
ANALES

DEL INSTITUTO DE INGENIEROS DE CHILE

SAN MARTIN 352

— CASILLA 487

— SANTIAGO

Sucesor

De la:

Y del:

«SOCIEDAD DE INGENIERIA» «INSTITUTO DE INGENIEROS»
Fundada el 31 de mayo de 1888 Fundado el 28 de octubre de 1888

Con Personalidad Jurídica desde el 28 de diciembre de 1900

Adherido a la USAI y a la CONFERENCIA MUNDIAL DE LA ENERGIA

AÑO LXV

● MARZO - ABRIL DE 1952 ●

N.ºs 3 - 4

Comisión Editora: Raúl Sáez S. (Pde.), Arturo Quintana, Jorge del Río, Fernando Salas y Sansón Radical.

Estimación indirecta de creces

Con el fin primordial de conocer el régimen de los ríos, existen Oficinas que mantiene un servicio hidrométrico, encargado de llevar la estadística de caudales de las corrientes naturales en puntos convenientemente elegidos, de manera que pueda servir de base al estudio de una obra de riego, de una central hidroeléctrica, etc. Con este objeto se eligen en las principales corrientes secciones que presenten condiciones favorables para la ejecución de aforos, se hacen los arreglos que sea necesario, se instala un limnómetro o limnígrafo, o ambos a la vez, y se les controla en forma sistemática.

El control de la corriente consiste en registrar diariamente la altura de agua y en realizar periódicamente aforos. Los aforos se llevan conjuntamente con las alturas de agua a un gráfico, lo que permite dibujar la curva del gasto Q en función del nivel de agua h , comúnmente denominada «curva de descarga». Con esta curva y el registro de los niveles de agua, se obtiene el valor diario del gasto.

Ocurre que en épocas de crecida del río es materialmente imposible efectuar aforos, debido a las fuertes velocidades, a elevación exagerada del nivel de aguas, que puede alcanzar al nivel del puente o instalación de medida, al acarreo de troncos, etc., que a veces ni siquiera permiten tomar velocidades superficiales. Además, suele ocurrir que la crece es muy rápida (ríos del Norte Chico, por ejemplo), y que el operador llega al lugar del aforo cuando el peak ha pasado. De esta manera, la curva de descarga, por no contar con aforos para los niveles altos, no queda definida en su parte superior, debiéndose recurrir a la incierta extrapolación de la curva para obtener los valores de la crece. Los gastos altos resultan así afectados de grandes errores, que a su vez influyen en el valor del gasto medio mensual.

El presente estudio tiene por objeto exponer un nuevo método que ha sido empleado para determinar el caudal en crece de una corriente.

En su aplicación es necesario efectuar trabajos de terreno y de gabinete. El primero consiste en un levantamiento de la sección transversal del lecho ocupado por las aguas máximas, lo que puede hacerse tan pronto como ellas hayan descendido a un nivel que permita sondear sin dificultad, habiéndose tomado previamente la altura de agua en la crece o utilizando las huellas dejadas en ambas riberas por las aguas máximas (en las estaciones hidrométricas no se requiere este trabajo previo, pues se tiene un perfil de la sección).

De esta manera, conocida la sección, la determinación del gasto se reduce al cálculo de la velocidad. Este se hace por la fórmula de Chézy: $U = C \sqrt{RI}$, en que U es la velocidad media de la corriente expresada en m/seg; C el coeficiente que engloba las características de la sección (rugosidad, forma) y que algunos autores hacen depender también de la pendiente; R el radio hidráulico e I la pendiente del eje hidráulico.

Al examinar la fórmula, se observa que de los factores que en ella intervienen es conocido R , por conocerse la sección. Sólo falta conocer C e I , cuya determinación no se hace en forma individual sino en conjunto y en forma del coeficiente $C \sqrt{I}$.

Para ello, este método se vale de una base experimental, aprovechando los aforos efectuados en aguas normales (entendiéndose por tales a los niveles de agua que hacen posible la ejecución de aforos). El gasto de la corriente queda definido por la ecuación $Q = C \Omega \sqrt{RI}$; como se conocen Q , Ω y R se puede despejar $C \sqrt{I}$. Para cada aforo efectuado se calcula esta expresión, obteniéndose una serie de valores que llevados a un gráfico junto con las alturas respectivas permite dibujar la curva $C \sqrt{I}$ en función de h .

