



Agua



Aeropuertos



Arquitectura



Obras Hidráulicas



Obras Portuarias



Vialidad

INSTITUTO NACIONAL DE HIDRÁULICAS

ESTUDIO

Estudio evaluación y modelación hidráulica-sedimentológica física y matemática del Río Maipo para el seguimiento de Explotaciones de áridos y obras de protección existentes en el sector confluencia Río Clarillo a Puente Naltahua, Región Metropolitana”

ZONA CENTRO



DICIEMBRE DE 2015

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

DIRECCIÓN DE OBRAS HIDRÁULICAS

**“ESTUDIO EVALUACIÓN Y MODELACIÓN HIDRÁULICA-SEDIMENTOLÓGICA
FÍSICA Y MATEMÁTICA DEL RÍO MAIPO PARA EL SEGUIMIENTO DE
EXPLOTACIONES DE ÁRIDOS Y OBRAS DE PROTECCIÓN EXISTENTES EN EL
SECTOR CONFLUENCIA RÍO CLARILLO A PUENTE NALTAHUA, REGIÓN
METROPOLITANA”**



INFORME FINAL

Versión A

<i>Mandante:</i> MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS DIRECCIÓN DE OBRAS HIDRÁULICAS																											
Estudio: ESTUDIO EVALUACIÓN Y MODELACIÓN HIDRÁULICA-SEDIMENTOLÓGICA FÍSICA Y MATEMÁTICA DEL RÍO MAIPO PARA EL SEGUIMIENTO DE EXPLOTACIONES DE ÁRIDOS Y OBRAS DE PROTECCIÓN EXISTENTES EN EL SECTOR CONFLUENCIA RÍO CLARILLO A PUENTE NALTAHUA, REGIÓN METROPOLITANA”						<i>Fecha emisión:</i> 17-12-2015																					
Equipo de Trabajo: <table style="width: 100%; border: none;"> <tr> <td style="width: 35%;">Marcos Díaz</td> <td>Ing. Geomensor</td> </tr> <tr> <td>Fernanda Abarzúa</td> <td>Ing. Civil</td> </tr> <tr> <td>Luis Zamorano</td> <td>Ing. Civil</td> </tr> <tr> <td>Rodrigo Jaramillo</td> <td>Ing. Geomensor</td> </tr> </table>							Marcos Díaz	Ing. Geomensor	Fernanda Abarzúa	Ing. Civil	Luis Zamorano	Ing. Civil	Rodrigo Jaramillo	Ing. Geomensor													
Marcos Díaz	Ing. Geomensor																										
Fernanda Abarzúa	Ing. Civil																										
Luis Zamorano	Ing. Civil																										
Rodrigo Jaramillo	Ing. Geomensor																										
<i>Aprobado por:</i> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <td style="height: 20px;"></td> <td style="height: 20px;"></td> <td style="height: 20px;"></td> <td style="height: 20px;"></td> <td style="height: 20px;"></td> <td style="height: 20px;"></td> <td style="height: 20px;"></td> </tr> <tr> <td></td> <td>Revisión IF</td> <td>F.A.T.</td> <td>M.D.N.</td> <td>L.Z.R.</td> <td>E.S.W.</td> <td>E.O.J</td> </tr> <tr> <td><i>Rev. A</i></td> <td><i>Emitido para</i></td> <td><i>Por INH</i></td> <td><i>V°B° INH</i></td> <td><i>V°B° INH</i></td> <td><i>V°B° INH</i></td> <td><i>V°B° IF</i></td> </tr> </table>															Revisión IF	F.A.T.	M.D.N.	L.Z.R.	E.S.W.	E.O.J	<i>Rev. A</i>	<i>Emitido para</i>	<i>Por INH</i>	<i>V°B° INH</i>	<i>V°B° INH</i>	<i>V°B° INH</i>	<i>V°B° IF</i>
	Revisión IF	F.A.T.	M.D.N.	L.Z.R.	E.S.W.	E.O.J																					
<i>Rev. A</i>	<i>Emitido para</i>	<i>Por INH</i>	<i>V°B° INH</i>	<i>V°B° INH</i>	<i>V°B° INH</i>	<i>V°B° IF</i>																					
<i>Clasificación:</i> Revisión DOH																											

