

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERIA HIDRAULICA
IX CONGRESO NACIONAL

GEOMETRIA HIDRAULICA Y SEDIMENTOS CONSTITUYENTES
DE CAUCES TORRENCIALES. CASO DE LA HOYA SUPERIOR DEL RIO MAPOCHO

Alejandro López A. (1)
Luis Ayala R. (2)
Marcela Sandoval V. (3)

RESUMEN

Se presentan antecedentes relativos a la campaña de terreno realizada en la hoya superior del río Mapocho, desarrollada para obtener datos que posibiliten la caracterización hidráulica y mecánico-fluvial de cauces torrenciales. Se entregan resultados sobre algunas características hidráulicas, información sobre la composición granulométrica de los lechos y antecedentes sobre coeficientes de rugosidad de los cauces. Se discuten los alcances y limitaciones de las metodologías empleadas y los resultados obtenidos.

-
- (1) Ingeniero Civil, Profesor Asociado e Investigador del Centro de Recursos Hidráulicos, Departamento de Ingeniería Civil, U. de Chile.
 - (2) Ingeniero Civil, PhD., Profesor Titular e Investigador del Centro de Recursos Hidráulicos, Departamento de Ingeniería Civil, U. de Chile.
 - (3) Egresada de Ingeniería Civil, Ayudante de Investigación. Centro de Recursos Hidráulicos, Departamento de Ingeniería Civil, U. de Chile.

1.- INTRODUCCION

Cuando se desea realizar un estudio del comportamiento hidráulico y mecánico fluvial de un cauce natural, se requiere caracterizar en forma sistemática su geometría hidráulica y sedimentos constituyentes del lecho. Con estos antecedentes es posible establecer leyes de resistencia y determinar el arrastre sólido correspondiente aplicando modelos de estimación de uso generalizado. El problema surge cuando se pretende estudiar cauces de régimen torrencial o próximos a él constituidos por lechos de granulometría gruesa y extendida, en los cuales se ha demostrado que no son aplicables las relaciones hidráulicas y de arrastre sólido más comunes, desarrolladas para cauces de régimen tranquilo y lechos de sedimento fino.

Los cauces torrenciales están asociados a cuencas cordilleranas y se caracterizan por escurrir encajonados en valles generalmente profundos, presentar altas pendientes y bajas profundidades, y lechos constituidos por sedimentos de granulometría muy variada encontrándose generalmente rocas de gran tamaño dentro del cauce. Estas condiciones representan, desde el punto de vista hidráulico asperezas relativas, definidas por la relación H/D del orden de la unidad lo que significa un escurrimiento hidrodinámicamente macro-rugoso, con el resultado práctico que la determinación del coeficiente n de Manning y la ley de resistencia hidráulica es diferente a lo que se determina para un lecho fino. (Ver en esta misma publicación el trabajo de Ayala y Schwember). Desde el punto de vista del arrastre sólido, en estos cauces montañosos hay que distinguir su capacidad de arrastre potencial y real (Ayala et al 1987), además que la caracterización granulométrica del lecho es incierta, por cuanto hay dificultades prácticas insalvables para determinar la constitución exacta del lecho ya que los muestreos que se pueden ejecutar representan más bien los sedimentos de arrastre más que los constituyentes del lecho.

En nuestro medio el estudio del comportamiento de estos ríos es de gran importancia, no sólo porque en las cuencas andinas existen

y se proyectan importantes obras de ingeniería sino porque en condiciones de crecidas extremas estos cauces drenan grandes volúmenes de sedimento desde las zonas altas hacia los sectores más bajos del Valle Central, donde son depositados facilitando así la divagación e inestabilidad de los cauces con serias consecuencias. En este trabajo se presentan los antecedentes obtenidos en la campaña de terreno llevada a cabo en la cuenca alta del Mapocho, con los cuales puede efectuarse una caracterización primaria de estos ríos.