El valor $C \sqrt{I}$ correspondiente a la altura máxima registrada en la crece, se obtiene por extrapolación de la curva. Con este valor de $C \sqrt{I}$ y la sección se determina el gasto. Procediendo así, se reduce notablemente el error debido a la extrapolación, ya que no se está extrapolando el gasto como sucede al operar directamente con la curva de descarga, sino uno de los factores que en él intervienen. En efecto, en la fórmula del gasto $Q = C \Omega \sqrt{RI}$ se conoce por medición directa de la sección del factor preponderante $\Omega \sqrt{R}$, y sólo el factor $C \sqrt{I}$ es obtenido por extrapolación.

Como el valor de I es aproximadamente igual a la pendiente media del terreno, permanece más o menos constante cuando h varía, y no significa causa de error. En cuanto a C , éste crece con h , y aquí se tiene la única extrapolación real en este método. Sin embargo, como los valores de C —o de $C \sqrt{I}$ — se obtuvieron de medidas efectuadas en la misma sección, es evidente que los aforos llevaban implícito el verdadero valor de C , sin que nos interese conocer el de n (coeficiente de rugosidad). Como los ríos chilenos son encajonados, no es de temer una variación brusca del valor de C al crecer h .

Examinemos ahora el método denominado Area-Pendiente («slope area method») empleado en los Estados Unidos por el U. S. Geological Survey para la estimación de las creces. Consiste en lo siguiente: Una vez que las aguas máximas han descendido lo suficiente, se hace un levantamiento de la sección transversal que ocupó la crece; en seguida se estacan en ambas riberas las huellas que hayan dejado las aguas máximas.

Se nivelan estos estacados y se dibujan los perfiles longitudinales, que permiten conocer la pendiente media del terreno, y se acepta que la del eje hidráulico en ese tramo sea igual a ésta. Con el dato de la sección Ω y la pendiente media del eje hidráulico I , se calcula el gasto de la crece mediante la fórmula $Q = C \Omega \sqrt{R I}$, en la que el coeficiente C se determina teóricamente, eligiendo una determinada rugosidad n para el lecho de la corriente. La fuente de error de este método estriba principalmente en la elección del n adecuado, que es el factor de mayor influencia en el coeficiente C , cuya determinación resulta así muy incierta. Es posible que con una cuidadosa y atinada elección del n se tenga un gasto que se aproxime al real.

Si se comparan ambos métodos se verá que el descrito en el presente artículo se basa en medidas directas y debe ser más exacto que el método Area-Pendiente, puesto que el factor $C \sqrt{I}$, si bien se determina por extrapolación, se hace sobre una base empírica, ya que los valores que definen la curva $C \sqrt{I} - h$ son experimentales.

En el método área-pendiente, se parte de una base teórica, al suponer un n para la determinación del coeficiente C , que comparado con el factor $C \sqrt{I}$ utilizado en el nuevo método, es de una importancia relativa mucho mayor, siendo el factor de importancia justamente $1/\sqrt{I}$ (mayor que la unidad). De esta manera, el error que se comete en C al suponer un n , debe tener una influencia mayor en la obtención del gasto que la debida al error que se comete en la extrapolación del factor $C \sqrt{I}$ con el mismo objeto.

Sin embargo, la utilización en los EE. UU. del método área-pendiente es perfectamente explicable. En efecto, como las pendientes de los ríos son en ese país mucho menores que en el nuestro, al producirse una crece el agua pasa a ocupar un cauce que no es el habitual («overflow channels») y el coeficiente C sufre un cambio brusco. Debido a ello, es frecuente que para calcular el gasto se divida el río en tres partes: su cauce habitual y ambas orillas (si el agua se salió hacia ambos lados) y se fija un n y un C distintos para cada zona de acuerdo a las características del terreno, y se toma en cuenta, además, la influencia de la altura de velocidad, $U^2/2g$. En esas condiciones, nuestro método no sería aplicable.

