

FACTORES HIDRULICOS Y MECANICO FLUVIALES CONDICIONANTES DEL CONTROL HIDROMETRICO EN RIOS DE MONTAÑA

Luis Ayala, Alejandro López y Paula Marín

Centro de Recursos Hidráulicos. Departamento de Ingeniería Civil
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile

RESUMEN: Basado en una investigación experimental en un modelo físico a semejanza de Froude, se estudia el comportamiento de las curvas de descarga que caracterizan un tramo de un río de montaña de la Cordillera de Los Andes. El análisis se focaliza en los efectos que sobre la pérdida de carga tiene el régimen de escurrimiento y de arrastre de sólidos en un lecho de fuerte pendiente, constituido por sedimento de granulometría gruesa y extendida que experimenta acorazamiento. A partir de lo anterior y sobre la base de una comparación con datos del prototipo, se evalúan las posibles implicancias que tienen estos factores sobre la definición de la curva de descarga y su extrapolación para condiciones de crecidas de mediano y alto período de retorno. Se concluye que el procedimiento habitualmente empleado para traducir niveles limnimétricos en caudales, en una estación fluviométrica de montaña, puede conducir a incertezas importantes en los caudales máximos de eventos hidrológicos extremos, con el consiguiente efecto indeseado sobre las curvas de frecuencia que de estos datos se deducen. Como parte del trabajo se incluye también la definición de curvas de descarga de sólidos de arrastre las cuales sirven además de referencia para el empleo de relaciones teóricas de cálculo del transporte de sedimentos en ríos de montaña.

INTRODUCCION

La necesidad de disponer de información sistemática y continua de caudales, ha llevado a establecer controles hidrométricos en ríos y esteros, lo que permite llevar un registro continuo o discreto a lo largo del tiempo de los niveles de escurrimiento en dichos cursos. Normalmente se cuenta con mediciones de caudal que permiten definir curvas de descargas representativas de caudales bajos o medianos, las que

además de servir para traducir niveles en caudales dentro de un rango similar al que abarcan dichas mediciones, suelen extrapolarse para determinar caudales mayores en base a observaciones de niveles durante crecidas. La extrapolación se torna más compleja e incierta cuando se trata de controles fluviométricos instalados en cursos cordilleranos, donde los escurrimientos se caracterizan por ser de alta energía, macrorrugosos, y con lechos de alta pendiente y sometidos a variaciones morfológicas significativas.

Artículo recibido el **11 de mayo de 1995** y aceptado para su publicación el **2 de junio de 1995**. Pueden ser remitidas discusiones sobre el artículo hasta seis meses después de la publicación del mismo. En el caso de ser aceptadas, las discusiones serán publicadas conjuntamente con la respuesta de los autores en el primer número de la revista que aparezca una vez transcurrido el plazo indicado.

OBJETIVOS DE LA INVESTIGACION

Para dar respuesta a las incertidumbres expuestas en cursos de montaña, resulta prácticamente imposible recurrir a investigaciones directas en terreno, tanto por la dificultad, riesgo y altos costos de las mediciones necesarias de realizar, como por la total inseguridad que se tendría acerca de la ocurrencia de los fenómenos que interesa estudiar.

En este trabajo se presenta un estudio experimental que aprovechando las ventajas de disponer de un modelo físico a escala, ha permitido estudiar controladamente el efecto de factores hidráulicos y mecánico fluviales, vinculados principalmente con las mayores crecidas, sobre la curva de descarga definida en una estación fluviométrica de un tramo de montaña del río Mapocho. Este río nace en la Cordillera de Los Andes, y después de atravesar la ciudad de Santiago y varias localidades ubicadas en el Valle Central, desemboca en el río Maipo, río este último que descarga sus aguas en el Océano Pacífico.

Los objetivos generales del trabajo fueron investigar el comportamiento hidráulico y mecánico fluvial del tramo en estudio, que se ve reflejado en la curva de descarga característica del control hidrométrico y en la curva de descarga de los sólidos de arrastre. Como objetivos específicos se plantearon en primer lugar, definir la condición de equilibrio sedimentológico para un caudal dado; en segundo lugar, determinar para esa condición de equilibrio una curva de descarga característica del tramo, válida también para condiciones hidrológicas extremas, a fin de compararla con aquella determinada en el prototipo a partir de los aforos practicados en él y que cubren un rango menor de caudales; y en tercer lugar, caracterizar el arrastre de sedimentos definiendo una curva de descarga de sólidos representativa de las condiciones de equilibrio sedimentológico del tramo.

ANTECEDENTES BIBLIOGRAFICOS

Los antecedentes bibliográficos que se revisaron, se relacionan con los siguientes aspectos asociados al estudio desarrollado: medición de caudales y curvas de descargas en cauces naturales e hidráulica y mecánica fluvial de ríos de montaña. Respecto del primer tema, la bibliografía revisada se centró en aquellos trabajos mayormente relacionados con el tema, es decir, trabajos que de alguna forma traten de mediciones o estimaciones de caudales en condiciones hidrológicas extremas.

Santos Cayado (1972) aborda el problema de la

predicción del nivel de la superficie libre en ríos aluviales, para caudales extremos de ocurrencia poco frecuente. Utiliza los registros fluviométricos correspondientes a los ríos Puerco, Republican, Elkhorn y Grande, todos ríos de llanura de Estados Unidos. Al analizar las curvas de descarga concluye que las variaciones del nivel del lecho influyen en un 55 a 60% en la dispersión del nivel de la superficie libre.

Cruette (1975) presenta una metodología para la estimación de caudales en grandes crecidas, que pretende superar dificultades prácticas de costos, riesgos personales y carencia de información. En general es un trabajo descriptivo, que no aporta antecedentes cuantitativos al tema específico del presente estudio.

La publicación del World Meteorological Organization (1980) es un manual que abarca diferentes aspectos del tema de hidrometría. Referente al cálculo de la relación altura-caudal, analiza los parámetros que condicionan esta relación y los diversos aspectos a considerar en la obtención y determinación de una curva de descarga. Hace mención al efecto de la formación de ondas sedimentarias, embanques y socavaciones del lecho en los registros hidrométricos, refiriéndose sólo a lechos arenosos y no a cauces torrenciales de lecho grueso y pendientes altas.

Bonacic (1983) hace presente la importancia de medir caudales en crecidas y lo valioso de tal información, pero hace notar también lo difícil y riesgoso de efectuar tales mediciones siguiendo los procedimientos de aforos convencionales. Propone algunos métodos alternativos para medir el caudal en crecidas, pero estos métodos son de casi ninguna aplicabilidad en ríos de montaña, en los cuales las crecidas extremas no posibilitan en la práctica efectuar mediciones directas del caudal.

Starosolszky (1983) plantea el problema de considerar el efecto del campo turbulento tridimensional sobre las mediciones de velocidades, destacando el hecho de que este fenómeno está asociado a ríos de lecho no estable, con problemas de arrastre de sedimento, lo que debe ser tenido en cuenta al interpretar los datos registrados en secciones de control, aunque ignora el caso de escurrimientos torrenciales.