2.- ZONA DEL ESTUDIO

El estudio se centró en la hoya alta del río Mapocho, el cual hasta la salida del cajón cordillerano tiene una superficie aproximada de 1000 Km². Los cursos principales de esta hoya con el río San Francisco y el Molina, cuya confluencia da origen al Mapocho, y los esteros Yerba Loca, Arrayán y las Hualtatas. Todos estos cauces van encajonados, y sólo aguas abajo del Puente San Enrique el Mapocho presenta un aspecto morfológico algo diferente al de aguas arriba con cauce más amplio y alterado por trabajos. El régimen hidrológico de la cuenca es típicamente nival y la vegetación está constituida por arbustos, matorrales y árboles en algunos sectores.

Se eligieron 11 lugares de muestreo que cubren un tramo aproximado de 15 Km. comprendido entre la junta de los ríos San Francisco y Yerba Loca y el Puente Nuevo de lo Barnechea, los que se distribuyeron de la siguiente forma: 3 en el río San Francisco, 1 en el Estero Yerba Loca, 1 en el río Molina, 5 en el río Mapocho, 1 en el estero El Arrayán y 1 en el estero Las Hualtatas; estos lugares se esquematizan en la Fig. 1. Ellos se eligieron teniendo en cuenta la existencia de singularidades que pueden introducir cambios en los cursos, tales como confluencias, puentes u otras singularidades.

3.- CAMPAÑA DE TERRENO

El objetivo de la campaña fue reunir información topográfica, granulométrica y de caudales que permitan definir el comportamiento global hidráulico - sedimentológico de los cauces antes señalados. La campaña consistió en realizar levantamientos topográficos, determinar la granulometría de los sedimentos del lecho y efectuar aforos en las secciones en las cuales se construyeron los pozos de muestreo.

Se efectuaron dos campañas de terreno, en Agosto de 1988 y Marzo de 1989, ejecutándose en ambas pozos para determinar la granulometría del lecho. Los pozos se excavaron siguiendo el procedimiento estandarizado por el C.R.H. (1981), con algunos cambios, como ser remover una capa superficial de 30 cms. a lo menos y fijar las dimensiones del pozo de acuerdo a las dimensiones del tamaño del sedimento que visualmente se observa. Es así como la menor dimensión en planta de los pozos fue de 1,10 m x 1,10 y la mayor de 1,75 x 1,40; en profundidad se excavaron capas de espesor entre 60 cms. y 1,60 m. In situ se efectuó el análisis granulométrico de los sedimentos mayores de 13 mm y el resto se analizó en laboratorio. El levantamiento topográfico se realizó sólo en la primera campaña; se midieron 5 perfiles transversales en el entorno del pozo, distantes uno de otro en un ancho del cauce activo aproximadamente, en cada perfil se tomaron los puntos suficientes para determinar la geometría de la caja del río y de las riberas. En la Tabla 1 se indican las longitudes de los tramos, el ancho de los perfiles y el número de puntos de cada perfil. Asimismo se levantó un perfil longitudinal para obtener la pendiente del río.

Los caudales se midieron en 7 de los 11 sectores muestreados obteniéndose además el perfil longitudinal del pelo de agua asociado al caudal respectivo, nivelando la cota de la superficie del agua en cada uno de los 5 perfiles. Los caudales se midieron en el período de mayor caudal, Noviembre a Enero, no obstante lo

cual fueron pequeños por falta de nieve.

4.- RESULTADOS DE LA CAMPAÑA

En la Tabla 2 se resumen los principales parámetros granulométricos de las muestras tomadas en los pozos, indicándose la pendiente media del tramo de río correspondiente y en las Figuras 2a) a 2g) se muestran las curvas granulométricas correspondientes a los sectores en los cuales se practicó el aforo, incluyendo la curva integrada de las anteriores. En la Tabla 3 se consignan los caudales aforados, el radio hidráulico medio R y N_0 de Froude medio F representativos del tramo levantado además de la aspereza relativa $R/D_{0.4}$, siendo $D_{0.4}$ el diámetro 84% de la curva integrada. Hay que hacer notar que en algunos de los sectores estudiados existe entre los perfiles de un mismo tramo apreciables diferencias de los números de Froude y radio hidráulico, respectivamente.