CONTENIDO

1	introducción	7
1.1	Descripción del área de estudio	7
1.2	Alcances del estudio.....	10
1.3	Objetivos	10
2	revisión de antecedentes.....	12
2.1	Antecedentes de la zona de estudio	12
2.1.1	Pendiente del área de estudio	12
2.1.2	Hidrología.....	13
2.1.3	Granulometría	14
	Selección y ubicación de calicatas	14
	Coeficiente de Manning	16
2.1.4	Gasto sólido de Fondo.....	17
2.2	Antecedentes del muro guardaradier	17
2.2.1	Geometría.....	17
2.2.2	Enrocados	18
2.2.3	Hidráulica	18
3	Modelo físico.....	25
3.1	Ley de semejanza.....	26
3.2	Características de las obras a estudiar	28
3.3	Elección de la escala	28
3.3.1	Turbulencia del escurrimiento	29
3.3.2	Semejanza Friccional	30
3.3.3	Efectos de Escala	30
3.4	Análisis de Sedimentos	30
3.5	Curva granulométrica en el modelo físico.....	32
4	Instalación experimental.....	34
4.1	Descripción general	34

4.1.1	Variable de medición e instrumentación	36
4.1.2	Definición de las condiciones de borde	36
4.1.3	Descripción de las experiencias a realizar	38
4.2	Puesta en marcha y verificación	39
5	RESULTADOS	43
5.1	Condiciones de Borde	43
5.2	Eje Hidráulico	44
5.3	Socavaciones	47
6	BIBLIOGRAFÍA	52

ANEXOS

- **Anexo1: Extracto antecedentes**
- **Anexo 2: Modelación 2D Mike 21**
- **Anexo 3: Curvas Granulométricas**
- **Anexo 4: Referencia Escala de sedimentos**
- **Anexo 5: Registro Fotográfico de la construcción.**
- **Anexo 6: Planos**
- **Anexo 7: Registro experiencias.**

INDICE DE FIGURAS

Figura 1-1: Zona de Estudio.....	8
Figura 1-2: Muro guardaradier en funcionamiento (16/08/2008).	9
Figura 1-3: Ubicación de los puentes y obra de protección.	9
Figura 2-1: Perfiles longitudinales aguas arriba del muro guardaradier.	13
Figura 2-2: Sedimentos observados en terreno.....	14
Figura 2-3: Ubicación calicatas.	15
Figura 2-4: Curvas granulométricas de las cuatro calicatas realizadas.....	15
Figura 2-5: Curva granulométricas promedio.	16
Figura 2-6: Esquema de la geometría del muro guardaradier.....	18
Figura 2-7: Fotografía del muro guardaradier construido.....	18
Figura 2-8: Ubicación de perfiles para extracción de resultados, vista en planta.	20
Figura 2-9: Altura de escurrimiento, vista en planta.	21
Figura 2-10: Velocidad de corriente, vista en planta.....	22
Figura 2-11: Altura de Carga, vista en planta.	24
Figura 3-1: Gráfico comparativo de la curva granulométrica del prototipo y la curva del modelo.	33
Figura 4-1: Experiencias tipo I.	38
Figura 4-2: Experiencias tipo II.	39
Figura 4-3: Perfil referencial de la vista en planta que se presenta en Figura 4-4 y Figura 4-5.	40
Figura 4-4: Vista en planta al inicio de la experiencia.	40
Figura 4-5: Vista en planta al final de la experiencia.	40
Figura 4-6: Perfil longitudinal representativo del tramo que se presenta en Figura 4-7.	41
Figura 4-7: Detección del inicio del movimiento de rocas del muro guardaradier. Se muestran cinco instantes de tiempos ordenados cronológicamente de arriba hacia abajo.	41
Figura 5-1: Flujo aguas arriba del muro guardaradier.	44
Figura 5-2: Flujo sobre el muro guardaradier.....	45
Figura 5-3: Flujo Aguas abajo del muro guardaradier.	45
Figura 5-4: Eje Hidráulico Modelo Físico. Experiencia tipo I. Tr=100 años. Arriba, perfil longitudinal referencial. Abajo, gráfico de eje hidráulico medido en el eje central de la sección.	46
Figura 5-5: Topografía medida con el scanner. Arriba condición inicial. Abajo condición final.	47
Figura 5-6: Sedimento lecho móvil experiencia tipo I. Tr=100 años. A la izquierda al inicio de la experiencia. A la derecha, al final de la experiencia.....	49
Figura 5-7: Vista en planta Sedimento Lecho móvil experiencia tipo I. Tr=100 años. A la izquierda al inicio de la experiencia. A la derecha, al final de la experiencia.	49
Figura 5-8: Tres perfiles longitudinales que comparan la cota inicial de la experiencia con la cota al final de la experiencia. La diferencia de cota se presenta en metros en escala prototipo.	50
Figura 5-9: Material removido del tramo de lecho móvil. Experiencia tipo I. Tr=100 años.	51

INDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Caudales de crecidas asociados a distintos periodos de retorno por tramos.	13
Tabla 2-2: Coordenadas calicatas.	14
Tabla 2-3: Altura de carga crítica para crecida con periodo de retorno de 100 años.	23
Tabla 2-4: Altura de carga crítica para crecida con periodo de retorno de 50 años.....	23
Tabla 3-1 Resumen de escalas en modelo físico.....	27
Tabla 3-2: Análisis de escala, dimensiones principales del modelo.	29
Tabla 4-1: Profundidad máxima de socavación al pie del umbral.	35
Tabla 4-2: Condición de Borde aguas Arriba.....	37
Tabla 4-3: Caudales de operación del modelo físico, Río Maipo.....	37
Tabla 5-1: Caudal Modelo Físico Experiencia Tipo I. $Tr=100$ años y $Tr=50$ años	43
Tabla 5-2: Altura. Condición de Borde Aguas Arriba. Experiencia tipo I. $Tr=100$ años y $Tr=50$ años.	43
Tabla 5-3. Velocidad. Condición de Borde Aguas Arriba. Experiencia tipo I. $Tr=100$ años y $Tr=50$ años.....	44
Tabla 5-4: Profundidad de socavación a lo largo de la experiencia tipo I. Arriba $Tr=100$ años y Abajo $Tr=50$ años.	48

1 INTRODUCCIÓN

A lo largo del río Maipo se han construido diversos puentes que conectan la ciudad de Santiago con la zona sur de la región Metropolitana. Los de mayor uso corresponden al puente autopista acceso sur y al puente Maipo Ruta 5. La subestructura de ambos puentes han presentado socavaciones importantes, dejando de manifiesto la necesidad de realizar intervenciones con el fin de mantener la estabilidad y límites de socavación proyectadas para sus pilares.

Con el fin de proteger estas estructuras, se construyen muros guardaradier que cruzan transversalmente el ancho del río. Estos muros se ubican aguas abajo de los puentes y se construyen a base de enrocados, teniendo como finalidad elevar la cota del lecho al generar una zona de menor gradiente que favorece la depositación de sedimentos aguas arriba del muro, ayudando con ello a consolidar la zona degradada en torno a las pilas de los puentes. Debido a que estas obras fueron parte de un plan de emergencia, no fue posible estudiar en profundidad, por ejemplo con un modelo físico, el comportamiento o funcionamiento frente a crecidas de importancia

Por esta razón, la DOH, con el fin de buscar un diseño y optimización de este tipo de estructuras, las que han sido implementadas en distintos lugares y ríos de Chile, y considerando que actualmente, el río Maipo continúa presentando problemas de socavación local en diversos tramos de su recorrido, siendo uno de ellos el sector del puente Maipo (ruta 5), la Dirección de Obras Hidráulica (DOH) ha solicitado al Instituto Nacional de Hidráulica (INH) un estudio de modelación física de la obra de protección, Muro guardaradier, que permita verificar el funcionamiento hidráulico de éste frente a la crecida con periodo de retorno de 50 y 100 años.

