

---

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA  
I COLOQUIO NACIONAL  
JUNIO - JULIO 1971  
SANTIAGO - CHILE

---

RESUMEN DE ALGUNAS INVESTIGACIONES SOBRE  
HIDROLOGIA DE CUENCAS NIVALES

Basilio Espíldora C. (1)

Ludwig Stowhas B. (2)

La Sección Hidrología y Riego del Departamento de Obras Cíviles, ha desarrollado una línea de investigación en el campo de la Hidrología de Nieves, abordando por una parte el estudio de los factores físicos y meteorológicos que intervienen en los procesos de acumulación y derretimiento de la nieve en condiciones puntuales, y por otra parte la extensión de estas investigaciones a valores regionales y al estudio del comportamiento hidrológico de las cuencas nivales de nuestro país.

En el presente trabajo, se resumen algunos de los estudios, desarrollados o en curso, de los dos aspectos en que se ha dividido la línea de investigación.

- A. Análisis de los factores que intervienen en los procesos de acumulación y derretimiento de un manto de nieve.

Como parte del programa de investigación en Hidrología de Nieves, se inició en 1966, dentro del Convenio Universidad de Chile - Universidad de California, la construcción de un Laboratorio de Hidrología de Nieves

---

(1) Ingeniero Civil. Investigador Jefe Sección Hidrología y Riego, Departamento de Obras Cíviles. U. de Chile.

(2) Ingeniero Civil. Investigador Sección Hidrología y Riego, Departamento de Obras Cíviles. U. de Chile.

en la Cordillera de Los Andes con el propósito de estudiar bajo las más estrictas condiciones naturales posibles los diversos factores que intervienen en los procesos de acumulación, maduración y derretimiento de la nieve.

Además, junto con introducir y estudiar el comportamiento de diversos instrumentos que permitan mejorar los criterios de operación de estaciones cordilleras, se comenzó a recopilar información básica para el desarrollo de modelos de simulación y correlaciones tendientes a perfeccionar métodos de predicción de deshielo a corto y largo plazo.

El Laboratorio fué instalado al Norte del centro de esquí de La Parva, Farellones (Fig. N°1) (2.680 msnm)

Abarca una superficie cerrada aproximadamente plana de  $600 \text{ m}^2$  en la cual se delimitó un cuadrado de 5 mts. de lado con fondo impermeable y leve pendiente hacia el centro sobre el cual se deposita la nieve en forma natural. (Fig. N°3)

Esta superficie actúa como un lisímetro, ya que el deshielo es conducido a una instalación subterránea donde es aforado volumétricamente mediante un estanque con un limnógrafo. (Fig. N°2)

Las figs. Nos. 4 y 5 muestran aspectos de la faena de construcción de la instalación subterránea fabricada en tubo corrugado ovalado con diámetro mayor de 2,70 mts y 14 mts. de largo.

Dentro del lisímetro se instalaron dos tubos de acceso verticales, separados en 60 cm entre sí, con el objeto de desplazar una fuente radioactiva y un detector de rayos gamma que permiten tomar perfiles de densidad de nieve basándose en la ley de absorción de la radiación.