En lo que se refiere a materias de hidráulica y mecánica fluvial éstas se analizaron desde la perspectiva de que un método alternativo para determinar caudales de crecidas, es la extrapolación de la curva de descarga apoyándose en leyes de resistencia hidráulica. En las últimas décadas el tema de la resistencia hidráulica en escurrimientos en cauces torrenciales de alta pendiente

y lechos de granulometría gruesa con tendencia al acorazamiento, ha sido tratado con bastante dedicación en diversos países, incluyendo Chile.

Jarrett (1990) ha hecho un estudio del coeficiente de rugosidad de Manning (n), basándose en datos de 21 ríos de montaña en Colorado, U.S.A., estableciendo que este parámetro varía directamente con la pendiente e inversamente con la profundidad del escurrimiento. Para similares alturas relativas (R/D_{50}), se encontró que n tiene valores más altos en cauces con pendientes fuertes que con pendiente suave. La expresión pro-puesta se aplicó al río Colorado (Estados Unidos), con pendientes entre 2% y 5.2%, recomendándose su uso para canales estables, con poca vegetación y pocas obstrucciones y radios hidráulicos entre 0.15 y 2.2 m.

Sobre la base de datos de terreno obtenidos en siete cauces perteneciente a la red de drenaje de la hoya alta del Mapocho y de los datos experimentales recogidos en un modelo escala 1:30 de un tramo del mencionado río, Ayala (1991) analizó la influencia del acorazamiento sobre la pérdida de carga en los escurrimientos en este tipo de cauces. Estableció que dicha pérdida sólo puede predecirse para caudales menores a partir de la caracterización de la coraza preformada. Analiza una ley de resistencia basada en la relación logarítmica de Keulegan. Las experiencias efectuadas en el modelo del río Mapocho y los datos de terreno del mismo río, le han llevado a sugerir como rugosidad representativa del lecho a ser utilizada en la ley de resistencia (D_x), el tamaño D_{65} del lecho pavimentado o acorazado. Esto es particularmente recomendable para una relación $R/D_{65} < 3.5$.

Posteriormente Ayala y Oyarce (1993) desarrollaron un estudio experimental en un modelo a escala 1:30, del río Mapocho en el sector de la estación fluviométrica Los Almendros, en el cual se estudió principalmente la pérdida de carga en un escurrimiento hidráulicamente macrorrugoso. Comparando los resultados obtenidos con los de otros autores, propone la siguiente ley de resistencia basada en que una relación representativa de la aspereza de la coraza a partir de la granulometría original del lecho es $D_{50,coraza}=D_{90}(\text{lecho})$.

$$\frac{v}{u_*} = 5.75 \log \left(4.86 \frac{R}{D_{90}} \right) \quad (1)$$

y también la expresión monomial equivalente a la anterior:

$$\frac{v}{u_*} = 3.303 \left(\frac{R}{D_{90}} \right)^{0.574} \quad (2)$$

En el aspecto mecánico fluvial relacionado con el arrastre de fondo, en cauces naturales de la Cordillera de Los Andes de fuerte pendiente conformados por sedimentos gruesos bien graduados, Ayala y Peric (1991) determinaron a partir de la aplicación de métodos teóricos propuestos por diversos autores, curvas de descarga de sólidos generalizadas para estimar el arrastre de fondo, en función de parámetros de fácil obtención, como es por ejemplo, la pendiente del cauce. Sobre la base de datos provenientes de un conjunto de cauces de montaña, establecieron dos agrupaciones de acuerdo a la tasa de arrastre de fondo que se obtiene, la primera de las cuales (A) corresponde a relaciones que originan como resultados gastos sólidos comparativamente altos o muy altos, mientras que la segunda (B) comprende a las relaciones que dan siempre valores comparativamente bajos o muy bajos. Se ajustó una expresión que relaciona el gasto sólido de fondo gs (ton/día/m) con caudal líquido q ($m^3/s/m$):

$$gs = a q^b \quad (3)$$

Para el grupo A, las constantes a y b valen:

$$a = 41.1 \times 10^5 i^{1.956}; b = 0.473 i^{-0.221}$$

Para el grupo B:

$$a = 7.9 \times 10^5 i^{1.779}; b = 0.26 i^{-0.104}$$

donde i es la pendiente del cauce.

ANTECEDENTES SOBRE EL PROTOTIPO\

Características del Tramo Estudiado

El prototipo representado en el modelo corresponde a un tramo del río Mapocho que se ubica en el sector de la cuenca alta de este río, la que se extiende desde los orígenes de esta hoya hidrográfica en la Cordillera de Los Andes hasta el sector denominado El Arrayán, en la comuna de Las Condes en la ciudad de Santiago. Este sector de la cuenca se caracteriza, desde el punto de vista del relieve, por presentar altas montañas y altas pendientes, con valores medios del orden de 10%. El cauce del río presenta también pendientes altas con un valor medio, en el tramo en estudio, del orden de 1.70 a 1.85 %. Hidrológicamente, se caracteriza por presentar caudales altos durante el período de deshielo, en los meses de Primavera y Verano. Sin embargo, las crecidas extremas observadas se han presentado en épocas invernales.

La zona que se ha representado en el modelo corresponde a un tramo de aproximadamente 300 m del río en el sector de la estación fluviométrica de Mapocho en Los Almendros, repartidos 150 m aguas arriba de dicha estación y 150 m aguas abajo. La zona de la estación se caracteriza por la presencia de grandes rocas y bolones, y el lecho cubierto de piedras de distinto

tamaño y gravas. Hacia la ribera derecha, el cauce está bien definido, desarrollándose la ladera rocosa del cerro en un talud bastante pronunciado; además en ese lado hay un encauzamiento del río consistente en un muro de hormigón de pared vertical. En la ribera izquierda el cauce es menos definido, siendo la ladera de pendiente más suave, cubierta de afloramientos de rocas y bolones, y encontrándose un conjunto de eucaliptus que forman un pequeño bosque. El limnógrafo se ubica, al igual que el limnómetro en la ribera derecha.

que los aforos sistemáticos. En Octubre de 1951 se iniciaron los registros limnigráficos. Los aforos se practican en una sección ubicada aguas abajo de la estación, mediante un sistema doble-carro que enfrenta en 90° a la corriente. El escurrimiento en el sector corresponde a un río de alta energía con un lecho ripioso con presencia abundante de clastos de tamaño medio y grande, y existe apreciable arrastre de sedimento, lo que lleva a efectuar desembanques periódicos de la sección.

