

MODELACION DE LA INFILTRACION Y SU INFLUENCIA EN LA RESPUESTA DE UNA CUENCA PLUVIAL  
Bonifacio Fernández L. 227

ESTIMACION DE LOS PARAMETROS DE UN MODELO DE INFILTRACION PARA SUELOS NO SATURADOS  
Roberto Abeliuk 243

### 3.- HIDRAULICA FLUVIAL

ANALISIS HIDRAULICO EN LOS PROYECTOS DE CANALIZACION DEL RIO BIO - BIO BAJO  
Victor Aros A. - Tristan Neyra J. - Rolando Tramon C. 263

EVALUACION TECNICO - ECONOMICA DE PROYECTOS DE DEFENSA FLUVIAL ANALISIS DE SU APLICABILIDAD BASADO EN DOS CASOS DE ESTUDIO  
Luis Araya R. - David González G. 279

ARRASTRE DE SEDIMENTOS POTENCIAL Y REAL: UNA DIFERENCIACION BASICA PARA LA CARACTERIZACION MECANICO FLUVIAL DE CURSOS TORRENCIALES  
Luis Ayala R. - Alejandro López A. - Yarko Niño C. 295

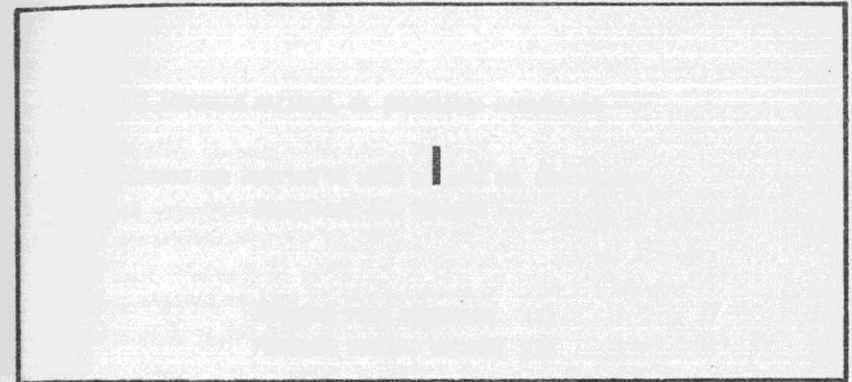
MODELO COMPUTACIONAL DE LOS PROCESOS DE EROSION Y LA PRODUCCION DE SEDIMENTOS EN LADERAS  
Luis Ayala R. - Miguel Carrasco R. 311

### 4.- HIDRO METEOROLOGIA

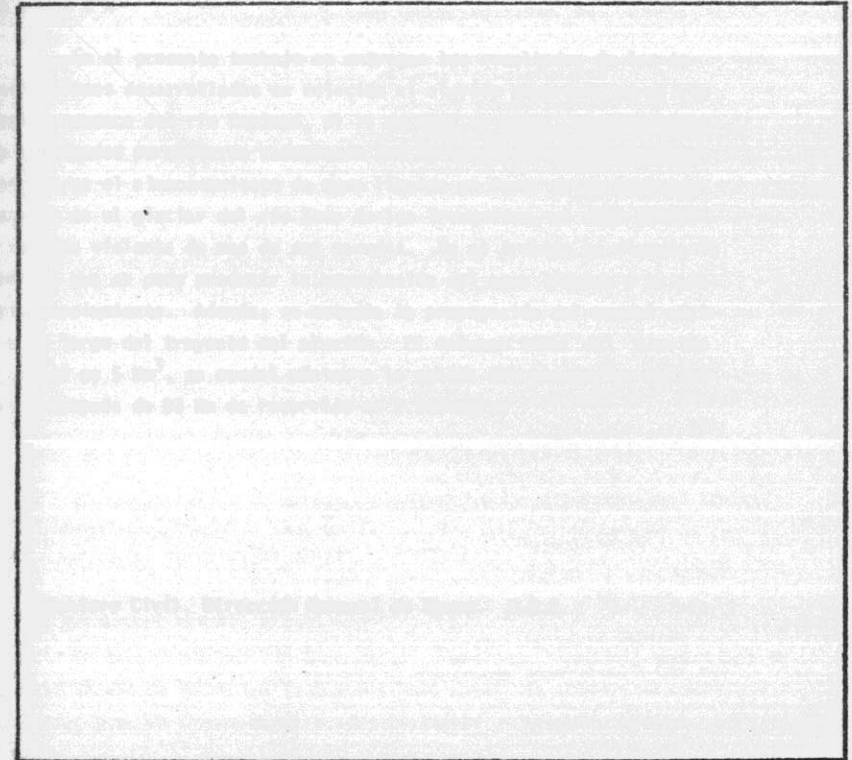
CONSIDERACIONES BASICAS PARA EL ANALISIS GEOESTADISTICO DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL DE UNA PROPIEDAD GEOFISICA  
José Muñoz P. - Michel Vauclin 327