1.1 Descripción del área de estudio

El área de estudio se ubica en el río Maipo, a la altura del puente Maipo Ruta 5. En este tramo el río Maipo, administrativamente se encuentra dividido entre las comunas San Bernardo, al norte, y Buin, al sur.

Conforme el levantamiento desarrollado en el presente proyecto, la altimetría de la zona de interés es de aproximadamente 510 metros en el coronamiento del muro existente. En la Figura 1-1 se muestra la ubicación general del río respecto de la zona más consolidada de la región metropolitana y en la Figura 1-3 se muestra la ubicación de los puentes y de la obra de protección.

Desde el punto de vista de la conectividad, la zona del puente de la ruta 5, es una de las más críticas e importantes ya que presenta tres puentes consecutivos, de oriente a poniente, el puente

ferroviario, el de vialidad y el de la autopista Maipo, ruta 5. Las solicitudes hidráulicas a las que se enfrentan las pilas de los puentes antes señalados, sumadas a importantes intervenciones desarrolladas por extracciones de áridos, y otros aspectos, produjo que en Agosto del 2005 una pila del puente ferroviario fallara deteniendo el servicio. Frente a estas circunstancias se decide construir aguas abajo del puente carretero (ruta 5), en Noviembre del mismo año, una estructura del tipo muro guardaradier.

Debido a que esta obra fue parte de un plan de emergencia, no fue posible estudiar en profundidad, por ejemplo con un modelo físico, el comportamiento o funcionamiento frente a crecidas de importancia, como las ocurridas en Mayo y Junio del 2008 que produjeron un doble colapso del muro. El primer colapso ocurrió en mayo del 2008 y cuando estaba a medio reparar, en junio del mismo año, volvió a colapsar. En la Figura 1-2 se muestra el muro guardaradier en funcionamiento.

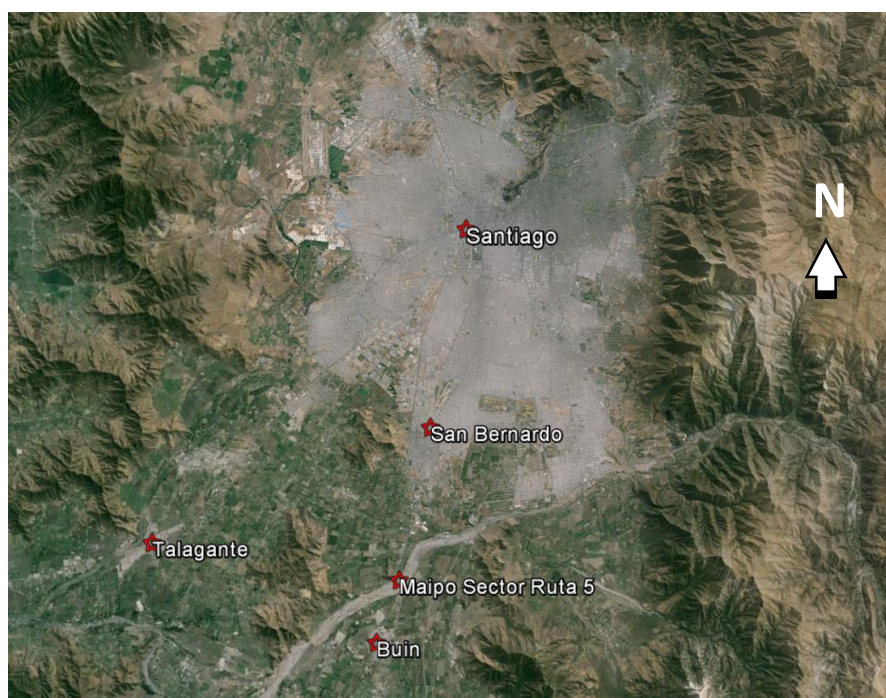


Figura 1-1: Zona de Estudio



Figura 1-2: Muro guardaradier en funcionamiento (16/08/2008).