La información que se recopiló en la presente investigación corresponde a aforos sistemáticos que cubren el período comprendido entre el 1° de julio de 1980 al

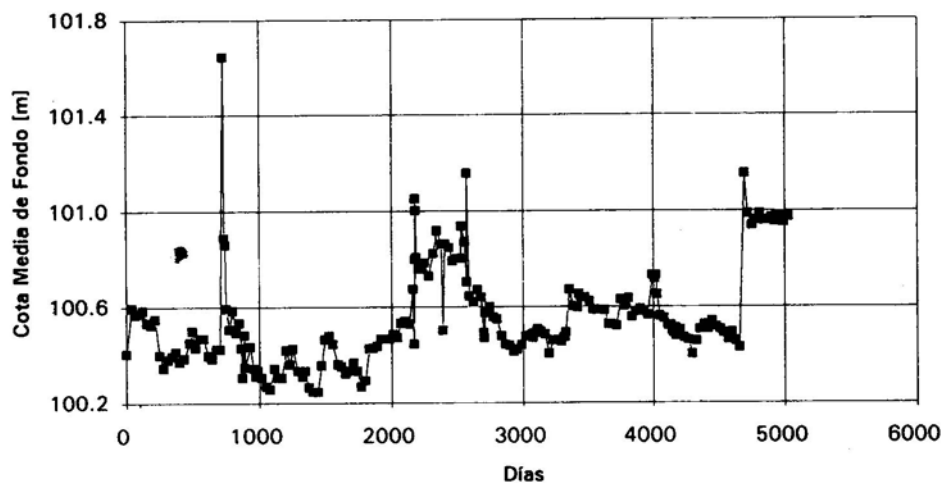


Figura 1. Variación de la cota media de fondo. Estación Mapocho en Los Almendros.

Antecedentes Granulométricos y Topográficos

Se efectuó una campaña de terreno para obtener la topografía del tramo a representar en modelo a partir de la cual, se determinó la pendiente media de fondo del tramo, obteniéndose el valor de 0.0185.

En lo referente a la caracterización granulométrica del cauce, se utilizaron los datos de las campañas efectuadas con anterioridad por uno de los autores. Según dicha información la curva granulométrica del material arrastrado por el río, queda representada por los siguientes parámetros granulométricos: $D_{90}=480$ mm, $D_{84}=296$ mm, $D_{65}=126$ mm, $D_{50}=61.5$ mm, $D_{35}=25.5$ mm, $D_{16}=12.0$ mm, $D_G=24.3$ mm, $\sigma_G=12.2$ (D_G y σ_G , diámetro y desviación estándar geométrica, respectivamente).

Información Hidrométrica

El control hidrométrico de la estación Mapocho en Los Almendros lo efectúa la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas (DGA). Los registros limnimétricos se iniciaron en 1948, al igual

5 de abril de 1994. A partir de las mediciones efectuadas en cada aforo, la información hidrométrica se complementa con la geometría hidráulica en cada medición. También se cuenta con los perfiles transversales de la sección de aforo, información que permite visualizar la variación del lecho del río en el tiempo. La DGA ha efectuado un estudio de las curvas de descarga, contabilizando en el período comprendido entre julio de 1980 y abril de 1992 14 curvas, con distintos períodos de validez cada una de ellas. Un análisis simple de la información recopilada, demuestra la gran incidencia de las variables mecánico-fluviales sobre la curva de descarga, la cual se ve reflejada en cambios frecuentes de las curvas, cambios asociados a fenómenos generados preferencialmente por crecidas.

En la Figura 1 se muestra la variación de la cota media del nivel del fondo del río para el período comprendido entre julio de 1980 y abril de 1994. En la Fig.2 se ha graficado la relación caudal-nivel de la superficie libre constatándose, como se puede ver, una severa dispersión.

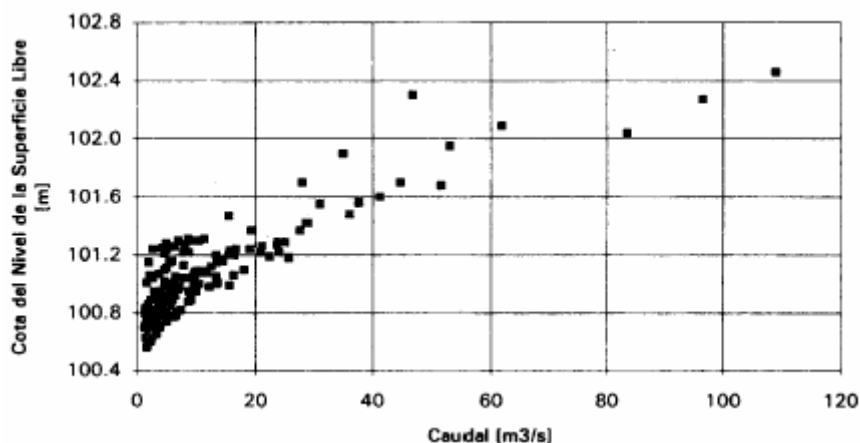


Figura 2. Relación nivel-caudal. Estación Mapocho en Los Almendros.

Antecedentes Hidrológicos

El estudio efectuado por Correa y Vargas (1990), ha determinado que los caudales máximos en función del período de retorno en la estación fluviométrica van desde 36.7 m³/s para 1.5 años hasta 464.5 m³/s para 100 años, con valores intermedios de 157.3 m³/s para 10 años y 344.9 m³/s para 50 años.

INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL EN MODELO HIDRÁULICO

Diseño del Modelo Físico a Escala

Un modelo fluvial con fondo móvil, debe reproducir a semejanza tanto fenómenos hidráulicos como sedimentológicos, vale decir, las fuerzas preponderantes en un escurrimiento con superficie libre, como también las leyes friccionales que rigen y el inicio del arrastre y el arrastre generalizado del sedimento. La semejanza básica de un modelo hidráulico con superficie libre está dada por la constancia del número de Froude en modelo y prototipo. La semejanza friccional implica similitud de las leyes de resistencia hidráulica. En un modelo sin distorsión esta condición de semejanza significa reproducir convenientemente en el modelo la pendiente de la línea de energía. Cuando se trata de lechos de granulometría gruesa, el efecto debido a las ondas sedimentarias sobre la pérdida de carga, no tiene mayor relevancia.

En estudios efectuados en escurrimientos hidráulicamente macrorrugosos, (Ayala et al 1991), caracterizados por ser flujos de gran energía cinética que se desarrollan sobre lechos de gran pendiente constituidos por sedimentos gruesos, y en los cuales la rugosidad relativa, es cercana a 1 y no mayor a 10, como es el

caso del río Mapocho en la zona del presente estudio, han demostrado que el parámetro S de Strickler ($n/D^{1/6}$) depende también de dicha relación. De aquí que al determinar en un lecho de este tipo la condición de semejanza friccional aplicando una ley de resistencia del tipo Manning, resulta que la escala de representación del sedimento del prototipo en el modelo, corresponde a la escala geométrica.

Respecto a la semejanza del transporte sólido debe considerarse tanto la condición de transporte incipiente como la de transporte generalizado. El transporte de sedimentos se describe a través de fórmulas, cuya versión adimensional tiene la forma de la siguiente relación funcional:

$$\varphi(\Phi, \Phi, \Phi_c) = 0 \quad (4)$$

donde el gasto sólido adimensional Φ y el inverso del esfuerzo de corte efectivo φ se definen como sigue:

$$\Phi = \frac{g_s}{\sqrt{(s-1)gD^3}}; \quad \varphi = \frac{(s-1)gD}{\rho u_*^2} \quad (5)$$

La condición de arrastre incipiente φ_c , puede determinarse mediante el criterio de Shields, considerando como valores límites del esfuerzo de corte crítico (φ_c^{-1}) para flujo macrorrugoso, aquellos investigados por Ayala y Campos (1990). Según estos autores el límite inferior corresponde a un estado entre lecho inmóvil y lecho con movimiento incipiente, teniendo un valor de 0.02. El límite superior toma el valor de 0.06 y corresponde a un estado entre el movimiento incipiente del lecho y transporte generalizado.