Fig. N° 1

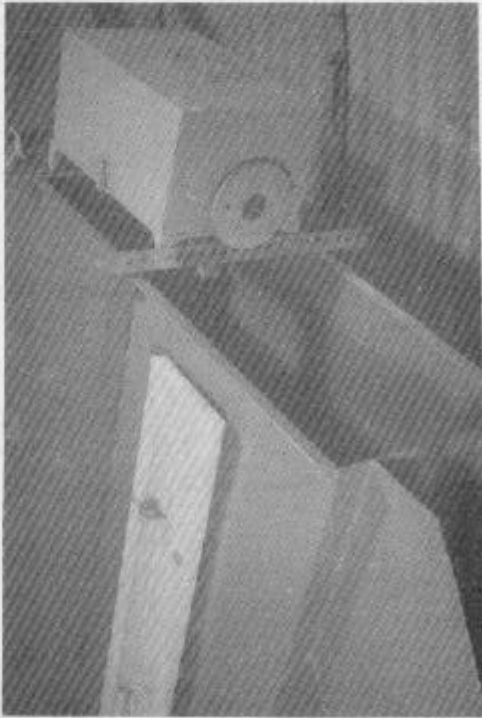
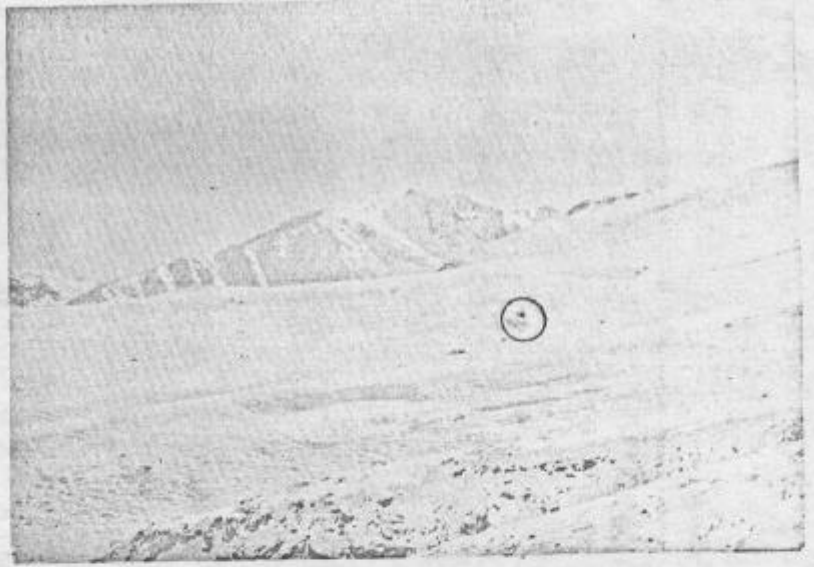
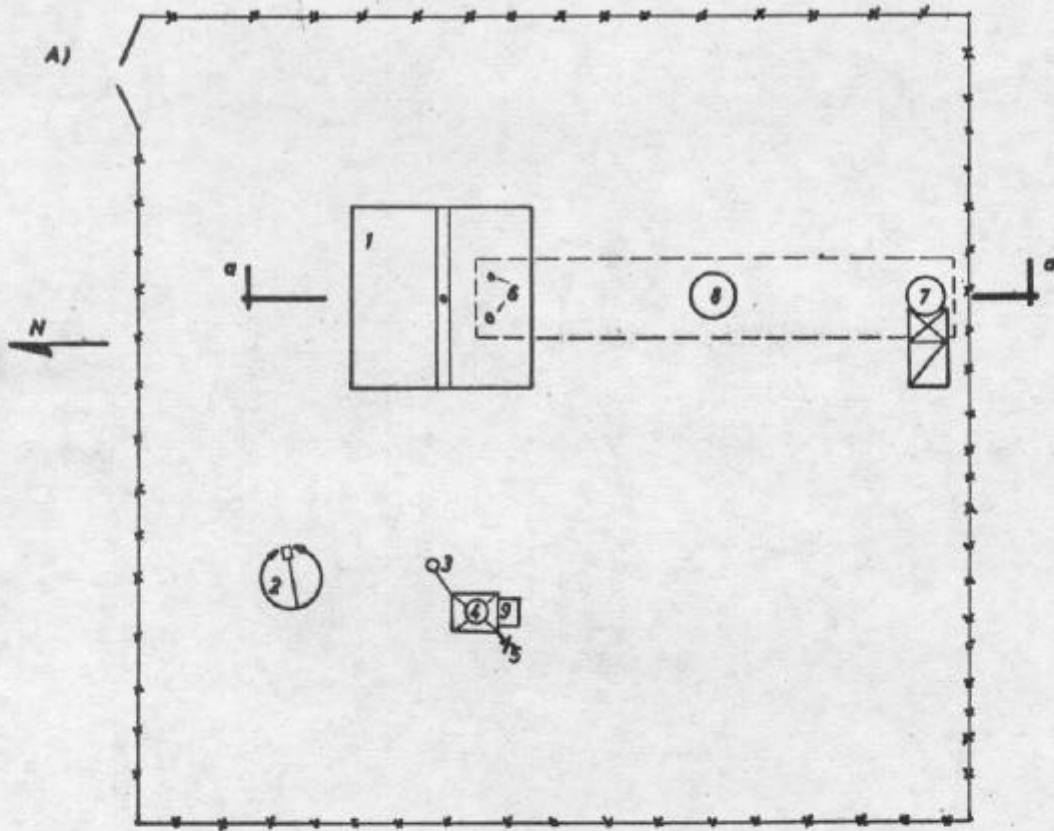
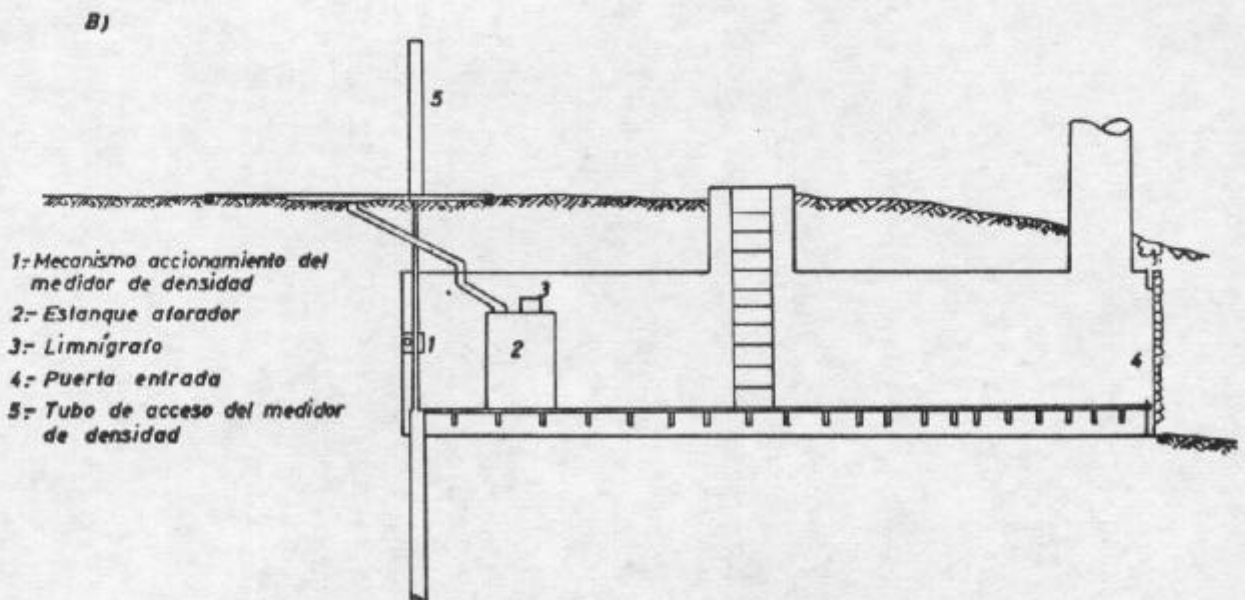