5.- CARACTERIZACION DE LOS TRAMOS

5.1 Caracterización Granulométrica

Los resultados mostrados en la Tabla 2 y gráficos 2 a) a 2 g) ponen de manifiesto la característica de estos cauces: sedimento grueso de granulometría extendida. En terreno se constató que en casi todos los cauces existen rocas de grandes dimensiones, las que no pueden ser incorporadas al análisis por la imposibilidad de medirlas, información que sería necesaria obtener ya que este tipo de rocas tiene gran incidencia en el comportamiento hidráulico del río. Por otra parte las dimensiones del pozo en superficie y en profundidad quedan limitadas por condiciones externas, la profundidad por la aparición de agua y la superficie por la operabilidad del muestreo. Las campañas de terreno pusieron en evidencia que el tamaño del pozo tiene incidencia en los valores granulométricos en estos lechos con sedimento de tamaño grande.

73

74

TABLA 1
CARACTERISTICAS DE LOS PERFILES TRANSVERSALES

SECCION	LONGITUD DEL TRAMO m	PERFILES Nº	DISTANCIA ENTRE PERFILES m	ANCHO PERFIL m	PUNTOS EN EL PERFIL
Sn.Fco antes Verba Loca	104.6	5	24.4	29	14
		4	29.2	34	11
		3	25.2	29	10
		2	25.8	22	11
		1		40	13
Verba Loca antes Sn.Fco	52.4	5	14.8	20	10
		4	12	17	13
		3	15.4	20	12
		2	10.4	11	12
		1		10	8
SnFco aguas arriba Central	74.6	5	14.2	17	12
		4	20.2	18	14
		3	19.4	24	19
		2	20.8	18	16
		1		19	16
SnFco aguas abajo Central	87.4	5	18.6	34	14
		4	20.4	33	14
		3	14.6	36	14
		2	33.8	41	13
		1		20	11
Molina antes Sn.Fco	69.4	5	20.6	15	8
		4	15.4	26	14
		3	17.2	14	11
		2	16.2	20	9
		1		22	12
Mapocho en Los Almendros	115.6	5	24.8	22	13
		4	24.2	34	14
		3	30.8	42	16
		2	35.6	43	16
		1		30	13
Mapocho en Pte Pastor Fernández	185.5	5	34	50	17
		4	37.5	62	22
		3	54	61	22
		2	60	70	24
		1		49	22
Arrayán en Montosa	125	5	46	34	13
		4	27.8	36	15
		3	27.4	34	14
		2	23.8	26	16
		1		15	10

(CONTINUACION)

TABLA 1
CARACTERISTICAS DE LOS PERFILES TRANSVERSALES

SECCION	LONGITUD DEL TRAMO m	PERFILES Nº	DISTANCIA ENTRE PERFILES m	ANCHO PERFIL m	PUNTOS EN EL PERFIL
Mapocho en Quinchamalí	152	4	57.5	91	14
		3	38.5	87	14
		2	56.0	101	19
Mapocho en Puente Nuevo	386	1		91	18
		5	99	77	14
		4	72.5	89	13
		3	87.5	73	14
		2	127	108	21
1		121	10		

Por último, y por las razones antes expuestas, al utilizar esta información granulométrica debe tenerse presente que esta es más representativa del sedimento arrastrado por el río que del lecho en su conjunto.