Considerando lo anterior y las restricciones de espacio y de equipos del Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de Chile, se diseñó un modelo sin distorsión con escala 1:30 y como sedimento se utilizó material natural de peso específico $\gamma_s = 2.65 \text{ ton/m}^3$. La

curva granulométrica que se reprodujo a escala geométrica en el modelo, corresponde a la encontrada para el prototipo de acuerdo a los valores del terreno.

Programa de Experimentación Desarrollado

El programa de experimentación consideró tres series de experiencias:

Serie 1: con lecho móvil sin alimentación de sólidos.
Serie 2: con lecho móvil con alimentación de sólidos.
Serie 3: con lecho solidificado (sin alimentación).

Las experiencias de la Serie 1 (caudales menores o iguales a $50 \text{ m}^3/\text{s}$ en prototipo) tuvieron como objetivo realizar una calibración hidráulica del modelo, es decir, que los parámetros característicos tales como áreas, anchos superficiales, N° de Froude, coeficiente "n" de Manning, etc., y básicamente, la curva de descarga en la sección de control fluviométrico coincidiera con los valores conocidos del prototipo.

Para estas experiencias se procedió a fijar un caudal menor a $50 \text{ m}^3/\text{s}$ y luego de observar una estabilización del lecho, se midió el eje hidráulico controlándose la forma final del lecho. Estas experiencias se realizaron sin alimentación de sedimento, ya que en un estudio anterior se encontró que el límite de $50 \text{ m}^3/\text{s}$, aproximadamente corresponde al inicio del arrastre generalizado.

Una vez realizada la calibración del modelo se desarrolló la segunda serie de ensayos (Serie 2), experimentando con alimentación de sólidos con caudales mayores a $50 \text{ m}^3/\text{s}$ en prototipo hasta llegar a caudales $350 \text{ m}^3/\text{s}$, caudal este último correspondiente a una crecida de período de retorno de 50 años aproximadamente. El objetivo de estos ensayos fue obtener una curva de descarga representativa del sistema, así como determinar el gasto sólido de equilibrio para los distintos caudales de manera de desarrollar una curva de descarga de sólidos para el tramo de río en estudio. En esta serie se realizaron para cada uno de los caudales ensayados, distintas experiencias variando el gasto sólido de alimentación de manera de obtener distintas situaciones finales del lecho, es decir, sedimentaciones o socavaciones globales del lecho en distintos grados.

La experimentación de la Serie 3 con lecho solidificado tuvo como objetivo determinar

cómo se modificaban las cotas de la superficie libre y los parámetros hidráulicos característicos del río en el caso hipotético de que para cualquier caudal que escurriese, ya sea una crecida normal o extrema, la topografía del lecho se mantuviera exactamente igual a la que se tenía en condiciones iniciales.

Para esta experiencia se hizo escurrir, antes de solidificar el lecho, un caudal de aproximadamente $30 \text{ m}^3/\text{s}$ (prototipo), verificándose la concordancia de los niveles de agua del modelo en la sección de control con las cotas de la curva de descarga del prototipo. A continuación se desarrolló un conjunto de ensayos en los cuales se fijaron caudales en forma creciente (hasta $Q=400 \text{ m}^3/\text{s}$), midiendo para cada uno de ellos el eje hidráulico correspondiente.

El programa experimental completo llevó a efectuar un total de 30 experiencias con lecho móvil y 10 experiencias con lecho solidificado.

Resultados Experimentales

Serie 1: Experiencias con Lecho Móvil sin Alimentación de Sólidos

Para estas experiencias se obtuvieron datos del eje hidráulico, del lecho inicial y del final, midiendo cada vez 3 puntos en cada perfil transversal (3 perfiles longitudinales). Dichos datos fueron comparados con los obtenidos de los aforos sistemáticos en el prototipo, graficando curvas área-caudal, $AR^{2/3}$ -caudal y altura limnimétrica-caudal (curva de descarga). A modo de ejemplo, la última de estas curvas se muestra en la Figura 3, donde se incluye como punto eliminado el correspondiente a la Experiencia N°5. Esta experiencia tiene una altura limnimétrica muy inferior a la esperada, producto de una socavación media del lecho de 0.52 m originada por arrastre asociado a un caudal de $49 \text{ m}^3/\text{s}$ lo que reveló que el lecho se mantiene inmóvil para caudales más cercanos a $45 \text{ m}^3/\text{s}$ que a $50 \text{ m}^3/\text{s}$.

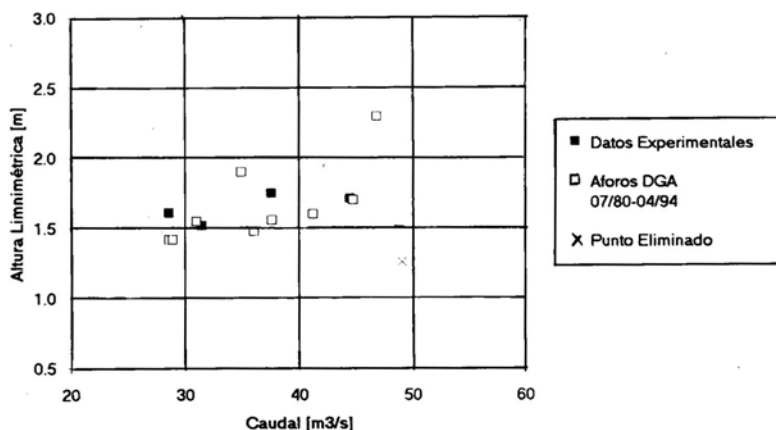


Figura 3. Curva de Descarga. Serie 1 Ensayos sin Arrastre

El gráfico de la Figura 3 muestra una coincidencia satisfactoria entre los parámetros experimentales y los del prototipo, de una manera similar a lo que ocurre con las demás curvas (no incluidas en el presente artículo), lo que sirve para confirmar que al menos en el rango de caudales inferiores el comportamiento del modelo es similar al del prototipo.

Serie 2: Experiencias con Lecho Móvil y Alimentación de Sedimentos.

Resultados Básicos.

Una vez calibrado hidráulicamente el modelo y verificado el comportamiento similar de éste y del prototipo,

los estados de sedimentación o socavación global del tramo. Para estos efectos se plantearon dos hipótesis alternativas de equilibrio sedimentológico: 1) descenso o ascenso medio del lecho nulo en el tramo estudiado y 2) pendiente media del tramo igual a la pendiente media original del tramo.

En la Tabla 1 se consignan las cotas del lecho, la pendiente final y altura limnimétrica de acuerdo a las alimentaciones de sedimento efectuadas para cada una de las experiencias realizadas. En dicha tabla las pendientes finales encontradas deben compararse con la pendiente inicial correspondiente a los perfiles topográficos reproducidos en el modelo de 1.85%.