Fig N° 2





- |                             |                             |
|-----------------------------|-----------------------------|
| 1.- Lisímetro               | 5.- Anemometro              |
| 2.- Radiómetro neto         | 6.- Medidor densidad        |
| 3.- Piranómetros            | 7.- Torre y chimenea acceso |
| 4.- Pluviógrafo             | 8.- Acceso verano           |
| 9.- Termógrafo e higrógrafo |                             |



- |   |
|---|
| 1.- Mecanismo accionamiento del medidor de densidad |
| 2.- Estanque atorador                               |
| 3.- Limnógrafo                                      |
| 4.- Puerta entrada                                  |
| 5.- Tubo de acceso del medidor de densidad          |

FIG. 3 ESQUEMA DE INSTALACIONES DEL LABORATORIO DE MANANTIALES  
A) PLANTA B) CORTE a-a



Figura 4



Figura 5

Figura 6



Figura 7

En la Fig. N°7 se observa el lisímetro de nieve, distinguiéndose los tubos de acceso del equipo medidor de densidades que es operado desde la instalación subterránea mediante un sistema de cremalleras accionado por un motor (Fig. N°9).

La Fig. N°8 muestra diversos perfiles de nieve tomados en el Laboratorio, donde se puede apreciar la evolución del manto a lo largo del período de maduración.

En superficie, el Laboratorio se complementa con una estación meteorológica que cuenta con un radiómetro neto, piranómetros para radiación incidente y reflejada (Fig. N°6), torre con nivógrafo de balanza (Fig. N°12), termohigrógrafo, teletermógrafos para medir temperaturas del suelo (Fig. N°13), anemógrafo y veleta (Fig. N°14), heliógrafo, evaporímetros de nieve, un juego de 10 termistores para determinar perfiles de temperatura de nieve (Fig. N°10) y un nivopiezómetro (Fig. N°11) instalado por la Dirección General de Aguas.

Tanto los datos de velocidad y dirección del viento, como de radiación incidente, reflejada, neta y temperatura de la nieve se inscriben en forma automática mediante inscriptores ubicados en la instalación subterránea.

Cabe destacar que para la instalación del Laboratorio se contó con la cooperación de diversas instituciones entre las que podemos destacar a Corfo, Chilectra, Dirección de Riego, Enami y Endesa.

El Laboratorio está en operación desde mediados de 1967; desgraciadamente, debido al período de sequía que ha afectado a la zona central en los últimos años, podemos decir que sólo en 1970 se ha logrado recoger información suficiente, que permitirá la aplicación de modelos de simulación y otras técnicas de predicción de deshielo.