Figura 1-3: Ubicación de los puentes y obra de protección.

1.2 Alcances del estudio

El estudio de modelación física considera los siguientes alcances:

- El modelo físico se diseña a modo de evaluar el comportamiento hidráulico sobre un muro guardaradier, considerando un perfil longitudinal con pendiente y rugosidad representativas del sector de emplazamiento de la obra.
- En el diseño del perfil longitudinal del modelo físico, no se incluyen las pilas de los puentes que se emplazan aguas arriba del muro guardaradier. Tampoco se contempla la representación de la topografía del cauce aguas abajo del muro guardaradier, dado que está afectada por la construcción del Nuevo Puente Maipo Ruta 5, lo cual queda fuera del alcance de este estudio.
- La construcción del muro guardaradier en el modelo físico, se basa en el diseño original del muro construido aguas abajo del puente Maipo, ruta 5.
- Para la etapa de explotación del modelo, los ensayos contemplados pretenden analizar el funcionamiento de la obra cuando no ha habido deposición aguas arriba, es decir, al inicio de su funcionamiento, y cuando se ha alcanzado una pendiente de equilibrio, es decir, la pared del muro que enfrenta al flujo se encuentra cubierta de sedimentos. Ambos casos se estudian para las condiciones más críticas de altura de escurrimiento y velocidad que se alcanzan en la zona de estudio para las crecidas con periodo de retorno de 50 y 100 años. Debido a la variabilidad de altura y velocidad del flujo en el eje transversal sobre el muro guardaradier, la condición más crítica en el eje transversal se calcula a partir de los resultados de la aplicación de un modelo matemático hidrodinámico (Mike 21 HD FM), como parte de la etapa N°3 del estudio. Dicho modelo representa la topografía actual medida en terreno con un tamaño máximo de celdas de 14 metros, y además incorpora la geometría de las pilas de los 3 puentes ubicados aguas arriba del muro guardaradier, con una resolución espacial máxima de 0.28 m.

1.3 Objetivos

El objetivo principal del estudio consiste en analizar y verificar el comportamiento hidráulico de una sección tipo del muro guardaradier, bajo condiciones que representen la situación más desfavorable que debe resistir el muro guardaradier para la crecida de 50 y 100 años de periodo de retorno.

Los objetivos específicos considerados en este estudio son:

- Construir y operar un modelo físico hidráulico de un perfil representativa del muro guardaradier emplazado aguas abajo del Puente Maipo Ruta 5.

- Determinar y evaluar la estabilidad del muro en función de los pesos de los enrocados que lo componen, para las condiciones de altura y velocidad del escurrimiento que se presentan en eventos de crecida, cuando inicia el funcionamiento de la obra, es decir, cuando comienza la depositación en la cara aguas arriba del muro.
- Determinar y evaluar la estabilidad del muro en función de los pesos de los enrocados que lo componen para las condiciones de altura y velocidad del escurrimiento que se presentan en eventos de crecida, cuando se ha alcanzado una pendiente estable aguas arriba del muro, es decir, aguas arriba se ha producido despositación de sedimentos, elevando la cota del lecho hasta la cota del muro.
- Determinar la socavación máxima al pie del muro guardaradier para condiciones de altura y velocidad del flujo que se presentan en eventos de crecida.
- Proponer modificaciones de mejoramiento a la obra existentes o proponer otra obra de protección, de manera de solucionar los problemas detectados o disminuir sus efectos adversos.