Tabla 1. Resultados Experimentales de la Serie 2.

<i>Exp. Nº</i>	<i>Caudal [m³/s]</i>	<i>Gasto Sólido [ton/día]</i>	<i>Variación Global del Perfil Longitudinal Pro- medio [m]</i>	<i>Pendiente Final del Lecho [%]</i>	<i>Altura Lim- nim. [m]</i>
1	55.9	79367	-0.05	2.24	1.69
2	57.5	213	-0.69	2.15	1.59
3	78.1	95830	0.11	1.84	2.02
4	78.1	63887	-0.37	2.02	1.78
5	105.1	151624	0.44	2.44	2.39
6	99.5	88589	-0.35	2.04	1.93
7	101.4	298	-1.14	1.70	1.18
8	151.4	264064	0.37	2.55	2.77
9	154.4	177605	-0.41	1.79	2.18
10	147.1	724	-1.50	1.57	1.45
11	203.3	414410	0.28	2.58	2.58
12	199.7	319432	-0.28	1.73	2.51
13	209.1	84330	-0.79	1.91	2.25
14	200.9	426	-1.48	1.55	1.75
15	259.0	413983	0.30	2.23	3.02
16	259.0	308358	-0.07	2.03	2.95
17	251.5	212955	-0.93	1.80	2.25
18	251.5	511	-1.68	1.54	1.88
19	303.0	445501	0.01	2.09	2.91
20	297.5	246175	-1.47	1.29	2.39
21	301.5	1022	-1.87	1.41	2.32
22	349.6	246601	-1.41	1.42	2.59
23	352.3	18314	-2.23	1.02	2.08
24	352.3	1917	-2.67	1.02	2.07
25	402.6	5878	-2.81	1.05	2.42

po, se efectuaron las experiencias correspondientes a crecidas de mayor magnitud, hasta alcanzar un caudal cercano a 350 m³/s. Estas experiencias conforman la Serie 2 de ensayos con arrastre y alimentación.

En esta serie se buscó básicamente determinar la condición de equilibrio sedimentológico del lecho, ensayando un mismo caudal líquido con distintos gastos sólidos de alimentación de tal forma de obtener distin-

Determinación del Gasto Sólido de Equilibrio

Para determinar el equilibrio sedimentológico del lecho y a partir de éste el correspondiente gasto sólido por el fondo característico del tramo en estudio, según se ha explicado, se plantearon dos hipótesis de cálculo. La condición de equilibrio sedimentológico, aún en un sistema ideal como el modelo, no es fácil ni directa de

establecer por cuanto el gran número de parámetros que intervienen en las experiencias, tales como tiempo de experimentación, alimentación de sólidos efectiva, granulometría de entrega de este material al canal, errores de mediciones de las variables, hacen incierta esta determinación. La formulación de las hipótesis antes reseñadas de invariabilidad global del nivel del lecho y de invariabilidad de la pendiente del tramo, permiten acotar el problema y tomar decisiones con mayor fundamentación.

Hipótesis de nvariabilidad Global del Nivel del Lecho

Para la obtención de la curva de descarga de sólidos de equilibrio, las experiencias se dividieron en los siguientes grupos de caudales: 55, 78, 100, 150, 200, 250, 300 y 350 m³/s. Para cada uno de estos grupos se interpolaron los gastos sólidos que hacían cero la variación global de cada uno de 3 perfiles longitudinales medidos, respecto de los perfiles originales del lecho, así como el gasto sólido que correspondía a una variación promedio nula de los niveles del lecho también en relación a los niveles originales del mismo.

Tabla 2. Ecuaciones de Ajustes para el Gasto Sólido de Equilibrio

Perfil Utilizado para Interpolarse el Gasto Sólido de Equilibrio	Ecuación de Ajuste	Ecuación N°
Perfil Long. Izquierdo	$G_s = 1324 \cdot Q^{1.054}$	1
Perfil Long. Central	$G_s = 335 \cdot Q^{1.225}$	2
Perfil Long. Derecho	$G_s = 1677 \cdot Q^{0.985}$	3
Perfil Long. Promedio	$G_s = 905 \cdot Q^{1.088}$	4

A partir de las determinaciones anteriores se obtuvieron 4 valores de gasto sólido de equilibrio para cada uno de los caudales: 3 por cada perfil longitudinal medido (izq., central, derecho) y uno correspondiente al perfil longitudinal promedio. Con estos valores se realizó un ajuste logarítmico obteniéndose finalmente 4 relaciones que representan el gasto sólido de equilibrio del tramo en estudio.

En la Tabla 2 se muestra un resumen de las ecuaciones correspondientes a los ajustes realizados a partir de los datos interpolados sobre la base de la hipótesis de invariabilidad global del nivel del lecho. En dichas ecuaciones G_s es el gasto sólido en ton/día y Q el caudal en m³/s.

En la Figura 4 se muestran todas las curvas encontradas como ajustes del gasto sólido de equilibrio.

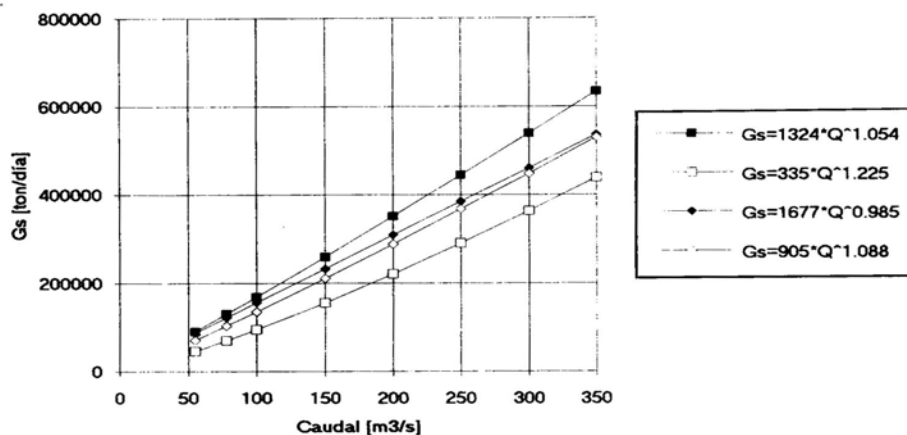


Figura 4. Gasto sólido de equilibrio. Hipótesis de Invariabilidad de Nivel Medio del Lecho

Los ajustes obtenidos interpolando los distintos perfiles longitudinales entregaron dispersiones que dependen del grado de embanque o socavación global que se tenga para cada uno de dichos perfiles de acuerdo a las distintas alimentaciones. El perfil izquierdo y el perfil derecho están asociados a modificaciones del lecho similares, mayores que la del perfil central y por lo tanto, ambos perfiles entregan ecuaciones similares con gastos sólidos de equilibrio mayores.