APLICACION DE LA GEOESTADISTICA EN EL ANALISIS DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA SATURADA  
José Muñoz P. - Michel Vauclin 343

INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN CRECIDAS DE CUENCAS NIVOPLUVIALES  
Francisco Verni M - Catalina Bobenrieth M. 355



## HIDROLOGIA



## VIII CONGRESO NACIONAL DE INGENIERIA HIDRAULICA

ANALISIS DEL ALUVION DE MAYO DE 1985 DEL RIO MANFLAS  
CUENCA DEL RIO COPIAPO

HUMBERTO PEÑA TORREALBA (1)

FERNANDO ESCOBAR CACERES (1)

## RESUMEN

En el presente trabajo se entregan los resultados de las investigaciones desarrolladas en relación al aluvión observado en el río Manflas, cuenca del río Copiapó, el 14 de Mayo de 1985. Los antecedentes analizados permitieron establecer que la causa del fenómeno se encontraba en el almacenamiento de agua líquida en forma de un lago subglacial, en el glaciar del río Seco de los Tronquitos, el cual sufrió la ruptura violenta de una de sus paredes. En el trabajo se discute la forma en que se pudo producir la acumulación del agua líquida y su posterior vaciamiento. Además, se estudia la propagación del caudal máximo a lo largo del trayecto del aluvión. El volumen total del aluvión se estimó en  $5 \text{ Hm}^3$ , su caudal máximo a la salida del glaciar en  $11.000 \text{ m}^3/\text{s}$  y después de  $83 \text{ Km}$  de recorrido en  $1.100 \text{ m}^3/\text{s}$ .

(1) Ingeniero Civil. Dirección General de Aguas. M.O.P.

## 1.- INTRODUCCION

El día 14 de Mayo de 1985 ingresó sorpresivamente al embalse Lautaro, sobre el río Copiapó, un aluvión de gran magnitud, arrastrando considerables cantidades de piedras, lodo y restos de vegetación. Su volumen, incluyendo sólidos, se estimó en 5.0 Hm<sup>3</sup>. En el lapso de 3 horas ingresaron al embalse 3.2 Hm<sup>3</sup>. Afortunadamente el embalse Lautaro tenía en ese instante suficiente capacidad disponible, de modo que se pudo evitar una catástrofe hacia aguas abajo.

Debido a la magnitud del caudal y al grave riesgo que significaría para el valle del río Copiapó la repetición de un evento de esa naturaleza, la Dirección General de Aguas organizó varias expediciones a la zona con el propósito de identificar las causas del fenómeno y prevenir su ocurrencia en el futuro. La investigación se centró fundamentalmente en 2 objetivos:

- Determinar la forma de generación del aluvión, el cual se comprobó que estaba asociado al vaciamiento violento de un volumen de agua líquida almacenado en el glaciar del río Seco de los Tronquitos, en el nacimiento del río Manflas, aproximadamente a 5200 msnm.
- Estudiar la propagación de la crecida, desde el glaciar hasta el embalse Lautaro.

En el presente trabajo se entregan los resultados de dichas investigaciones, con el propósito de destacar algunas características de estos fenómenos y su importancia para el diseño de las obras hidráulicas que exigen una elevada seguridad.

## 2.- ANTECEDENTES Y MEDICIONES DE TERRENO

Para identificar el posible origen del aluvión se analizaron mapas IGM escala 1: 50.000, fotografías aéreas e imágenes satelitarias anteriores y posteriores a su ocurrencia. Además se realizó una expedición en diciembre de 1985 hasta el lugar de origen y un sobrevuelo en septiembre de 1986. Con los antecedentes obtenidos se efectuó una campaña de terreno de mes

y medio de duración, durante marzo/abril de 1987.

