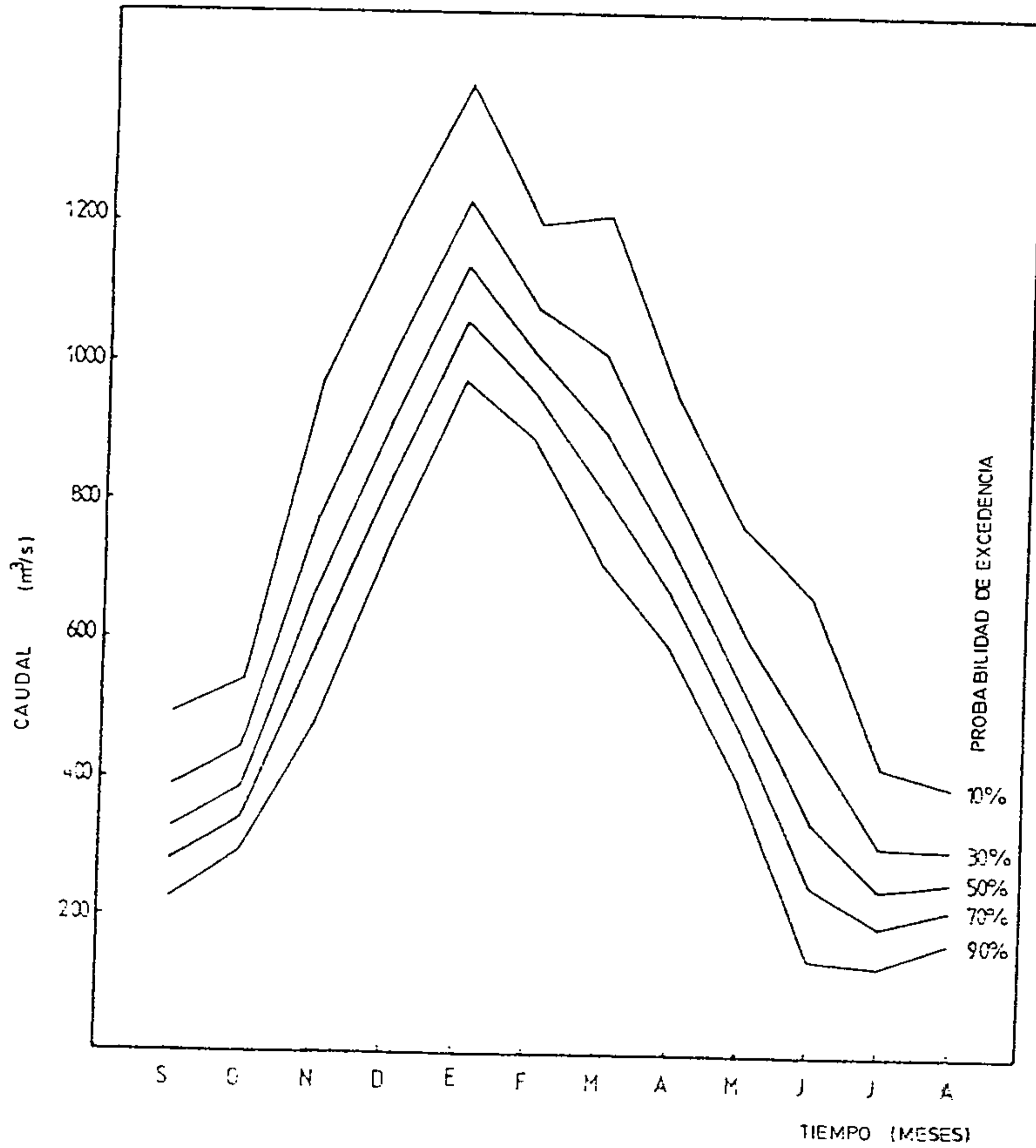


FIG. 6.- Curvas de variación estacional en el río Pasqua.