En la Tabla 4 se muestra la variación granulométrica a lo largo del tramo en estudio, representada por los tamaños característicos de la curva integrada. Se puede apreciar la influencia de los aportes de los cauces con mayor pendiente sobre los ríos principales de menor pendiente. En efecto, es notorio el aumento de la granulometría del río San Francisco después de la confluencia con el estero Verba Loca, cauce de gran pendiente con capacidad de arrastrar sedimentos mayores, los cuales se depositan en el tramo de menor pendiente del río San Francisco. Cuando las pendientes se hacen más estables la granulometría y desviación estándar tienden a disminuir hacia aguas abajo, fenómeno característico en los cauces naturales. Finalmente hay que destacar la diferencia en la granulometría encontrada entre la primera y la segunda campaña en el estero Verba Loca, lo cual refleja lo observado en ambas oportunidades en terreno, en efecto en la segunda campaña se comprobó la existencia de un apreciable depósito de sedimento fino en el sector de muestreo, inexistente en la primera campaña.

TABLA N° 2

PENDIENTE Y PRINCIPALES PARAMETROS GRANULOMETRICOS

RIO	UBICACION POZO	PRIMERA CAMPAÑA			SEGUNDA CAMPAÑA									
		CAPA 1		CAPA 2		CAPA 1		CAPA 2						
		D16 mm	D50 mm	D84 mm	D16 mm	D50 mm	D84 mm	D16 mm	D50 mm	D84 mm				
San Francisco	Antes Yerba Loca	2,5	63	400	10,7	1,6	38	190	10,9	0,6	1,4	47	8,9	3,53
Yerba Loca	Antes Sn.Fco	4,5	50	160	6,0	0,8	3	13	4	0,5	5	115	15,2	7,55
San Francisco	Antes Central	2,7	63	240	9,4	4,5	50	160	6	2,8	71	300	10,4	2,4
San Francisco	Después Central	3,4	75	250	8,6	1,0	58	210	14,5	1,3	32	125	9,8	2,3
Molina	Antes Sn.Fco	2,1	36	160	8,7	0,75	6,3	35	6,8	1,5	48	220	12,1	1,3
Mapocho	Los Almendros	1,8	80	440	15	0,9	40	200	14,9	2,8	54	220	8,9	2,54
Mapocho	Pte Pastor Fernández	1,3	43	199	12,4	1,5	90	230	12,1	3,4	105	310	9,6	0,8
Arrayán	Antes Mapocho	1,3	32	230	13,3	0,73	20	88	11	1,7	51	130	8,7	1,3
Mapocho	Pasarela Quinchasal	2,0	43	200	10,0	1,7	45	200	11,2	1,3	45	170	11,4	1,72
Las Huaitatas	Antes de Mapocho	2,6	19	62	4,9									
Mapocho	Puente Nuevo	1,6	45	200	11,2									

TABLA N° 3

PARAMETROS GEOMETRICOS MEDIDOS

RIO	Q	R	Fr	R/D84
	m ³ /s	m		
San Francisco	1,11	0,248	0,41	1,39
antes Yerba Loca	1,15	0,282	0,33	1,58
Yerba Loca antes	1,23	0,210	0,80	1,18
San Francisco	0,91	0,373	0,45	2,55
San Francisco	2,56	0,436	0,35	1,77
después Central	1,28	0,278	0,40	1,13
Molina antes	1,16	0,325	0,28	1,32
San Francisco	1,71	0,362	0,30	3,09
Mapocho en	1,92	0,048	0,27	3,49
Los Almendros	1,72	0,368	0,44	3,15
Arrayán en	3,62	0,420	0,47	1,24
La Montosa	1,35	0,268	0,76	1,20
Mapocho en	3,98	0,260	0,58	1,59
Puente Nuevo	2,74	0,216	0,74	1,32
	3,74	0,252	0,55	1,54