Durante esta campaña de terreno, se hizo una inspección detallada del glaciar del río Seco de los Tronquitos, en especial en la zona de acumulación de agua líquida y de su posterior vaciamiento. Además se realizó un mapa topográfico del glaciar, el cual permitió calcular la curva de capacidad del posible lago subglacial, las dimensiones de la laguna actual y de la zona de ruptura, y las características del canal de descarga. Por un lapso de 10 días se efectuaron diversas mediciones glaciológicas e hidro meteorológicas tales como mediciones de temperatura y humedad del aire, de temperatura del hielo, de temperatura del agua, de derretimiento, de caudales y otros.

En el cauce del río Manflas, una vez hecha una inspección completa, se seleccionaron 8 lugares para la determinación del caudal máximo por métodos indirectos. En esos sectores se midieron en forma detallada las trazas de las crecidas, calculándose posteriormente la sección de escurrimiento, pendientes, desniveles en curvas, etc. Se obtuvieron además fotografías y muestras de los sedimentos dejados por la crecida al inundar terrenos laterales. La longitud de los tramos analizados fluctuó entre 200 y 1000 m, dependiendo de las condiciones del cauce y del escurrimiento. Conviene advertir que, las pendientes de estos tramos resultaron siempre con valores algo inferiores a la pendiente media del cauce en tramos largos, debido a la necesidad de elegir tramos de condiciones relativamente uniformes.

## 3.- ORIGEN Y GENERACION DEL ALUVION

La investigación de terreno demostró inequívocamente que el origen del aluvión se encontraba a 105 Km del embalse Lautaro, siguiendo el curso del río Manflas, en un glaciar ubicado en el nacimiento del río Seco de los Tronquitos, en los 28° 33' Lat. S. y 69° 43' Lon. W, a 5200 msnm. (Fig. 1).

El glaciar del río Seco de los Tronquitos, tiene una superficie de 1,7 Km<sup>2</sup> extendida entre los 5100 y los 5600 msnm. Se orienta de noreste a suroeste, y en su frente escurre ocasionalmente un pequeño curso de agua



que se dirige hacia el oeste. En la fecha de la visita al glaciar (marzo de 1987), se podía observar en el hielo la existencia de un gran anfiteatro, de paredes abruptas de unos 70 m de altura en promedio y que al nivel de su borde superior cubría un área de 8,5 há. En la base de este anfiteatro existía una laguna helada de 20 m de profundidad en su centro, cubierta por un espesor de hielo de 0,60 m. Hacia el borde sur del anfiteatro se observaba una discontinuidad, con la presencia de un portezuelo de sección aproximadamente rectangular, de unos 70 m de ancho y con un umbral ubicado a 20 m del nivel de la laguna helada y a unos 40 m bajo el borde superior. A continuación del portezuelo se apreciaba la existencia de un gran canal excavado entre la ladera del cerro y el hielo, de dirección transversal al portezuelo, con signos evidentes de haber permitido el escurrimiento de una gran masa de agua. El volumen limitado por el anfiteatro descrito, más el correspondiente a la laguna helada, alcanzaba un total de 4 Hm<sup>3</sup>, valor que resulta compatible con el registrado en el embalse Lautaro, si se considera la incorporación de sólidos y agua (almacenada en vegas existentes en el cauce del río) a lo largo del trayecto de 105 Km entre ambos puntos. (Fig. 2 y 3).

La existencia de numerosos glaciares en la cuenca del río Copiapó constituye en cierta medida una anomalía, ya que el número de glaciares disminuye hacia el sur, tendencia que solo se revierte en la cuenca del río Aconcagua (Garín, 1987). Este hecho se puede explicar por la gran elevación de la Cordillera, cierta influencia del invierno altiplánico y las temperaturas extraordinariamente bajas que se observan como consecuencia de las importantes pérdidas de calor por radiación de onda larga que provocan los cielos especialmente claros y el aire seco de la zona. De este modo, la escasa precipitación se compensa con las bajísimas tasas de ablación, permitiendo en lugares donde las condiciones topográficas favorecen la acumulación de la nieve arrastrada por el viento, la formación de glaciares. De acuerdo con lo anterior, estos glaciares son fríos (la temperatura medida en el glaciar del río Seco de los Tronquitos fue -9,0° C) y de muy pequeña actividad, estimándose que el movimiento de la masa de hielo es extraordinariamente lento.