Las curvas encontradas como gastos sólidos de equilibrio, en este estudio experimental, se compararon con las curvas de descarga de sólidos generalizadas para estimar el arrastre de fondo en cauces naturales de fuerte pendiente propuesta a partir de la aplicación de métodos teóricos por Ayala y Peric (1991), las que definen una banda dada por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} \text{- Gasto Sólido Máximo} \quad G_s &= 872 \cdot Q^{1.186} & (6) \\ \text{- Gasto Sólido Mínimo} \quad G_s &= 378 \cdot Q^{1.115} & (7) \end{aligned}$$

En la Figura 5 se muestran gráficamente las relaciones correspondientes a gastos sólidos de equilibrio máximos y mínimos obtenidos de las ecuaciones (6) y (7), la banda experimental definida por las ecuaciones N°1 y N°2 de la Tabla 2 y aquella obtenida a partir del perfil longitudinal promedio, la cual de acuerdo a este estudio se estima como más probable por considerar valor medios. Dicha curva está representada por la ecuación N°4 de la Tabla 2.

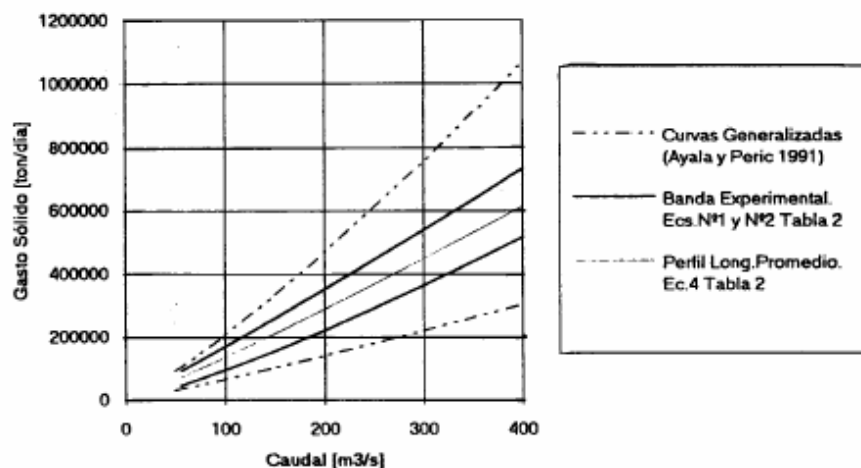


Figura 5. Hipótesis de invariabilidad de Niveles del Lecho

Comparación entre Valores Teóricos y Experimentales. Se observa que las curvas obtenidas experimentalmente se encuentran dentro la banda teórica, lo que tendería a proveer cierta confirmación acerca de la aplicabilidad de los modelos teóricos; además permite efectuar un ajuste de la tendencia experimental media que representaría el gasto sólido de equilibrio para el sector Mapocho en Los Almendros.

Hipótesis de Invariabilidad de la Pendiente del Lecho

Para la determinación del gasto sólido de equilibrio utilizando como hipótesis la invariabilidad de la pendiente del tramo, se calcularon las diferencias obtenidas, para cada una de las experiencias, entre la pendiente inicial dada por los perfiles originales (1.85%) y la pendiente que se midió en el lecho al final de la experiencia.

En este caso, también se han comparado gráficamente las curvas generalizadas de gasto sólido (mínimos y máximos) propuestas por Ayala y Peric con la curva encontrada aplicando el criterio de la invariabilidad de la pendiente, lo cual se muestra en la Figura 6.

Comparación entre Valores Teóricos y Experimentales. En la Figura 6 se puede apreciar una tendencia relativa diferente de la obtenida con la hipótesis de invariabilidad del lecho. Esto se puede deber al error producido en este tipo de cálculo ya que, si bien existe una relación entre la variación de la pendiente y la variación del lecho, en la cual frente a un aumento de la primera se observa normalmente un aumento de la variación del lecho, ésta no es absolutamente directa. Por tal motivo aparece razonable suponer mayor validez para las relaciones derivadas a partir de la hipótesis de invariabilidad del lecho que aquellas obtenidas de la segunda hipótesis.

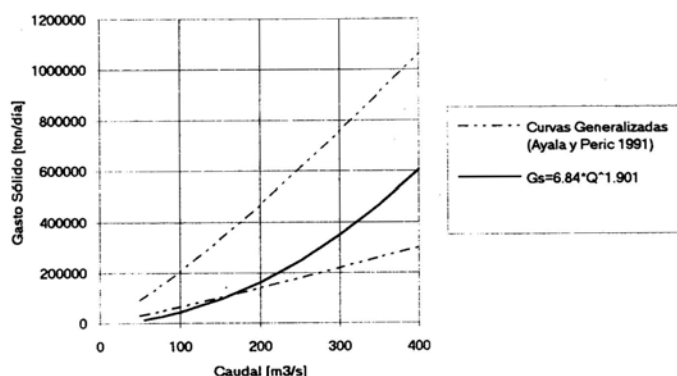


Figura 6. Hipótesis de Invariabilidad de la Pendiente Media.

Curvas de Descarga para el Tramo en Equilibrio Sedimentológico

En este punto se determinan las curvas de descarga experimentales más representativas del sistema bajo condiciones de equilibrio sedimentológico. Para la obtención de esta curva de descarga se consideró la situación en que se presenta una condición de equilibrio sedimentológico del lecho

bajo la hipótesis de invariabilidad global de niveles del lecho, interpolando la cota limnimétrica que hacía cero la variación global de niveles. De esta manera se obtuvieron 4 valores de alturas limnimétricas para cada caudal, provenientes de las diferencias de cotas del lecho encontradas en cada uno de los 3 perfiles longitudinales medidos (izquierdo, central y derecho) y del perfil longitudinal promedio, respecto de las cotas iniciales del lecho.

A modo de ejemplo, en la Figura 7 se muestran los ajustes correspondientes a las cotas limnimétricas que fueron obtenidas a partir de la condición de equilibrio provenientes de los perfiles longitudinales izquierdo, central, derecho según la relación del tipo $Q=a*(h-b)^c$.

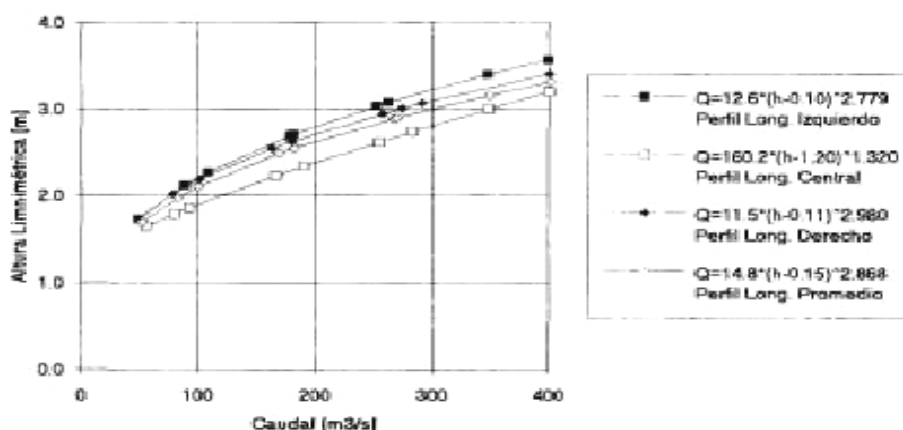


Figura 7. Curva de Descarga. Hipótesis Invariabilidad Global de Niveles del Lecho.