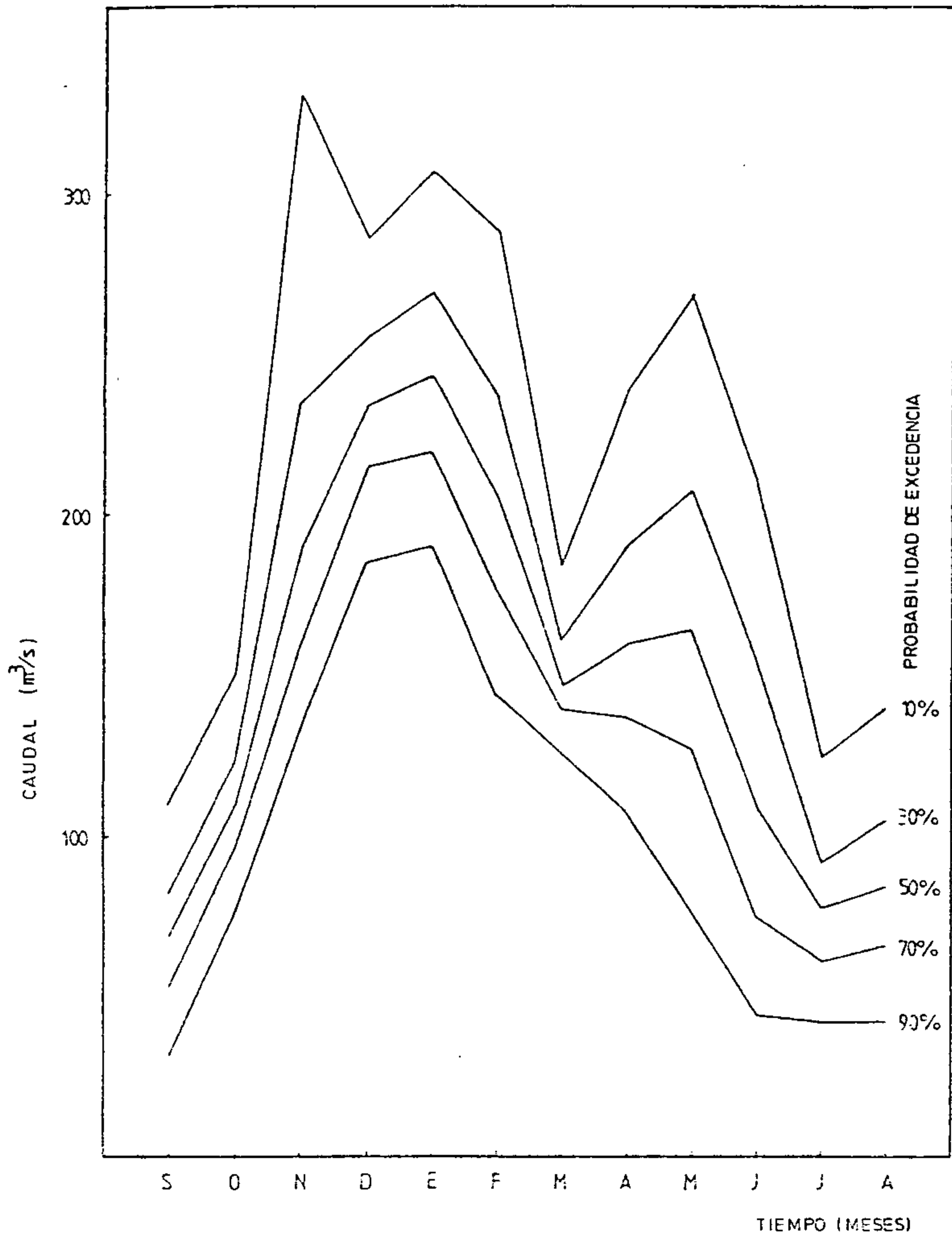


FIG. 7.- Variación del caudal medio anual del Río Pascua (caudal natural), en comparación con la Temperatura media anual y la precipitación anual en la estación Tenencia Lago 0"Higgins.