En las condiciones descritas, es muy difícil la formación de un anfiteatro como el observado y el almacenamiento de un volumen de agua líquida

de la magnitud de la crecida. Sin embargo, a este respecto se ha podido establecer los siguientes hechos:

- Sin lugar a dudas, el proceso de formación de la acumulación de agua debe haber tomado varios años (más de 3 años) ya que el rendimiento de la cuenca aportante (aprox. 3 Km<sup>2</sup>) es mínimo. Esta conclusión se basa en el escaso caudal aforado en los meses de verano (diciembre y marzo) a la salida del glaciar, y en los antecedentes aportados por el balance hídrico de la zona.
- Para evitar el congelamiento de la masa de agua, el almacenamiento debió efectuarse de manera aislada del medio exterior, en forma de un lago subglacial. Esta circunstancia explicaría el hecho de que no hubiera sido posible detectarlo en imágenes satelitarias.
- La energía requerida para fundir el hielo y formar la caverna subglacial debió ser proporcionada directamente por la temperatura del agua que la alimentaba. Ello habría sido posible por los aportes de deshielos de las laderas, las cuales al escurrir por las rocas pudieron aumentar su temperatura en algunos grados. Este mecanismo exige que la circulación del agua en el lago en formación no se haya interrumpido. Otra posible explicación, de la cual no existe ningún antecedente, sería la existencia de actividad geotérmica en la base del glaciar.

En la Fig. 4 se muestra un esquema del posible desarrollo del fenómeno. Un segundo aspecto que interesa dilucidar es la forma de vaciamiento del lago subglacial. A este respecto se analizaron 2 explicaciones alternativas de generación de la crecida:

- Por un vaciamiento debido al ensanche de un conducto inicial de drenaje, causado por la transferencia de calor desde el líquido, de dinámica similar a la propuesta en distintos estudios (Nye, 1976; Clarke, 1982; Peña, 1985). Sin embargo, la evaluación de los caudales que se habrían generado mediante este tipo de fenómeno, utilizando expresiones matemáticas simples (Peña, inédito),

entrega valores de un orden de magnitud inferior al estimado ( $< 500 \text{ m}^3/\text{s}$ ) razón por la que se concluye que esta interpretación no es factible.

- Por falla violenta de una de las paredes del lago subglacial. Este tipo de fenómeno ha sido documentado en el caso de la ruptura del lago intraglacial del glaciar de Tête-Rousse el 12 de Julio de 1892, en los Alpes franceses (Lliboutry, 1964). Contrariamente al aspecto que muestra el glaciar en la actualidad (marzo/87), se estima que la zona de ruptura debió estar en la base de la pared del actual portezuelo y no en su parte superior. Ello, por el aumento de la presión en profundidad y además porque las temperaturas en el lago son crecientes con la profundidad hasta los  $4^\circ \text{C}$  (por las características de la densidad del agua), lo que debería haber producido una mayor presión en la base. Después de la ruptura se debió producir el hundimiento de la pared para formar el actual portezuelo. De acuerdo a lo anterior, el posible proceso de vaciamiento se ilustra en los esquemas de la Fig. 4.

Con el propósito de verificar la factibilidad física de esta interpretación, se estimó el caudal máximo en dos situaciones: asimilándolo al caso de un orificio abierto en el fondo y aplicando la expresión teórica de Ritter que entrega el caudal generado por la ruptura violenta de una presa. En ambos casos se pudo comprobar que con aproximadamente la quinta parte de la sección que deja libre el actual portezuelo, se obtiene un caudal del orden del estimado en ese lugar en base a las trazas ( $11.000 \text{ m}^3/\text{s}$ ).

#### 4. PROPAGACION DE LA ONDA DE CRECIDA

El trayecto del aluvión se realizó por un cauce en general sinuoso y bastante encajonado, alcanzando la zona de inundación anchos superficiales del orden 100-150 m. La pendiente media es muy pronunciada, con un valor de 15% para los primeros 10 Km. correspondiente al río Seco de los Tronquitos, estabilizándose hacia aguas abajo entre un 3 y un 4%, hasta la junta con los ríos Jorquera y Pulido (Fig. 5). La violencia de la crecida modificó en sectores

el paisaje del valle del río Manflas, arrastrando grandes cantidades de arbustos, materiales de derrumbe y zonas enteras de vegas. En especial se observa que el cambio de pendiente en el cauce, en la confluencia del río Seco de los Tronquitos con el río Manflas, produjo una desaceleración del escurrimiento y el depósito de grandes cantidades de bolones.