La comparación de una curva con otra, permite apreciar una dispersión notable al momento de asociar una altura limnimétrica a un caudal, presentándose diferencias de hasta 100 m³/s en este último. Esto depende básicamente del perfil longitudinal que se tome como referencia para el cálculo de la invariabilidad de las cotas del lecho, lo que indica que la curva de descarga es muy sensible respecto a la definición de equilibrio en el cauce y por lo tanto, en forma más general, respecto a las hipótesis establecidas. Atendiendo a la menor a la dispersión, se ha adoptado como más representativa, la curva de descarga determinada a través de las mediciones del lecho efectuadas en el perfil longitudinal promedio. Esta curva está dada por la siguiente ecuación:

$$Q = 14.8 * (h - 0.15)^{2.868} \quad (8)$$

y ha sido extendida para caudales menores a 50 m³/s (ensayos sin alimentación de sólidos), en atención a la buena concordancia con valores medidos.

En la Figura 8 se muestra esta curva junto a los datos medidos, distinguiendo con distintos símbolos la condición a la cual se encuentran asociados (embanque o socavación global del lecho). En dicha figura se muestra también una comparación entre la curva de descarga obtenida experimentalmente y los datos aforados por la Dirección General de Aguas del M.O.P. entre julio/1980 y abril/1994. Además se han graficado valores adicionales de prototipo no aforados y asociados a crecidas los cuales son básicos para la extrapolación de las curvas de descarga de la DGA individualizadas con los números 270 y 340. Estas curvas son fundamentales en el período comprendido entre el 13/06/80 y 06/07/88, es decir, todas las curvas deducidas durante ese período se basan en la tendencia de éstas. La curva 270 tiene una validez entre el 13/06/80 y el 27/06/82 y se presenta como curva fundamental durante el período comprendido entre el 13/06/80 y el 26/02/86. La curva 340 tiene un período de validez entre el 27/02/86 y el 16/06/86 y es fundamental para la familia de curvas determinadas entre el 27/02/86 y el 06/07/88. Estas curvas están dadas por las siguientes ecuaciones:

- Curva 270 $Q = 30.061 * (h - 0.4)^{2.063}$ para $h > 1.8$ m. (9)

- Curva 340 $Q = 25.091 * (h - 0.4)^{2.154}$ para $h > 0.95$ m. (10)

Las curvas graficadas en la Figura 8 permiten constatar diferencias entre el modelo y el prototipo que superan, para crecidas de mayor magnitud (sobre 250 m³/s), los 100m³/s para una misma cota limnimétrica.

Ya se han señalado posibles efectos que provocan las diferencias observadas entre las curvas experimentales y las del prototipo, pero se debe hacer referencia, además, al efecto producido por la variación de la rugosidad que se muestra en las distintas experiencias efectuadas. De los cálculos efectuados que no se incluyen en este trabajo, se aprecia que el valor de la rugosidad de Manning, en promedio disminuye para caudales mayores a 100m³/s, lo que provocaría una disminución de la altura del escurrimiento. Además se observa una gran variación de la rugosidad en relación al estado final del lecho.

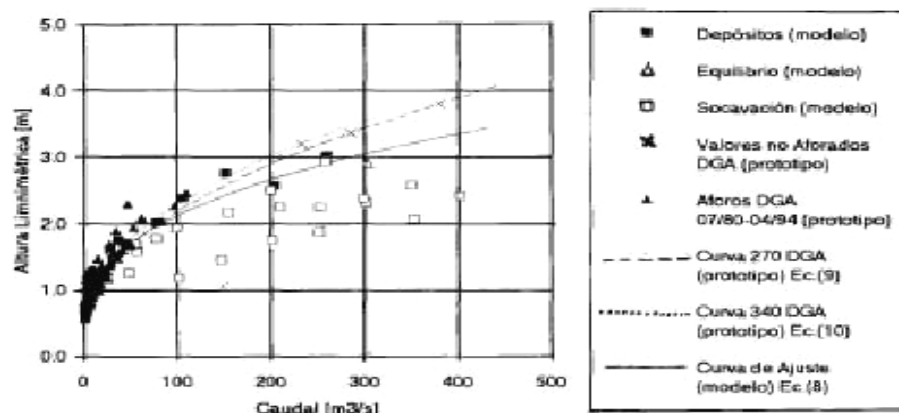


Figura 8. Curva de Descarga. Valores de Modelo y Prototipo Mapocho en Los Almendros.

Serie 3: Experiencias con Lecho Solidificado

Estas experiencias tuvieron como objetivo determinar cómo variaban las cotas de la superficie libre, en el caso hipotético de que el lecho se mantuviera inalterado frente a crecidas de cualquier magnitud. Con este objetivo se realizaron 10 ensayos que abarcaron desde un caudal de 31.5 m³/s hasta 395.4 m³/s, este último valor cercano a un período de retorno de 100 años, obteniéndose resultados cuyo ajuste matemático está dado por la siguiente ecuación:

$$Q = 23.98 \cdot (h - 0.4)^{2.197} \quad (11)$$

Los datos se comparan, en la Figura 9, con los datos obtenidos por la DGA en los aforos efectuados en el prototipo, observándose tendencias muy similares para los valores de crecidas. Esto indica que los cálculos efectuados para la obtención de la altura limnimétrica asociada a un caudal de crecida no aforado en el prototipo, serían solamente válidos si el lecho no se modifica frente a la ocurrencia de estas crecidas extremas, comportándose como un lecho rígido. De la comparación entre la curva de ajuste experimental

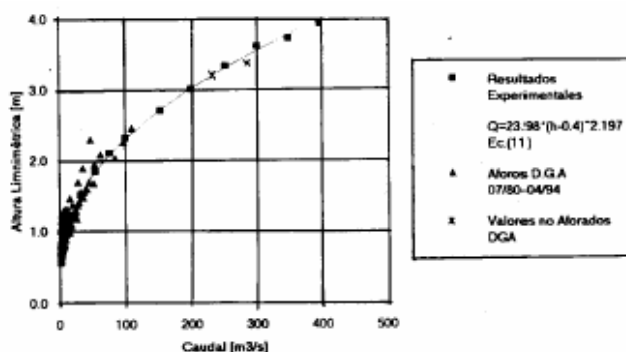


Figura 9. Curva de Descarga. Experiencias con Lecho Solidificado y Datos de Prototipo.

mostrada en la Figura 8 y las curvas 270 y 340 empleadas en el prototipo, se deduce que la extrapolación a la cual conduce esta última ecuación puede llevar a diferencias significativas en la estadística de caudales máximos, como se aprecia en la Tabla 3.

INCIDENCIA SOBRE PERIODOS DE RETORNO

Un aspecto interesante de destacar en relación al resultado arriba enunciado se refiere a determinar el real período de retorno de crecidas mayores, cuyo caudal no ha sido medido, sino extrapolado de la curva de descarga.