TABLA 4
VARIACION DE LA GRANULOMETRIA A LO LARGO DEL CAUCE

SECCION	D16 mm	D50 mm	D84	$\sigma_g: \sqrt{\frac{D84}{D16}}$	i %
San Francisco	1,2	26	178	12,2	3,53
antes Yerba Loca	1,4	7	107	8,7	7,55
Yerba Loca antes	1,5	65	246	12,8	2,4
San Francisco	1,3	24	117	9,5	6,85
San Francisco	1,6	57	339	14,6	2,66
Mapocho en	1,4	52	224	12,7	2,54
Los Almendros	1,5	45	164	10,5	1,72
Arrayán antes					
Mapocho					
Mapocho en					
Puente Nuevo					

5.2 Caracterización Hidráulica

La caracterización hidráulica se logra determinando los factores de conducción hidráulica en cada tramo, lo que se obtiene definiendo el coeficiente de rugosidad n de la relación de Manning. Contando con los levantamientos topográficos y las mediciones correspondientes efectuadas durante los aforos, se determinó el coeficiente de rugosidad calculando un eje hidráulico y comparándolo con el medido. Para ello se utilizó un programa desarrollado en el CRH (Ayala et al 1987), el cual mediante iteraciones sucesivas permite obtener el coeficiente n que aproxima los ejes hidráulicos medidos y calculados. En la Tabla 5 se consignan estos valores de n y, a modo de ejemplo, en la Figura 3 se comparan ejes hidráulicos medidos y calculados.

TABLA 5
COEFICIENTE DE RUGOSIDAD MEDIDO

RIO	UBICACION	n
San Francisco	Antes Yerba Loca	0,048
Yerba Loca	Antes San Francisco	0,118
San Francisco	Después de Central	0,109
Molina	Antes San Francisco	0,228
Mapocho	Los Almendros	0.066
El Arrayán	Antes Mapocho	0,047
Mapocho	Puente Nuevo	0.043

Se eliminaron del análisis los siguientes lugares: estero Las Hualtatas, debido al escaso caudal que imposibilitó su medición, río Mapocho en pasarela Quinchamali porque la sección cambió después de efectuado el levantamiento topográfico y río Mapocho en Puente P. Fernández ya que el río presenta dos brazos

en ese sector. El coeficiente de rugosidad obtenido en las restantes secciones es típico de los escurrimientos de montaña con baja rugosidad relativa (Ayala 1985), y confirma lo determinado para otros ríos similares chilenos (López 1988). También este resultado reafirma que las relaciones usualmente utilizadas para determinar el coeficiente n , no tienen la misma confiabilidad que cuando son aplicadas a lechos no rocosos y de granulometría más fina. De todos modos hay que considerar que esta determinación del coeficiente de rugosidad tiene un grado relativo de incerteza derivado de las condiciones naturales de estos ríos que dificultan la medición óptima de su geometría y, al menos en esta oportunidad, de los bajos caudales debido a lo seco de la estación invernal precedente.

6.- COMENTARIO FINAL

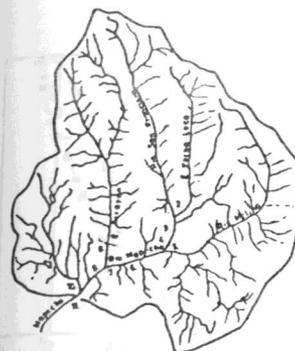
Al presentar los resultados obtenidos en la campaña de terreno efectuada en la hoya alta del río Mapocho, se ha pretendido enfatizar la utilidad de una recopilación sistemática de información topográfica, granulométrica y de caudales en cauces cordilleranos, ya que con ella se puede profundizar en el conocimiento del fenómeno hidráulico y sedimentológico y poder así lograr caracterizar adecuadamente el comportamiento hidráulico y mecánico fluvial de estos ríos. Los resultados obtenidos en este estudio reflejan la incidencia en la granulometría de algunos cauces de afluentes con capacidad de arrastrar sedimentos mayores. Del mismo modo los resultados han confirmado el comportamiento hidráulico de estos escurrimientos macrorugosos. También hay que destacar las dificultades prácticas encontradas para obtener información confiable y las limitaciones que puede tener la interpretación de los datos de terreno. Finalmente se recomienda estandarizar las metodologías de terreno para que la información recopilada constituya un banco de datos homogéneo y confiable.