Para la evaluación del caudal máximo de la crecida en distintos puntos, se intentó el uso de los siguientes métodos:

- Método área-pendiente; de acuerdo a las recomendaciones del US Geological Survey (1964). Para aplicar este procedimiento además de las hipótesis habituales se ha debido suponer que la duración del caudal máximo fue suficiente para que las trazas reflejen una condición de escurrimiento permanente. En base a las características de los tramos, los coeficientes de Manning se estimaron en valores comprendidos entre 0,04 y 0,05.
- Cálculo en secciones con escurrimiento crítico. Este procedimiento se pudo aplicar a la salida del glaciar, donde existe un cambio de dirección en  $90^\circ$ , seguido por un lecho natural de pendiente igual al 17%.
- Cálculo de la velocidad en curvas en base a la diferencia de elevación entre ambas orillas, aplicando la expresión:

$$v = \sqrt{\frac{g \cdot h \cdot r_c}{b}}$$

con:  $h$  : sobreelevación  $r_c$  : radio de curvatura  
 $g$  : aceleración de gravedad;  $b$  : ancho

Se intentó emplear este último método en el kilómetro 9,5 (Qda. del río Seco de los Tronquitos), como forma de verificar el resultado obtenido en ese lugar por el método área-pendiente. Sin embargo, aunque los valores deducidos fueron coincidentes, se aprecia que el margen de error del cálculo es muy grande.

De acuerdo a los procedimientos descritos y con los datos obtenidos en las campañas de terreno, se determinó el caudal máximo y crítico, la ve



locidad media, el número de Froude y las características geométricas de cauce en 8 secciones del río, información que se entrega en la tabla 1. En dicha tabla también se incluye el tiempo base del hidrograma, el cual fué estimado suponiendo un volumen fijo para el aluvión igual a  $5 \text{ Hm}^3$  y un hidrograma triangular. Con esta información se representa en las figuras 5 y 6 el perfil longitudinal del río y la evolución del caudal máximo y crítico, y de la velocidad media. La propagación de la onda de crecida se presenta en la figura 7, considerando para los efectos del dibujo una rama ascendente de  $1/3$  del tiempo base.

En relación a la forma de la onda de crecida y a la hipótesis de un hidrograma triangular, cabe advertir que la apreciación cualitativa de los testigos (D'Etigny, 1985), hace suponer que la rama ascendente y el tramo superior de la rama descendente fueron tan violentos como los que entrega un hidrograma triangular, sin embargo el tramo inferior de la recesión fué considerablemente más lento, con una duración del orden de 24 horas.

De estos antecedentes, es conveniente destacar los siguientes aspectos:

- El caudal al pie del glaciar alcanza valores extraordinariamente elevados ( $11.000 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Sin embargo, en los primeros 15 Km se amortigua rápidamente hasta alcanzar aproximadamente un 30% del gasto inicial. Es importante observar que gran parte de esta disminución se presenta inmediatamente aguas abajo de la confluencia del río Seco de los Tronquitos y el río Manflas, en un tramo en el cual las características del cauce, en especial su pendiente, se modifican sustancialmente. Hacia aguas abajo la disminución es más lenta, llegando el caudal a un valor del orden del 10% en los siguientes 70 Km (Hacienda Manflas).
- En los tramos iniciales, de gran pendiente y gasto, el régimen es supercrítico con números de Froude superiores a 2, aproximadamente luego el escurrimiento a las condiciones críticas.
- La velocidad estimada para los primeros kilómetros alcanza a  $12 \text{ m/s}$ , desciende a valores entre 5 y  $7 \text{ m/s}$  en la mayor parte

del recorrido por el río Manflas y en el punto más bajo seleccionado llega a  $4,1 \text{ m/s}$ . Conviene destacar que estos valores son compatibles con la velocidad calculada por D'Etigny (1985) a partir del tiempo empleado por el aluvión en recorrer un tramo de 41 Kms entre el punto denominado El Salto del Toro y las casas de la Hacienda Manflas, la cual fue de  $4,6 \text{ m/s}$  (Ver fig. 6).