En efecto, de acuerdo a los datos consignados en la Tabla 3 y Figura 8, se aprecia que para una lectura del nivel de la superficie libre del escurrimiento se tienen dos valores del caudal, uno correspondiente a la extrapolación de la curva de descarga del prototipo (lecho rígido) y otro experimental (lecho móvil en equilibrio sedimentológico), este último que refleja en mayor medida el mecanismo del fenómeno. A partir de la serie de lecturas limnimétricas o limnimográficas, pueden obtenerse por lo tanto dos series de caudales máximos y a partir de ellas, dos curvas de frecuencias.

En la Figura 10 se ha trazado la curva de frecuencia derivada de la curva de descarga del prototipo usada por la DGA, así como aquella deducida con los datos experimentales del presente estudio.

En la Tabla 4 se comparan los caudales asociados con períodos de retorno desde 1.5 años hasta 1000 años, pudiéndose apreciar que al ir aumentando el período de retorno, la extrapolación de la curva de descarga del prototipo deducida a partir de aforos y extrapolación considerando lecho rígido) entrega valores del caudal crecientemente diferentes (por defecto) con respecto a aquellos deducidos de la curva de descarga de lecho móvil (en equilibrio sedimentológico).

Tabla 3. Comparación entre Caudales Máximos de Lecho Móvil y Lecho Rígido.

Altura Limnim.	Caudales [m^3/s]	Máximos	Diferencia	Diferencia Porcentual
[m]	Lecho Móvil, Q_M ec.(8)	Lecho Rígido, Q_R ec.(11)	[m^3/s]	$\Delta Q/Q_R * 100$ [%]
2.0	86.5	67.3	-19.1	-28.38
2.5	171.7	122.4	-49.3	-40.28
3.0	298.6	195.7	-102.9	-52.58
3.50	474.6	288	-186.7	-64.81
4.0	707.4	400	-307.4	-76.84
6.0	2348.2	1055.9	-1292.3	-122.39

Tabla 4. Peíodo de Retorno asociado a Caudales Máximos de Lecho Móvil y

Lecho rígido.

Período de Retorno [años]	Q Lecho Rígido, $Q_R[m^3/s]$	Q Lecho Móvil, $Q_M[m^3/s]$	ΔQ [m^3/s]	$\Delta Q * 100$ Q_R [%]
1.5	36.7	44.2	-7.5	-20.33
2.0	50.1	62.1	-12.0	-23.95
5.0	104.3	142.6	-38.3	-36.69
10	157.3	230.5	-73.2	-46.52
20	225.2	353.1	-127.9	-56.79
50	344.9	590.6	-245.7	-71.22
100	464.5	849.3	-348.8	-82.84
500	877.4	1863.9	-986.5	-112.43
1000	920.0	2755.8	-1555.8	-129.65

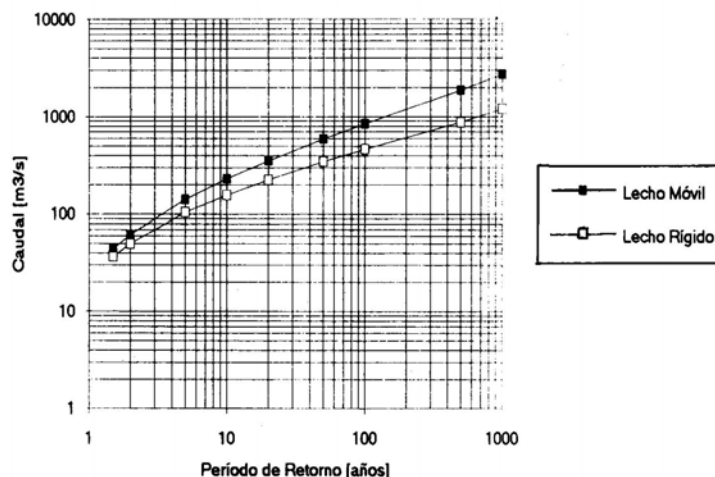


Figura 10. Curva de caudales vs Período de Retorno. Estación Mapocho en Los Almendros

Este es un elemento de importancia en el diseño de obras hidráulicas fluviales, ya que la subevaluación del caudal asociado a un periodo de retorno dado conduce necesariamente a un diseño inseguro e inadecuado que puede llegar a tener consecuencias sobre vidas humanas y sobre inversiones económicas.

CONCLUSIONES

Bajo condiciones de equilibrio sedimentológico, la extrapolación de las curvas de descarga basadas en tendencias definidas en el rango de caudales bajos y medios, en una estación fluviométrica de montaña, puede dar lugar a incertezas importantes en la estimación de caudales máximos representativos de eventos hidrológicos extremos.

Esta situación conducirá a generar curvas de frecuencia distorsionadas, lo que en definitiva incidirá en diseños inseguros o inadecuados de obras hidráulicas fluviales.

Se ha encontrado un modelo predictivo del gasto sólido de equilibrio representativo del equilibrio sedimentológico en un cauce de montaña, como el río Mapocho en la Cordillera de Los Andes.

RECONOCIMIENTOS

El presente trabajo forma parte del Proyecto de Investigación 1079-92, " Factores Hidráulicos y Mecánico Fluviales en el Control Hidrométrico en Cuencas de Montaña ", el cual fue financiado por el Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDECYT) y el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile.

La información fluviométrica ha sido proporcionada por la Dirección General de Aguas del Ministerio de Obras Públicas, a quien se le agradece debidamente su colaboración.

REFERENCIAS

- Ayala L. y Peric L., 1991. Curvas de Descarga de Sólidos Generalizadas para Estimar el Arrastre de Fondo en Cauces Naturales de Fuerte Pendiente. X Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica Vol 2, Valparaíso Chile.
- Ayala L. y Oyarce O., 1993. Diseño, Construcción y Operación del Modelo Físico de un Prototipo Representativo de Cauces Cordilleranos Andinos. CRH 93-79-I.
- Bonacci O., 1983. Several Methods for Discharge Measurements of Floods. Hydrological Sciences Journal, 28, 4, 12/1983.
- Cruette J., 1975. Methodologie pour la mesure des crues brutales., Cahiers O.R.S. T.O.M. Series Hydrologie Vol 12, N°1.
- Jarret R.D., 1990. Hydrologie and Hydraulic Research in Mountain Rivers, Water Resources Bulletin, AWRA, Vol. 26, N°3, Jun.
- López A., Fuentes R., Marín P., Tapia R., 1994. Influencias de las Variaciones del Lecho y de la Profundidad sobre el Nivel de la Superficie Libre de un Cauce de Lecho Móvil. XVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica Vol 2, Santiago Chile.
- R.E.G. Ricardo Edwards G. Ingenieros Consultores Asociados Ltda., 1983. Análisis Crítico de la Red Fluviométrica Nacional (Regiones Metropolitana y VI). Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas. Departamento de Hidrología.
- Santos-Gayado J. 1972. Stage Determination for High Discharges. Colorado State University.
- Starosolszky O. 1983. Trends in the Development of Hydrometry, Hydrological Sciences Journal, 28,1, 3/1983.
- Vargas X. y Correa S. 1990. Uso de Información Regional para la Estimación del Caudal Máximo. Publicación CRH 90-60-I.
- World Meteorological Organization. 1980. Manual on Stream Gauging. Vol I: Fieldwork; Vol II: Computation of Discharge. WMO Report N° 519.