2 REVISIÓN DE ANTECEDENTES

A continuación se presenta una recopilación de los antecedentes geométricos, hidráulicos, hidrológicos y sedimentológicos de la zona en estudio. Entre los antecedentes consultados se encuentra el proyecto “Análisis de Factibilidad de encauzamiento del Río Maipo entre Puente San Ramón y Puente Naltahua” elaborado por AC Ingenieros Consultores Ltda., Estudio sobre los Efectos de las Obras de Toma y Descarga en el Comportamiento Hidráulico-Mecánico Fluvial y Sedimentológico del Río Maipo, a cargo de APRISA-AC Ingenieros Consultores Ltda., Plano PLT/PLG Proyecto de Emergencia: Muro Guardaradier en Río Maipo, Sector Puente Maipo Ruta 5, Minuta Técnica N°014 cd 07/10/2005 Mat. Condición de riesgo de socavación en sistema de puentes ferrocarril-vialidad-autopista central, sobre río Maipo, Minuta Técnica N°18 de 21/11/2005 Mat. Enrocados de piso en torno a pilas puente Autopista del Maipo, Especificaciones Técnicas del Proyecto reparación de Emergencia –Defensas Fluviales Puente Maipo y levantamiento topográfico desarrollado en las etapas anteriores.

2.1 Antecedentes de la zona de estudio

2.1.1 *Pendiente del área de estudio*

El cauce del río Maipo, en la zona del puente Maipo tiene un ancho de 300 metros aproximadamente. Para estimar una pendiente representativa de la zona, a partir de la topografía desarrollada en la Etapa N°1 y N°2, se obtienen siete perfiles longitudinales que representan la condición actual del cauce del río Maipo, es decir, con el muro guardaradier en funcionamiento. Para el desarrollo de este análisis, se dividió en dos áreas, aguas arriba y aguas abajo del muro guardaradier.

En el sector de aguas arriba, de los siete perfiles obtenidos, se debió descartar tres, puesto que corresponden a los extremos en que se presentan singularidades debido a intervenciones humanas, por ello no se consideraron representativos. En el sector de aguas abajo, de los siete perfiles obtenidos, se descartaron 6 perfiles de ellos, puesto que la zona se encuentra muy intervenida producto de la construcción del nuevo puente de la ruta 5.

Es de importancia destacar, que los posibles efectos que el nuevo puente pueda incorporar al sistema no están contenidos dentro de los alcances de este proyecto. En la Figura 2-1 se muestran los perfiles longitudinales considerados en el análisis aguas arriba del muro.

De este análisis, se estima la pendiente promedio de la zona de aguas arriba en 0.0078 y de la zona de aguas abajo en 0.0087.

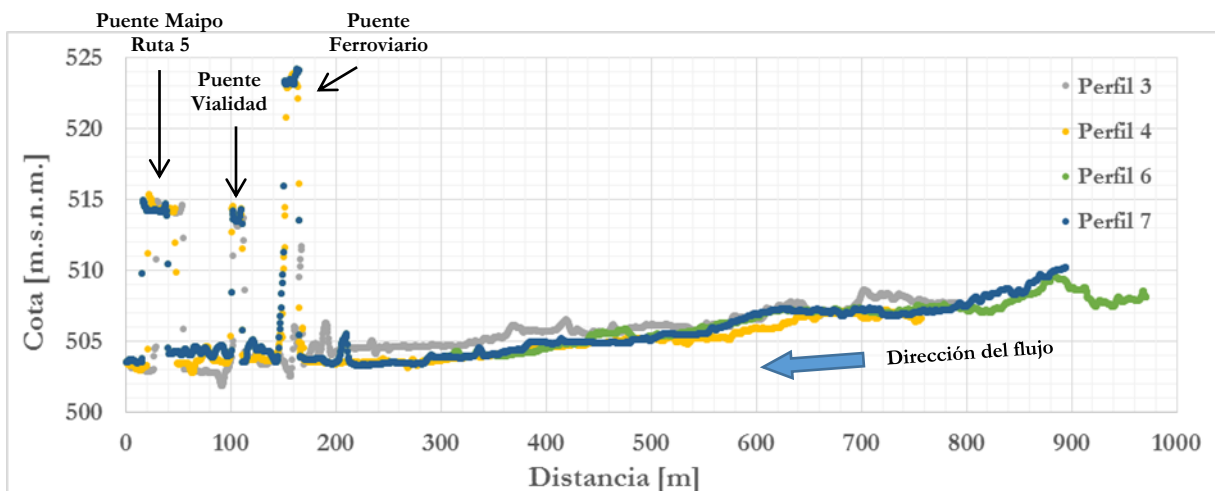


Figura 2-1: Perfiles longitudinales aguas arriba del muro guardaradier.