FIGURA N° 9  
 PERFILES DE SECAIDAD DE NIEVES

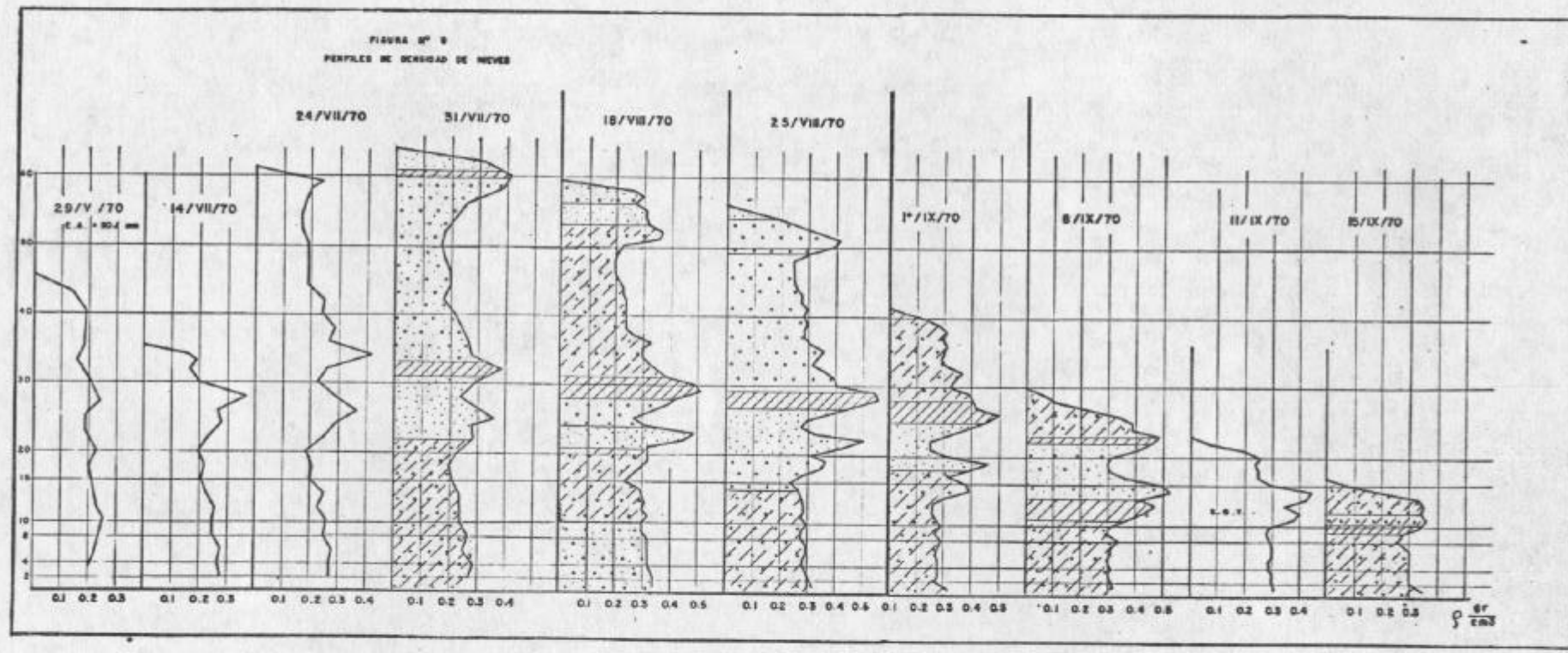






Figura 9

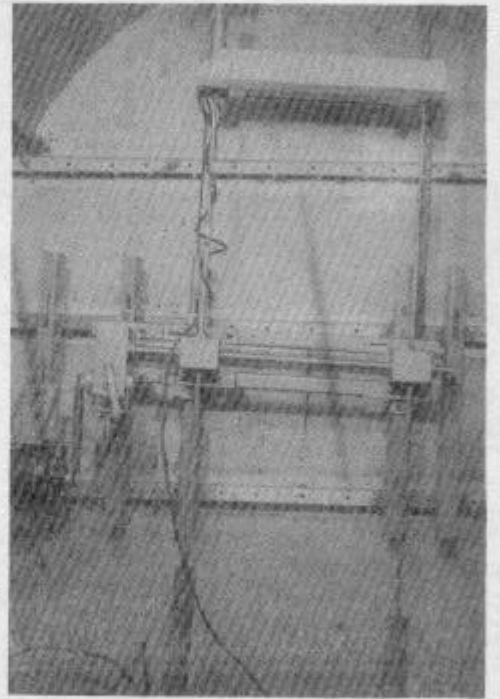


Figura 10

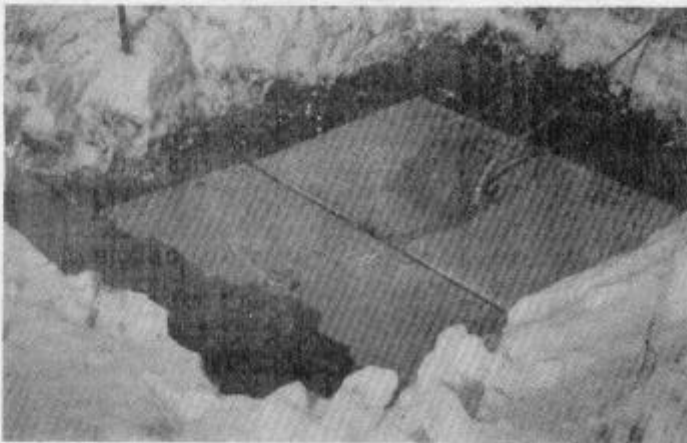


Figura 11

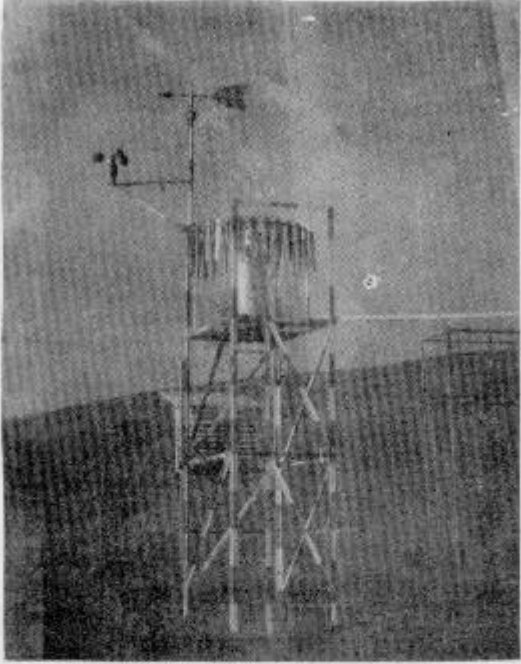


Figura 12

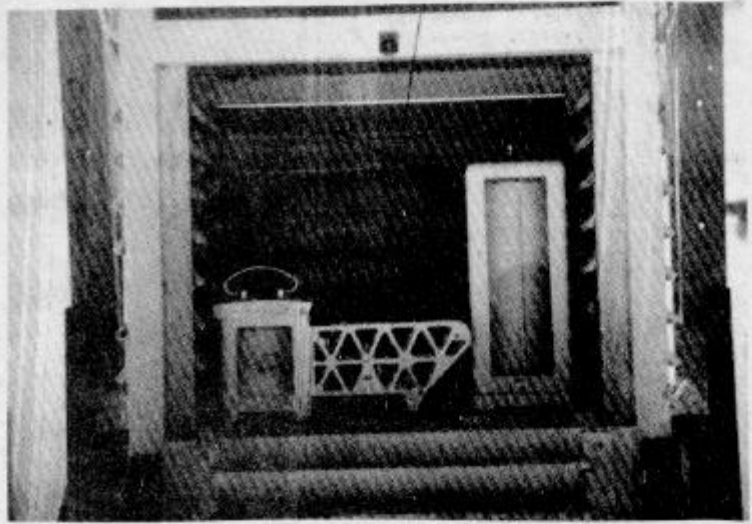


Figura 13

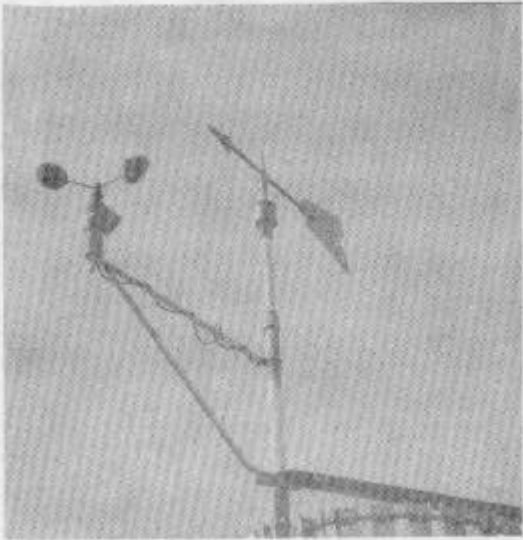


Figura 14

Al respecto, se dispone de un modelo matemático elaborado por J. Amorocho y B. Espíldora y optimizado por P. Ferrer, que simula los procesos de maduración y derretimiento de la nieve en base a información hidrometeorológica.