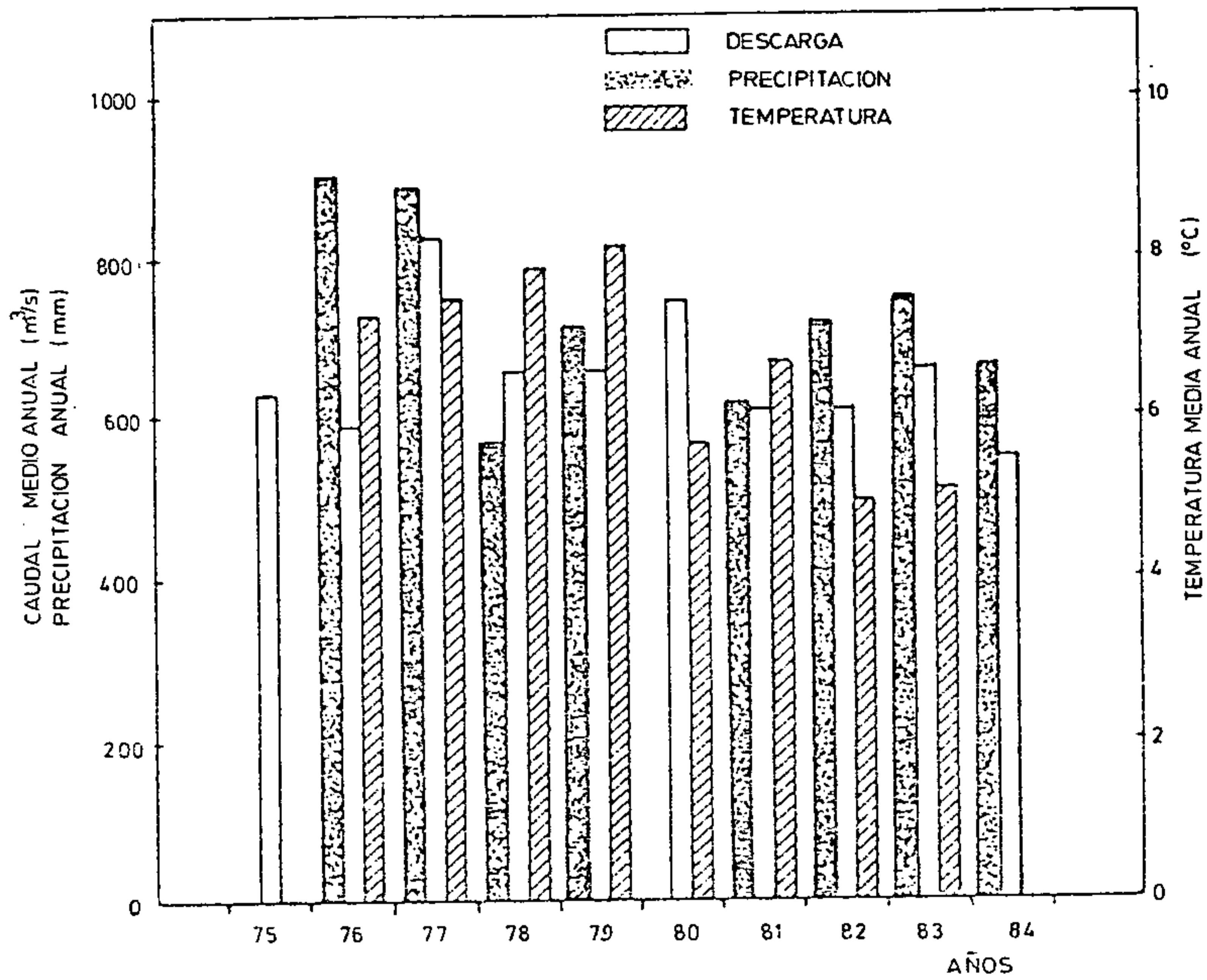
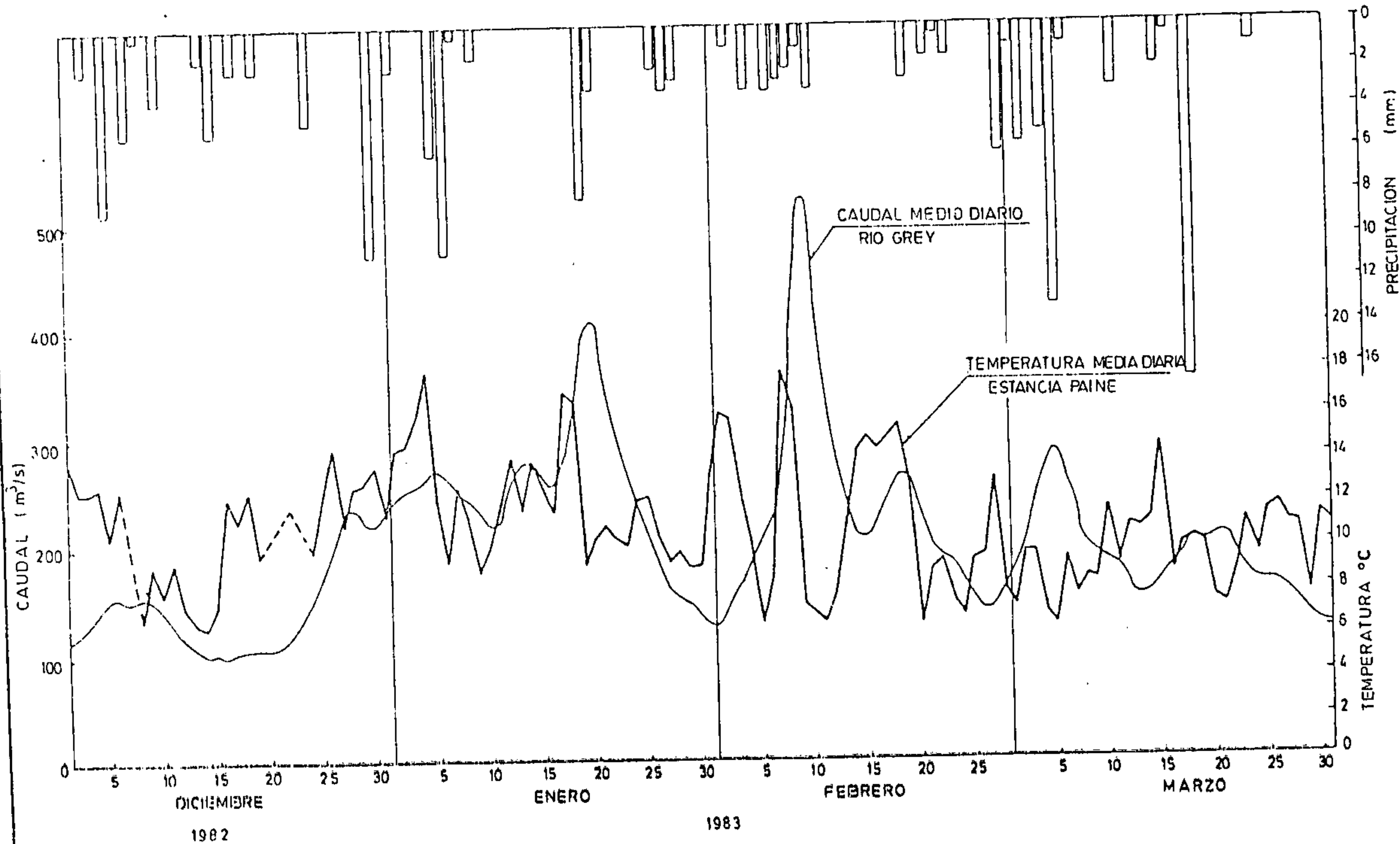