- Adoptando un hidrograma triangular, como se señaló anteriormente, el tiempo base al pie de la presa es tan breve como 15 min, pasando a un valor del orden de 3 horas a 83 km hacia aguas abajo. Esta estimación es compatible con lo registrado en el embalse Lautaro, a 22 Km del punto anterior, donde una parte sustancial de la crecida se almacenó en un lapso de 3 horas.
- Es interesante destacar la buena concordancia entre los resultados obtenidos, con la sola excepción de la estimación efectuada en El Varillar (Km 34,0) la cual entrega un caudal algo bajo. El análisis de los antecedentes de terreno y de los datos parciales acerca del fenómeno que ha sido posible recolectar de diversas fuentes, induce a pensar, en opinión de los autores, que posiblemente los errores son menores del 20% y en ningún caso mayores de un 30%.

## 5. CONCLUSIONES

En los párrafos anteriores se ha entregado las características del aluvión del río Manflas, en lo relativo a su origen, generación y propagación. De esos antecedentes se desprende la necesidad de mantener una vigilancia periódica de la acumulación de agua en el glaciar del río Seco de los Tronquitos, en especial para definir la operación del embalse Lautaro. Como conclusiones generales de la investigación se pueden señalar las siguientes:

- La existencia de glaciares en el curso superior de un río significa un riesgo potencial, que debiera ser considerado en el desarrollo de los valles y en especial en el diseño de aquellas obras hidráulicas que exigen un elevado grado de seguridad.

- Las situaciones que pueden producir un aluvión como el analizado son variadas y en general de difícil detección, siendo extraordinariamente peligrosas por la magnitud y el carácter sorpresivo de los caudales resultantes.
- Con campañas adecuadas de terreno, es posible deducir a posteriori las características principales de estos fenómenos, en base a las marcas que dejan en el cauce. Este hecho tiene una considerable importancia, ya que permite acumular elementos de análisis para situaciones análogas que pudieran presentarse en el futuro.

## 6. RECONOCIMIENTO

Esta investigación ha sido desarrollada dentro de los programas habituales del Departamento de Hidrología de la Dirección General de Aguas. Los autores quieren dejar constancia de su reconocimiento a los funcionarios de la Sección de Nivometría de la Dirección General de Aguas, por la abnegada labor de terreno que la hicieron posible.