En los años 1967 y 1969 la información obtenida en el Laboratorio fué escasa y en 1968 prácticamente no hubo nieve en toda la temporada.

A pesar de esto, en algunas investigaciones se tienen ya resultados preliminares que estimamos interesante darlos a conocer.

i. Eficiencia del nivómetro.

Comparando los registros del nivógrafo con los volúmenes de nieve recogidos en el lisímetro, se ha obtenido información referente a la eficiencia de captación del nivómetro en función de la velocidad del viento.

Los resultados se relacionan en la Fig. N° 15 comparándolos con valores encontrados en la bibliografía

ii. Estimación de la radiación solar.

En base a datos medidos de radiación solar y de las condiciones meteorológicas, se ha determinado una expresión para estimar radiación incidente en base a datos de presión de vapor, tipo de nubes y nebulosidad.

$$R_i = 0,86 I_s e^{-\frac{0,023p \times K(1-N)}{\cos Z}} \text{ cal/cm}^2/\text{día}$$

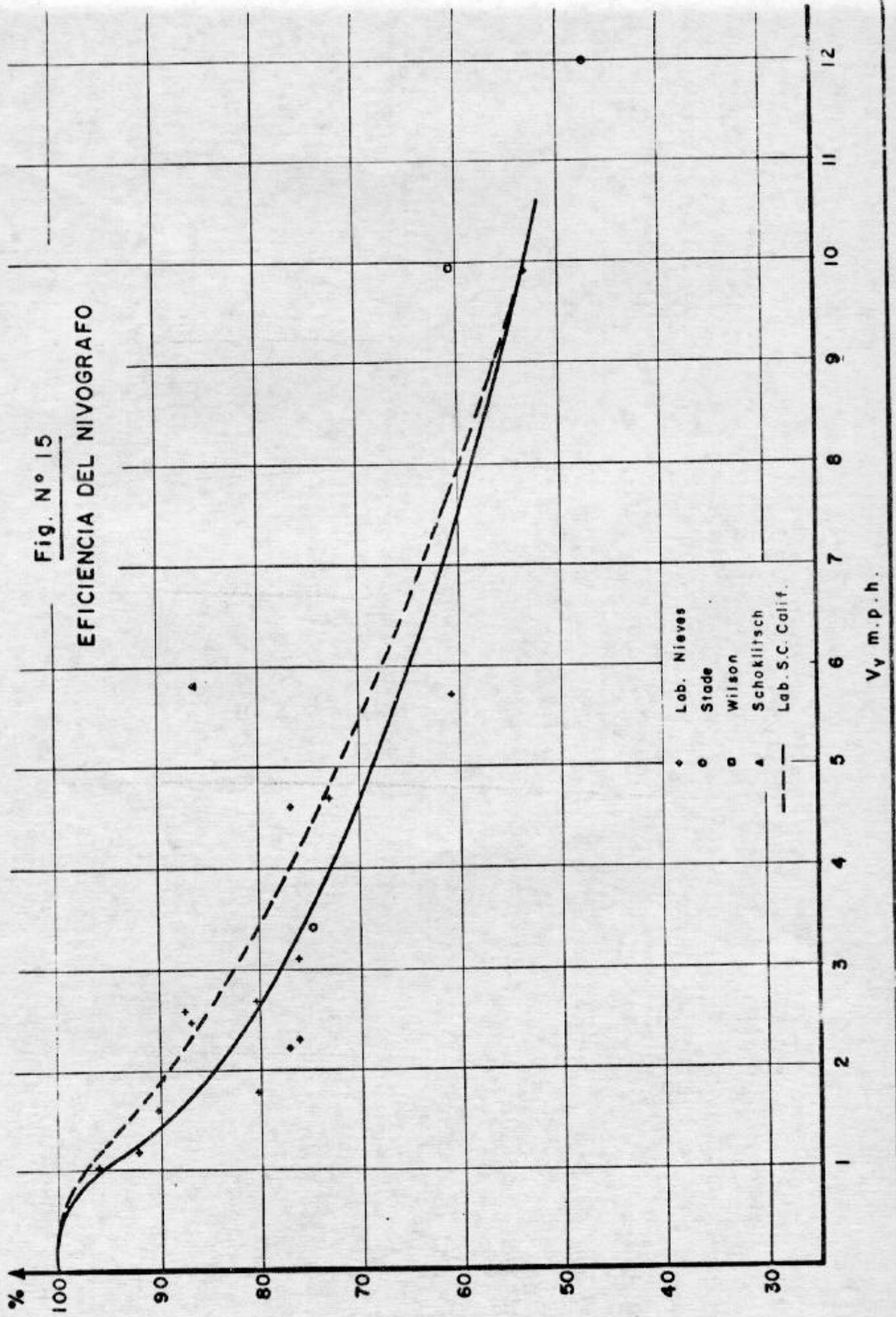
donde  $R_i$  = radiación solar incidente

$I_s$  = radiación fuera de la atmósfera



Fig. N° 15

EFICIENCIA DEL NIVOGRAFO





- p = presión de vapor (mm Hg)  
N = número de horas de sol (°/1)  
Z = ángulo cenital del sol al mediodía  
K = factor variable entre 0,34 para nubes altas delgadas y 1,0 para nubes gruesas y bajas.  
e = base logaritmos naturales

De esta expresión se deduce una transparencia máxima de la atmósfera de 0,86, una absorción por parte de la humedad atmosférica variable en un rango entre el 3% y 12% para valores usuales de presión de vapor y una absorción por parte de las nubes de un 29% a un 84%.