A continuación se ilustrará con un ejemplo la forma de aplicación del método propuesto.

Se ha elegido un caso real, en la estación hidrométrica del río Claro, en Camarico (Talca), que está bien controlada y que presenta buenas características para la ejecución de los aforos.

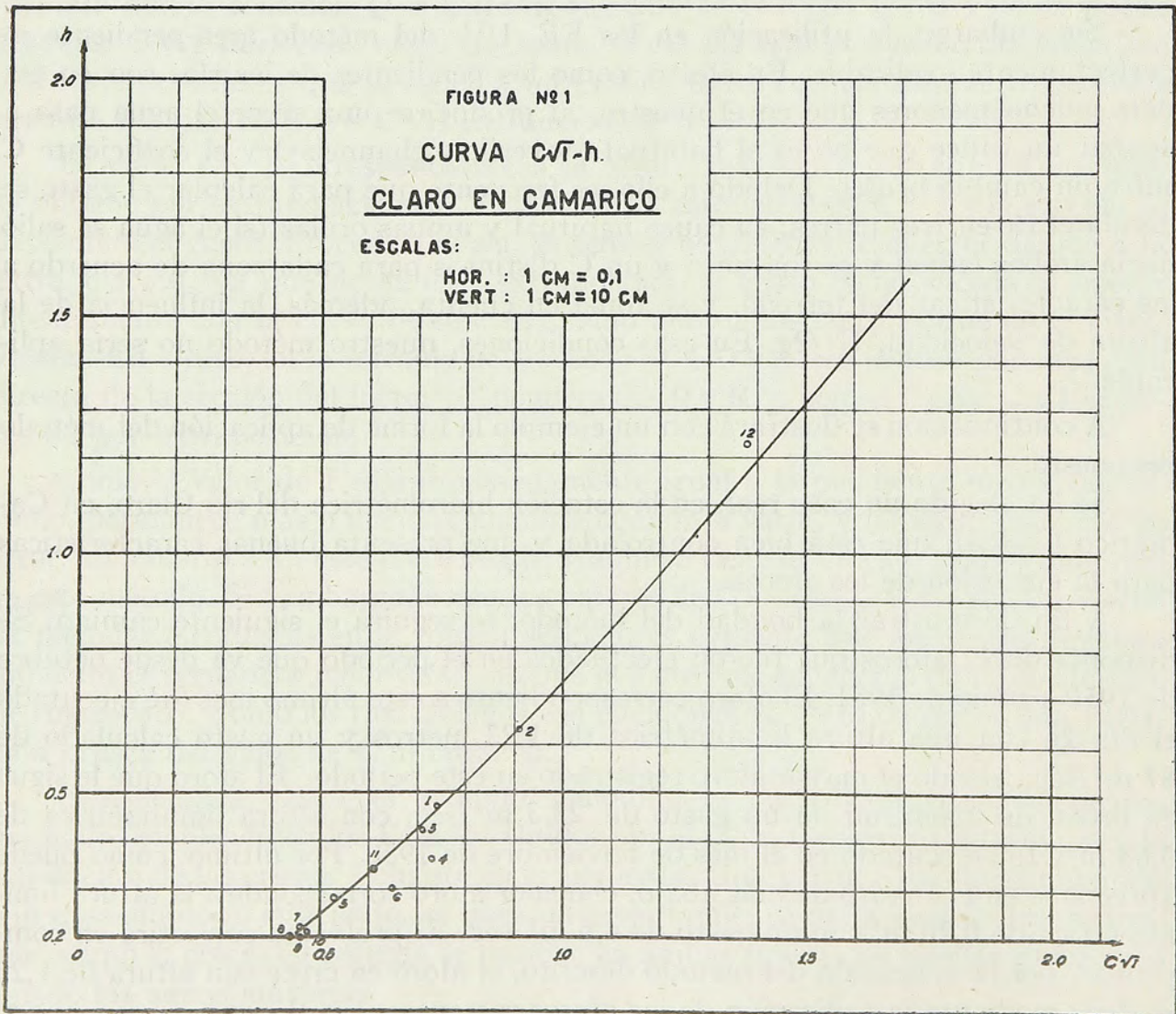
A fin de mostrar la bondad del método, se seguirá el siguiente camino: Se disponía de 12 aforos que fueron efectuados en el período que va desde octubre de 1950 a junio de 1951. El aforo correspondiente a este último mes fué ejecutado el día 24 con una altura limnimétrica de 1,23 metros y un gasto calculado de $87 \text{ m}^3/\text{seg}$, siendo el mayor aforo registrado en este período. El aforo que le sigue en orden de magnitud da un gasto de $25,3 \text{ m}^3/\text{seg}$, con altura limnimétrica de 0,63 m y fué ejecutado en el mes de noviembre de 1950. Por último, como puede apreciarse en el cuadro de más abajo, el menor aforo corresponde a la altura limnimétrica de 0,20 m, con un gasto de $4,6 \text{ m}^3/\text{seg}$. El problema consistirá en comprobar, por la aplicación del método descrito, el aforo en crece con altura de 1,23 metros mediante la utilización de los aforos restantes. En el cuadro que sigue se