## BIBLIOGRAFIA

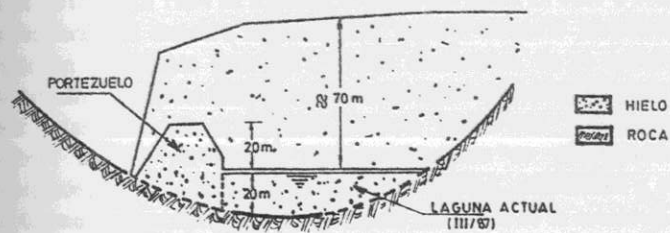
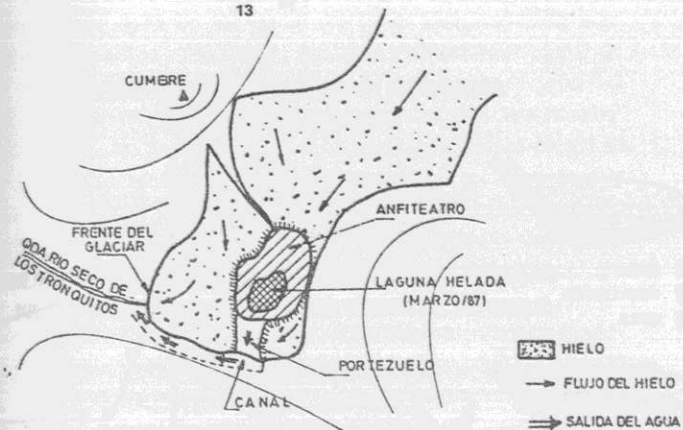
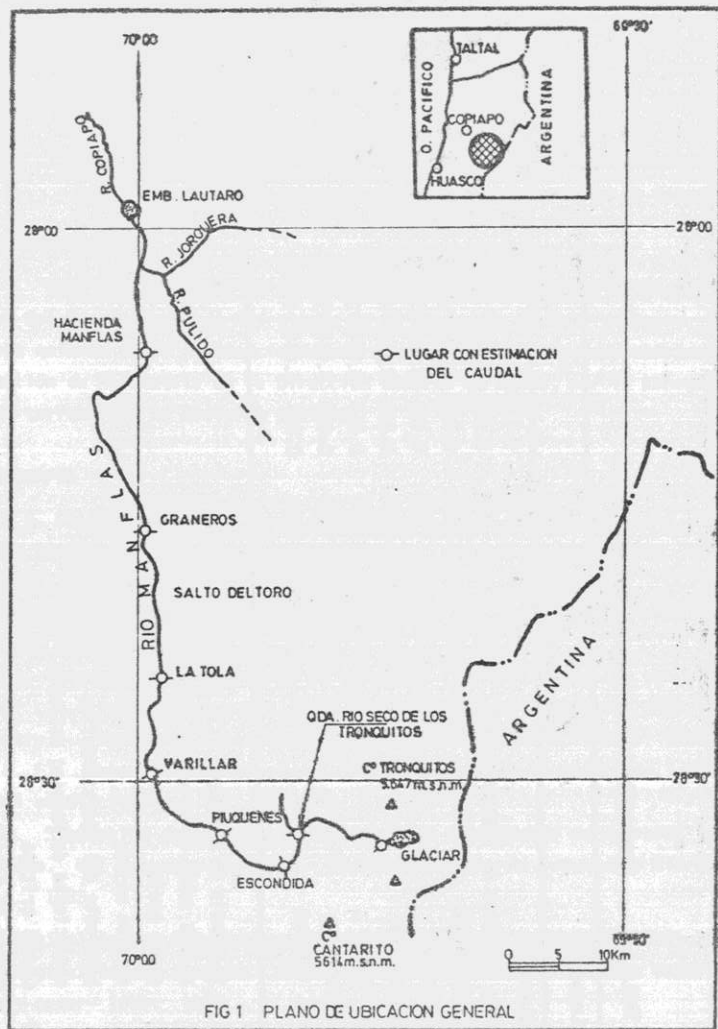
- Clarke G. Glacier outburst floods from "Hazard Lake", Yukon Territory, and the problem of flood magnitude prediction. *Journal of Glaciology*, Vol. 28 N° 98, 1982.
- D'Etigny. Análisis del aluvión del río Manflas del 14 de Mayo de 1985. Informe inédito. 1985.
- Garín C. Inventario de Glaciares de los Andes Chilenos desde los 18° a los 32° L.S. Publ. Interna E.H. 86/5. Dirección Gral. de Aguas. 1986.
- Lliboutry L. *Traité de Glaciologie*. Masson Cie. Editeurs. Paris 1964.
- Nye J. F. Water flow in glaciers: Jokulhlaups, tunnels and reins. *Journal of Glaciology*. Vol. 17, 1976.
- Peña H. Simulación de crecidas producidas por vaciamiento de represas de hielo. VII Congreso Nacional. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. 1985.
- US Geological Survey Computation of Peak Discharge by Indirect Methods. 1964
- US Geological Survey Roughness Characteristics of Natural Channels Water Supply paper- 1849. 1967.

TABLA 1 Propagación de la Onda de Crecida

Lugar	D (Km)	H (msnm)	b (m)	A (m <sup>2</sup> )	i	n	Qc (m <sup>3</sup> /s)	F	V (m/s)	Q (m <sup>3</sup> /s)	T (min)
Glaciar	0	5.200	74	900	0.170	-	11.000	1.0	12	11.000	15
Qda. río Seco d. Tronquitos	9.5	3.800	331	724	0.080	0.050	3.200	2.1	10	7.000	24
La Escondida	14.5	3.580	173	541	0.020	0.045	3.000	1.1	6.2	3.400	50
Piuquenes	21.0	3.430	148	380	0.021	0.040	2.100	1.4	7.2	2.700	61
El Varillar	34.0	3.010	147	348	0.016	0.040	1.700	1.1	5.3	1.900	90
La Tola	44.0	2.750	91	300	0.015	0.040	1.700	1.2	6.9	2.100	81
Graneros	58.0	2.330	94	265	0.025	0.040	1.400	1.4	7.2	1.900	88
Hda. Manflas	83.0	1.480	164	271	0.020	0.040	1.100	1.0	4.1	1.100	152

- D : Distancia al glaciar  
 H : altura sobre el nivel del mar  
 b : ancho medio  
 A : sección mojada  
 i : pendiente del eje hidráulico  
 n : coeficiente de Manning estimado  
 Qc : caudal crítico  
 F : número de Froude  
 V : velocidad media  
 Q : caudal  
 T : tiempo base del hidrograma