### iii. Indices de deshielo.

Análisis efectuados con diversas variables meteorológicas demuestran que ninguna de ellas es, en forma individual, un buen índice del derretimiento diario. Esto se debe principalmente al importante papel que juega en el balance térmico el albedo o reflectividad de la nieve, factor que sufre una fuerte variación en el tiempo. Esto ha motivado un estudio de la variabilidad o determinación de curvas de albedo, investigación que aún no arroja resultados concluyentes.

El único índice de deshielo aceptable obtenido hasta la fecha, es en base a radiación neta absorbida por la nieve, valor que se independiza del albedo y que se correlaciona con el derretimiento mediante una expresión del siguiente tipo.

$$H = 0,105 RN + 3,6 \text{ (mm) , error standard} = 4,5\text{mm}$$

Para valores de derretimiento acumulado, se ha obtenido una relación en base a un factor grado-día acumulado, obteniéndose la siguiente ecuación:

$$H = 0,0676 \cdot \left[ \sum (T_m - T_b) \right]^{1.44} \text{ (mm)}$$

error standard de log H = 0,117

donde  $T_m$  = temperatura máxima diaria

$T_b$  = temperatura base =  $-7 \text{ } ^\circ\text{C}$

Esta expresión es válida para nieve madura, es decir, la sumatoria de temperaturas se comienzan desde el primer día de deshielo y suponiendo que éste no se interrumpe por nevazones. En caso de ocurrir alguna, debe comenzarse a acumular nuevamente la temperatura desde el comienzo del deshielo.

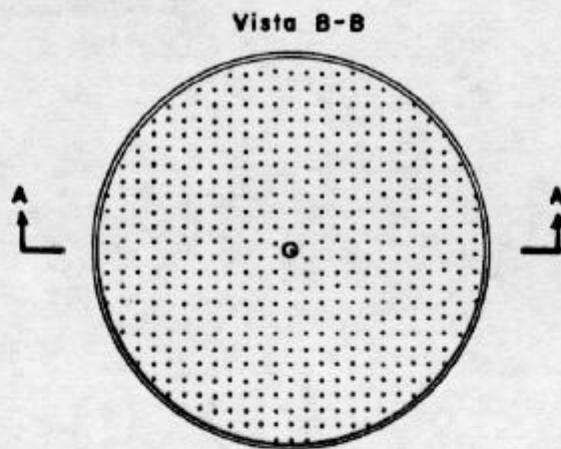
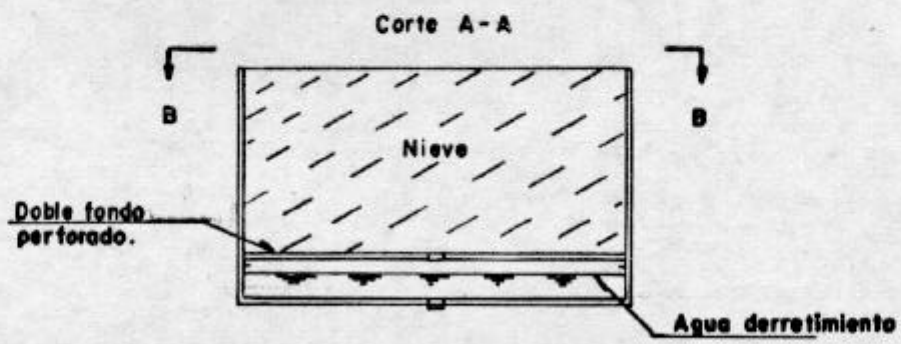
#### iv. Medidas de sublimación de nieve.

Mediante la instalación de "evaporímetros" de nieve especialmente contruídos, (Fig. N°16) se ha podido medir en forma directa la sublimación de la superficie de la nieve. Para un período de observación de 67 días, comprendido entre mediados de Agosto y mediados de Octubre de los años 1969 y 1970 se ha obtenido una sublimación media diaria de 0,73 mm con un máximo observado de 6 mm en un intervalo de 3 días (2 mm/día).

La sublimación aparece mayor durante los períodos en que se observa derretimiento, midiéndose un promedio de 0,88 mm/día, mientras que cuando no se observa deshielo la sublimación se reduce a un promedio de 0,37 mm/día.

**FIGURA N° 16**  
**EVAPORIMETRO DE NIEVE**

ESCALA 1:10





No se ha observado dependencia entre la evaporación y la cantidad de agua derretida.

Estos hechos confirman que la principal pérdida de agua se produce por evaporación del agua líquida contenida en la nieve, siendo muy secundario el efecto de la sublimación propiamente tal, de los cristales de nieve. Por estos motivos, se propone referirse al fenómeno por medio del término "evaposublimación".

El paso siguiente en la línea de investigación en el Laboratorio consiste en la extensión a valores regionales de los resultados puntuales obtenidos. Para estos efectos, se terminó de instalar una sección de aforo que delimita una pequeña cuenca cordillerana cercana al Laboratorio con el objeto de extender a ella, en primera instancia, las conclusiones obtenidas. En este sentido, se dispone ya de un primer estudio desarrollado por P. Ferrer aplicando un método basado en el análisis lineal de sistemas, quien mediante una integral de convolución transforma los datos puntuales de derretimiento registrados en el Laboratorio en escorrentía de deshielo en la sección Los Almendros del río Mapocho.

#### B. Estudios de Hidrología de Nieves a nivel de cuenca.-

El segundo aspecto de la línea de investigación en Hidrología de Nieves, ha consistido en desarrollar algunos estudios a nivel de cuenca que permitan caracterizar en ellas el régimen de escorrentía de deshielo.