FIG. 8.- Caudal medio diario, temperatura del aire y precipitación en la cuenca del río Grey.



Bibliografía

- AGUA Y ENERGIA ELECTRICA (1970): Resumen de la estadística hidrológica hasta 1967. Secretaría de Estado de Energía, Buenos Aires, 150 p.
- ANIYA, M. and ENOMOTO, H. (1986): Recent glacier variations in the Patagonia Northern Icefields. Transactions, Japanese Geomorphological Unión, 7-1 p. 41-56.
- BERTONE, M. (1960): Inventario de los glaciares existentes en la vertiente Argentina entre los paralelos 47° 30' y 51° S. Pub. N° 3, Inst. Nac. del Hielo Cont. Patag., Buenos Aires, 103 p.
- DATA CENTER FOR GLACIER RESEARCH JAPANESE SOCIETY OF SNOW AND ICE (1985): Glaciological studies in Patagonia Northern Icefield, 1983-1984. Edited by Chotaro Nakajima, 133 p.
- ENDESA (1975) : Estudio de los recursos hídricos de los ríos Baker y Pascua. División de Estudios Hidrológicos, 35 p.
- ENDESA (1980) : Central río Ibáñez. Estudio Hidrológico Informe Oicoi N° 5/80, 30 p.
- LISS, C. (1970): Der Morenogletscher in der Patagonischen Kordillere. Z.f. Gletscherkunde u. Glazialgeologie, Bd. VI, H. 1-2, p. 161-180.
- LLIBOUTRY, L. (1956) : Nieves y Glaciares de Chile. Ediciones de la Universidad de Chile, Santiago, 471 p.
- PEÑA, H. and ESCOBAR, F. (1983) : Análisis de las crecidas del río Paine-XII Región. Publicación Interna E.H. N° 83/7. Dirección General de Aguas, Departamento de Hidrología, 78 p.
- PISANO, E. (1974): Estudio ecológico de la Región Continental Sur del Area Andino-Patagónica. Instituto de la Patagonia, Punta Arenas, Vol. V N°s 1-2, p. 59-104
- SERPLAC, XII REGION (1982): Plan de estudio, Desarrollo Tecnológico Agropecuario, Vol. VI, Instituto de Investigaciones Agropecuarias, 43 p.
- SERVICIO METEOROLOGICO NACIONAL (1960): Atlas Climático de la República Argentina, Secretaría de Aeronáutica, Buenos Aires.

CENTRO DE INFORMACION DE RECURSOS HIDRICOS



3 5617 00001 4217