7.- BIBLIOGRAFIA

- 1.- Ayala L., López A. y Niño Y. (1987) Arrastre de Sedimentos Potencial y Real: una diferenciación básica para la caracterización mecánico-fluvial de cursos torrenciales. VIII Congreso Nacional de Ingeniería Hidráulica, Santiago
- 2.- Ayala L. y Isensee C. (1987) Modelo de Simulación para el Control Fluvial de ríos de fuerte arrastre. Publicación CRH 87-39-I. Centro de Recursos Hidráulicos. Universidad de Chile.
- 3.- Ayala L. (1985) Distribución de Velocidad Factor de Fricción de Escurrimientos Supercríticos sobre Enrocados. Estudios en honor de Francisco J. Domínguez, Anales de la Universidad de Chile. V Serie.
- 4.- C.R.H. (1981) Estudio de la Degradación del Río Maule. Informe de los Estudios de Terreno realizados para determinar las propiedades de los sedimentos del Río Maule.
- 5.- López A. (1988) Velocidades Medias en Ríos con Lecho de Granulometría Gruesa y Extendida. XIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, La Habana Cuba.

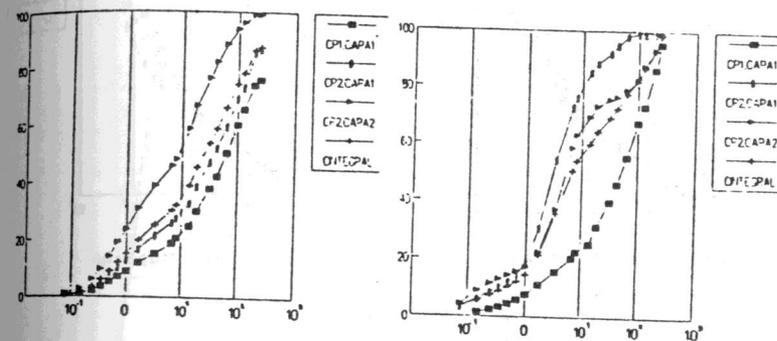
RECONOCIMIENTO

EL presente trabajo se desarrolló como parte del proyecto FONDECYT Nº 1190, el cual es financiado por el Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico y el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Chile.



1. Río San Francisco antes Yerba Loca
2. Yerba Loca antes Sⁿ Fco
3. San Francisco antes Central
4. " " despues Central
5. Molina antes Sⁿ Fco
6. Mapocho en Los Almendros
7. " " Pastor Fernandez
8. El Arrayan antes Mapocho
9. Mapocho en Quinchamali
10. Las Huallatas antes Mapocho
11. Mapocho en Puente Nuevo