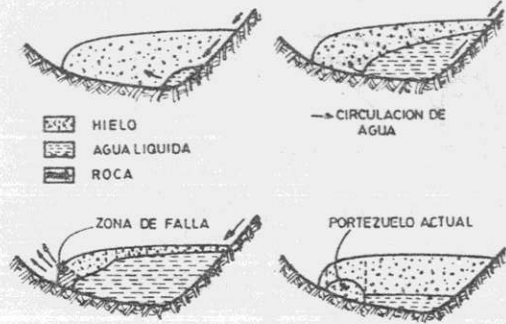


FIG. 4 REPRESENTACION ESQUEMATICA DE LA GENERACION DEL ALUVION.

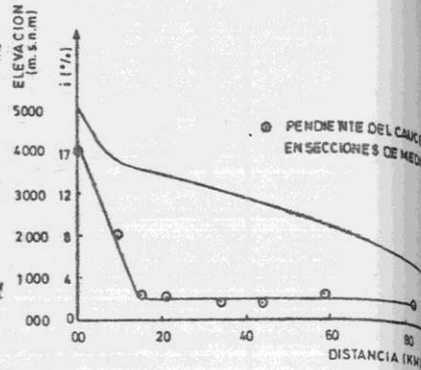


FIG. 5 PERFIL LONGITUDINAL DEL CAUCE

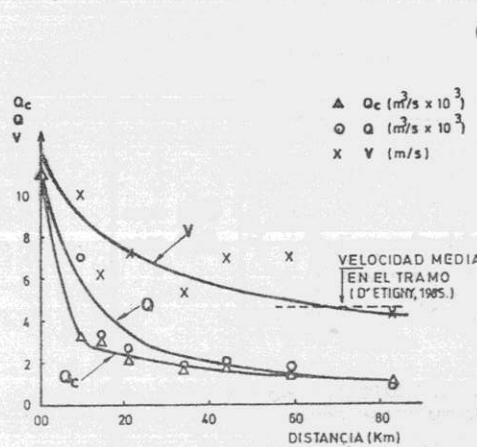


FIG. 6 EVOLUCION DEL CAUDAL MAXIMO, CRITICO Y DE LA VELOCIDAD, EN FUNCION DE LA DISTANCIA AL GLACIAR

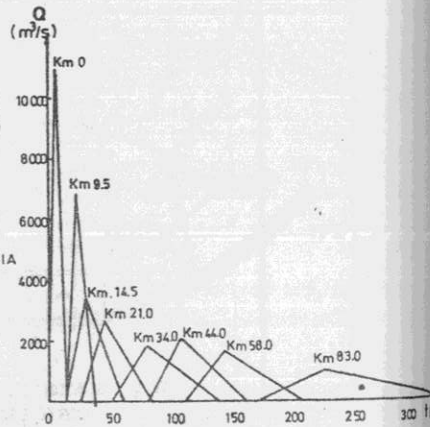


FIG. 7 PROPAGACION DE LA ONDA DE CRECIDA, ASUMIENDO HIDROGRAMAS TRIANGULARES

IDENTIFICACION Y CARACTERIZACION DE SEQUIAS  
METEOROLOGICAS EN LA ZONA CENTRAL DE CHILE

BONIFACIO FERNANDEZ LARRAÑAGA (1)  
HERNAN VELASQUEZ MAST (2)

RESUMEN

Se presenta un análisis estadístico de las sequías meteorológicas en la zona central de Chile comprendida entre La Serena y Puerto Montt. El estudio está basado en las series de precipitaciones anuales registradas desde 1915 hasta 1984 en 87 estaciones de la región. En base a ellas se confeccionó una muestra bidimensional espacio-temporal dividiendo la región en 43 franjas para los 70 años disponibles. En el estudio se identifican las sequías históricas para diferentes niveles de demanda y se pone énfasis en sus propiedades espacio temporales. Finalmente se estiman algunos parámetros de las funciones de distribución de propiedades como la duración, extensión, magnitud, intensidad y otras. Por último se plantean algunas propiedades conjuntas de la extensión y la duración de las sequías en la zona.

(1) Ing. Civil Ph.D., Prof. Adj., Esc. de Ing. Universidad Católica de Chile.  
(2) Ingeniero Civil, Universidad Católica de Chile.