En los años 1967 y 1968 se elaboraron pronósticos de escurrimiento de deshielo en las cuencas de Aconcagua, Mapocho y Maipo y a las cuales se les dió alguna divulgación entre las Instituciones y organismos potencialmente interesados en esta información.



Durante la sequía de 1968, se intentó un sistema de predicción en las cuencas mencionadas, basado en el hecho que prácticamente el único aporte a los escurrimientos de deshielo lo constituían los glaciares. En base, principalmente, a la información e investigaciones preliminares efectuadas hasta esa fecha en el Laboratorio de Hidrología de Nieves, se efectuó un balance de energía aproximada de las áreas cubiertas por glaciares y extrapolando la recesión de invierno de los gastos del río, se estimaron los gastos medios mensuales en el período Septiembre 1968 - Abril 1969. Esta estimación se reajustó en base a lo observado en otros años secos y algunas apreciaciones generales sobre rendimiento de las cuencas. El pronóstico efectuado adoleció de errores por defecto y aunque el pronóstico de volumen total escurrido fué razonable, su distribución mensual fué muy defectuosa.

La experiencia obtenida en estos estudios de pronósticos de escurrimientos de deshielo indujeron a iniciar investigaciones más sistemáticas sobre las características del régimen de deshielo en algunas cuencas y estudiar métodos para su pronóstico.

Hasta la fecha se han desarrollado estos estudios en las cuencas cordilleranas de Aconcagua, Maipo y Teno y sus subcuencas respectivas. Estos estudios han sido propuestos y dirigidos por B. Espíldora y han sido desarrollados como temas de memoria por los Sres. Armando Espinosa, Patricio González y Pedro Schlack, respectivamente. A continuación se resumen las principales conclusiones de estos estudios.

Habiéndose corregido, completado y ampliado las estadísticas de gastos de todas las estaciones fluvio métricas existentes en la zona cordillerana de las cuencas mencionadas (Aconcagua, Maipo y Teno), se han efectuado análisis de frecuencia (o de probabilidades)

de los gastos medios en el período de deshielo, de los gastos medios mensuales y de los gastos medios diarios máximos y mínimos. Para ello, se ajustaron a los datos diferentes distribuciones estadísticas mediante un programa de computación previamente elaborado. Las distribuciones estadísticas estudiadas fueron la logarítmica-normal, la Gumbel, la gama de 2 parámetros y la normal. La conclusión de este estudio fué que no existe una distribución estadística única que se ajuste siempre a un tipo de gasto en la mayoría de las estaciones fluviométricas. Por ejemplo, en las diferentes estaciones fluviométricas existentes en la cuenca del Aconcagua, en una de ellas la distribución estadística que mejor representa las probabilidades de excedencia de los gastos medios de deshielo fué la logarítmica normal, mientras que en otras estaciones, lo fueron la distribución gama, y la de Gumbel. Algo análogo ocurre con las distribuciones de mejor ajuste de los gastos medios diarios máximos, o con los gastos medios mensuales. Sólo en la cuenca del Maipo y en relación a los gastos medios del período de deshielo, la distribución de mejor ajuste fué sistemáticamente la logarítmica normal en todas las secciones fluviométricas. Habiéndose así determinado cual es la distribución estadística que mejor se ajusta según el tipo de datos y la estación fluviométrica que se trate, se dispone ahora de cuadros de las probabilidades de excedencia para estos datos en las diferentes subcuencas estudiadas.

En relación a la predicción del volumen total a escurrir durante el período de deshielo (Septiembre - Abril), se ha concluído que en la región en estudio el mejor método es efectuar esta predicción mediante ecuaciones lineales múltiples con dos variables independientes. Los modelos de regresión que mejor resultado han dado, en base a los datos disponibles, son los que se resumen en el cuadro I.

C U A D R O I

Ecuaciones de predicción para el  
Volumen de Deshielo en diferentes cuencas

Cuenca	Ecuación de Regresión	Coef. de Regresión
Aconcagua en Chacabuquito	$V_t = 0,888P_t + 0,711R_t + 289,76$	0,918
	$V_t = 0,930R_t + 0,027R_{t-1} + 407,69$	0,915
Maipo en el Manzano	$V_t = 1,898R_t + 0,0964V_{t-1} + 1.175,49$	0,790
	$V_t = 1,407P_t + 1,261R_t + 1.135,71$	0,7897
Yeso en Embalse	$V_t = 0,140R_t - 0,132V_{t-1} + 162,44$	0,857
Claro en Los Queñes (Hoya del río Teno)	$V_t = 0,3496R_t - 0,2459V_{t-1} + 197,93$	0,9445
	$V_t = 0,2934R_t + 0,0839P_t + 70,53$	0,9212

- En que:  $V_t$  = Volumen total a escurrir entre Sept-Abril del año "t" en  $10^6 m^3$   
 $V_{t-1}$  = Idem en año anterior (t-1)  
 $P_t$  = Índice o patrón de precipitación en año "t" en mm.  
 $R_t$  = Equivalente de agua máximo según la ruta de nieve en año "t" en mm  
 $R_{t-1}$  = Idem en año "t-1"

El gasto medio del mes de máximo deshielo puede pronosticarse con bastante exactitud en base a una correlación lineal simple, usando el volumen de deshielo previamente pronosticado, como variable independiente. El coeficiente de regresión obtenido ha sido, en general, del orden de 0,95. En estas correlaciones no se ha observado ninguna tendencia en los meses que permita pronosticas cual va a ser el mes de máximo deshielo.

Para solucionar este problema se puede recurrir a la estadística previa del río y estudiar el porcentaje de años, según el tipo de año, en que el gasto medio mensual máximo ha ocurrido en diferentes meses. En el cuadro II se resume la información para las cuencas estudiadas.