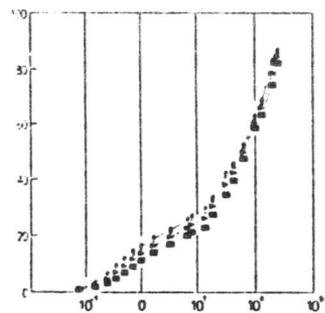
FIG.1 LUGARES DE MUESTREO



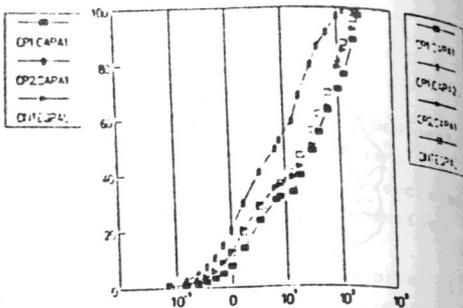
a) San Francisco antes de Yerba Loca

b) Yerba Loca antes de San Francisco

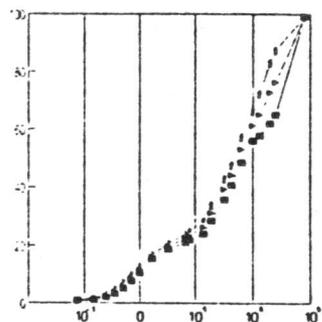
FIG.2 CURVAS GRANULOMETRICAS



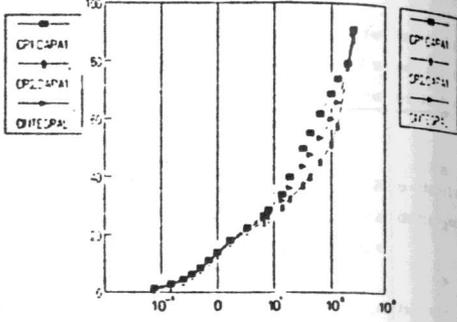
c) Sn. Fco aguas abajo Central



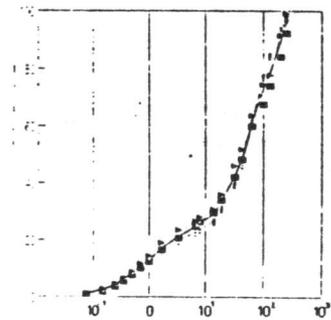
d) Molina antes del San Francisco



e) Mapocho en Los Almendros



f) Arrayán antes Mapocho



g) Mapocho en Puente Nuevo

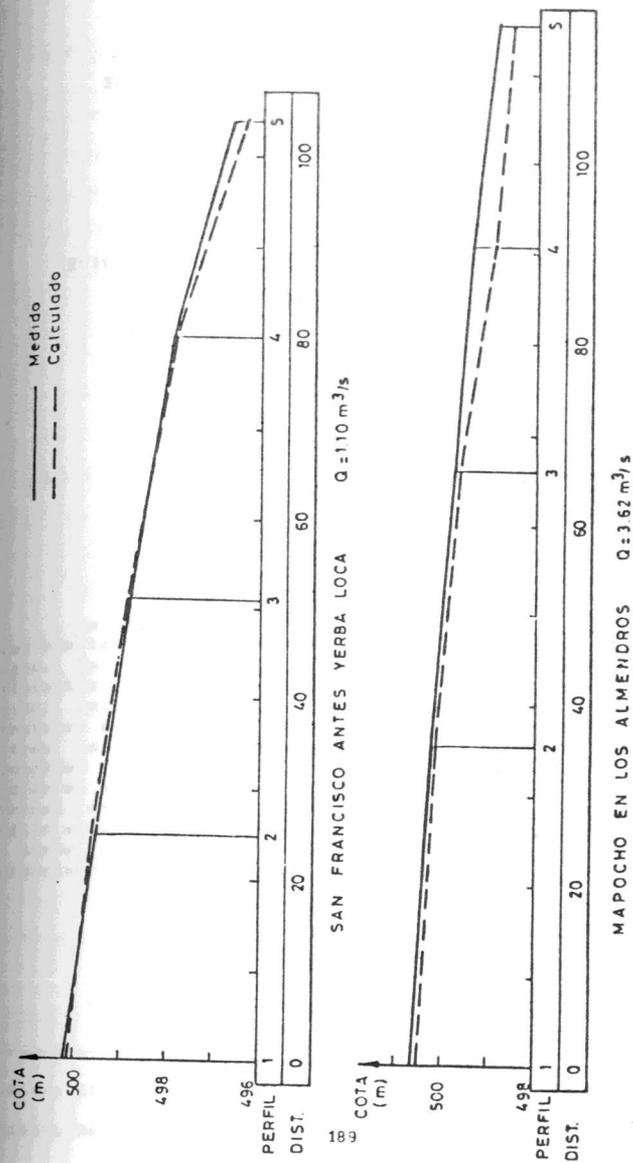


FIG. 3 EJEMPLOS DE EJES HIDRAULICOS MEDIDOS Y CALCULADOS