han consignado los aforos y los valores de la expresión $C\sqrt{I}$, como asimismo la sección y el perímetro mojado que han servido para el cálculo (los $C\sqrt{I}$, fueron calculados a partir del gasto).

RIO CLARO EN CAMARICO

Valores de $C\sqrt{I}$

N.º	FECHA	h	Q	Ω	X	R	$C\sqrt{I}$
		(m)	m ³ /seg.	m ²	(m)	(m)	
1	7-10-50	0,47	14,8	25,3	40,7	0,62	0,74
2	17-11-50	0,63	25,3	31,7	41	0,77	0,91
3	18-12-50	0,42	12,4	23,3	40,5	0,57	0,71
4	22-12-50	0,36	8,6	16,2	30,8	0,53	0,73
5	21-1-51	0,28	7	18	33,1	0,54	0,53
6	23-1-51	0,30	10,2	21,6	40,4	0,54	0,65
7	4-3-51	0,22	5,3	16,8	35,9	0,47	0,46
8	10-3-51	0,20	4,6	16,2	38,3	0,42	0,44
9	9-4-51	0,20	5,2	17,2	38,8	0,44	0,46
10	28-4-51	0,21	5,4	17	35,8	0,47	0,47
11	17-5-51	0,34	9	20,7	40,3	0,51	0,61
12	24-6-51	1,23	87,4	55,7	43	1,29	1,38



Los valores resultantes de \sqrt{I} se llevaron junto con las alturas al gráfico de la figura 1. Pero al momento de extrapolar la curva se hizo aparente la necesidad de conocer a priori la forma de ésta, es decir, hacia qué lado tiene la curvatura. Para ello se eligió una estación hidrométrica con un buen número de aforos que permitiera dibujar, sin extrapolación, la curva $C\sqrt{I}$ en función de h . Se eligió la estación de Perquilauquén, en San Manuel (también de la hoya del Maule). La curva trazada puede verse en la figura 2. Resultó convexa hacia el eje de las X. La irregularidad que se observa en los puntos de la figura se explica si se considera que los aforos se efectuaron a lo largo de dos años y que la sección suele cambiar a través del tiempo.

Si se hace esta determinación para un canal teórico, en tierra, al cual se le determina el gasto para alturas crecientes, se llega a la misma conclusión con respecto a la forma de la curva. Se hizo el cálculo mejorando ligeramente el valor de n con la altura, y se omite aquí en mérito a la brevedad.

Una vez conocida la curvatura de la función $C\sqrt{I}$, se trazó en la figura 1 la curva que mejor representa la tendencia evidenciada por los puntos. Luego, se colocó en el gráfico el punto 12 (que corresponde al aforo alto que se trata de comprobar).

En el trazado de la curva no se tomó en cuenta los puntos 4 y 6 que están un poco por debajo de los restantes, lo que puede deberse a que los aforos correspondientes fueron ejecutados por otro operador y empleando un molinete distinto. Para la altura 1,23 m. se obtuvo de la curva para $C\sqrt{I}$, el valor 1,41, siendo el verdadero 1,38 (valor del aforo). Resultó una diferencia de sólo 2% con respecto al valor medido.