C U A D R O    I I

CUENCA	Tipo de año	% de casos en que el gasto medio mensual max. ocurra en distintos meses				
		Nov.	Dic.	Ene.	Feb.	Mar.
ACONCAGUA en Chacabuquito	Húmedo	0	72,8	27,2	0	0
	Normal	36,4	63,6	0	0	0
	Seco	20,0	40,0	40,0	0	0
MAIPO en el Manzano	Húmedo	0	66,7	33,3	0	0
	Normal	25	50	25	0	0
	Seco	0	33,3	66,7	0	0
YESO en Embalse	Húmedo	8	33	53	0	6
	Normal	0	50	50	0	0
	Seco	0	35	47	12	6
CLARO en Los Queñes	Húmedo	(17)-67	16	0	0	0
	Normal	(10)-75	15	0	0	0
	Seco	(0)-100	0	0	0	0
TENÓ antes de Claro	Húmedo	25	50	25	0	0
	Normal	55	45	0	0	0
	Seco	90	0	10	0	0

Año Húmedo = Volumen de Deshielo tiene probabilidad de excedencia menor que 30%.

Año Normal = Volumen de Deshielo tiene probabilidad de excedencia entre 30% y 70%.

Año Seco = Volumen de Deshielo tiene probabilidad de excedencia mayor que 70%.

La distribución mensual del volumen de deshielo a escurrir entre Septiembre a Abril (inclusives) ha podido ser pronosticada en las cuencas estudiadas en base a dos procedimientos.

Uno de ellos consiste en usar curvas adimensionales del tipo:

$$\frac{\text{Vol del mes}}{\text{Vol.de deshielo}} \text{ versus Mes del período de deshielo}$$

Estas curvas se han obtenido para diferentes tipos de años (húmedos, normales y secos), para diferentes meses en que haya ocurrido el gasto medio mensual máximo.

El otro método para pronosticar el hidrograma mensual de deshielo ha sido el de obtener regresiones lineales del siguiente tipo, (por ejemplo si el mes de máximo es Noviembre):

Para meses antes del mes de máximo: (rama ascendente)

$$(Q_{\text{Sept}} + Q_{\text{Oct}}) \text{ vs } (Q_{\text{Sept}} + Q_{\text{Oct}} + Q_{\text{Nov}})$$

$$Q_{\text{Sept}} \text{ vs } (Q_{\text{Sept}} + Q_{\text{Oct}})$$

Para meses después del mes de máximo: (rama de recesión)

$$Q_{\text{Dic}}, Q_{\text{En}}, Q_{\text{Mar}}, Q_{\text{Abr}} \text{ vs } (Q_{\text{Sept}} + Q_{\text{Oct}} + Q_{\text{Nov}})$$

Sólo en la cuenca del río Teno se han aplicado ambos métodos, encontrándose errores menores de predicción en base al último método indicado.

Se ha encontrado además, que el máximo y el mínimo gasto medio diario del período de deshielo puede pronosticarse razonablemente bien en base a una regresión lineal simple con el gasto medio del mes de máximo y del mes de mínimo, respectivamente.

Finalmente, en relación a los errores medios posibles que pueden esperarse en los sistemas de pronósticos estudiados se hace referencia al cuadro III que resume lo obtenido en las cuencas de Aconcagua, Maipo y Yeso, de acuerdo a la estadística histórica registrada.

C U A D R O   I I I

Errores promedio en pronósticos del  
Volumen de deshielo

Tipo de Año	C U E N C A		
	Aconcagua en Chacabuquito	Maipo en el Manzano	Yeso en Embalse
Húmedo	10,3 % Son mayores (menores) si el año anterior fué seco (húmedo)	20 %	9 %
Normal	8,7 % Son mayores si año anterior fué húmedo	14 %	6 %
Seco	17 % Son mayores si año anterior fué seco	25 %	8 %



BIBLIOGRAFIA

- Amorochco J. y B. Espíldora "Mathematical Simulation of the Snow Melting Processes", Water Sciences and Engineering, Papers 3001, Univ. of California, Davis, Febrero 1966.
- Corps of Engineers, U.S. Army "Snow Hydrology" Portland, Oregon U.S.A., Junio 1956.
- Espíldora B., L. Stowhas y E. Brown, "Informe sobre las predicciones de los caudales de deshielo para el río Yeso y la primera sección del río Maipo" Sección Hidrología y Riego, U. de Chile, 1968.
- Espíldora B., L. Stowhas y E. Brown, "Informe sobre la predicción de caudales en la primera sección del Río Aconcagua", Sección Hidrología y Riego, Univ. de Chile, 1968.
- Espinoza A., "Caracterización estadística del régimen de escorrentía de deshielo del Río Aconcagua, Memoria de Título, Escuela de Ingeniería, U. de Chile (en preparación).
- Ferrer Patricio "Optimización de un modelo de Hidrología de Nieves, Memoria de Título, Escuela de Ingeniería, Univ. de Chile, 1967.
- Ferrer Patricio, "Aplicación del Análisis Lineal de Sistemas en Cuencas Nivales", Sección Hidrología y Riego, Depto. de Obras Civiles, U. de Chile. Publicación SHR-5, Diciembre 1968.
- González Patricio, "Caracterización estadística del régimen de escorrentía de deshielo del Río Maipo y métodos para su predicción. Memoria de Título, Escuela de Ingeniería, U. de Chile, 1970.

Linsley, Kohler y Paulhus, "Hydrology for Engineers"  
Mc Graw Hill, 1958.

Schlack Pedro, "Criterios para la operación del sistema  
de riego del Río Teno", Memoria de Título, Escuela  
de Ingeniería, U. de Chile (en preparación).