2.1.2 Hidrología

En el año 2009 la empresa AC Ingenieros elaboró el estudio “Análisis de Factibilidad de Encauzamiento del Río Maipo”. En este estudio se presenta un análisis hidrológico del río Maipo desde el puente San Ramón hasta el Puente Naltahua, que se divide tres tramos, el tramo río Clarillo a Río Angostura es el que incluye la zona en estudio. Los caudales asociados a crecidas con diferentes periodos de retorno se presentan en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1: Caudales de crecidas asociados a distintos periodos de retorno por tramos.

Tramo	Sector hidrológico	Caudales máximos instantáneos (m^3/s)				
		T=10 años	T=25 años	T=50 años	T=100 años	T=200 años
1	Puente San Ramón – Río Clarillo	933	1317	1641	1998	2394
2	Río Clarillo – Río Angostura	1054	1485	1851	2255	2684
3	Río Angostura a Puente Naltahua	1648	2414	3055	3756	4526

Conforme lo solicitado en las bases del contrato, se requiere analizar el comportamiento del muro guardaradier para las crecidas asociadas a los periodos de retorno de 50 y 100 años, por esta razón, sumada a que el estudio de AC ingenieros Consultores es un estudio aprobado por la DOH, para el desarrollo del estudio del modelo físico se utilizarán los caudales de $1851 \text{ m}^3/\text{s}$ y $2255 \text{ m}^3/\text{s}$, que conforme la tabla 2-1 es el que representa al tramo en que se ubica el muro guardaradier.

2.1.3 Granulometría

Selección y ubicación de calicatas

Para caracterizar correctamente el sedimento que debe ser incorporado al modelo físico, el equipo del INH visitó el terreno encontrando que los sedimentos poseen aristas redondeadas, las fracciones más gruesas se observan en los cursos principales del río, al centro del lecho se observa una zona de mayor altura con vegetación al igual que en las riveras norte y sur.

En ambas riveras existen evidencias de intervenciones humanas, como por ejemplo, extracción de áridos. La Figura 2-2 muestra los sedimentos de los dos principales cursos del río dentro del lecho, la zona norte presenta flujo mientras que la zona sur no.



Figura 2-2: Sedimentos observados en terreno

Adicionalmente, se seleccionaron cuatro puntos del cauce donde se realizaron prospecciones sedimentológicas, tres calicatas (C-I, C-II y C-III), fueron realizadas aguas arriba del muro guardaradier y la calicata restante (C-IV), se realizó aguas abajo del muro guardaradier. Se definió de esta manera ya que la zona aguas abajo del muro se encuentra fuertemente intervenida debido a la construcción del nuevo puente de la ruta 5, y por ello la granulometría de calicatas en ese sector podrían estar alteradas por rellenos o material traído externamente. Las coordenadas donde se obtuvo las muestras se registran en la Tabla 2-2.

Tabla 2-2: Coordenadas calicatas.

Calicata	Este	Norte
C-I	340688	6271140
C-II	340777	6271505
C-III	340661	6271301
C-IV	339997	6270710



Figura 2-3: Ubicación calicatas.

En los cuatro puntos se realizaron prospecciones a tres profundidades, 0.5 m, 1.0 m y 1.5m. Luego, los análisis de tamizado y pesaje de sedimentos, se realizaron en el laboratorio de análisis granulométrico del INH. Los resultados de estos análisis se detallan en el Anexo 2. En la Figura 2-4 se comparan las curvas granulométricas de las cuatro calicatas. La curva de cada calicata se obtiene promediando las tres profundidades.

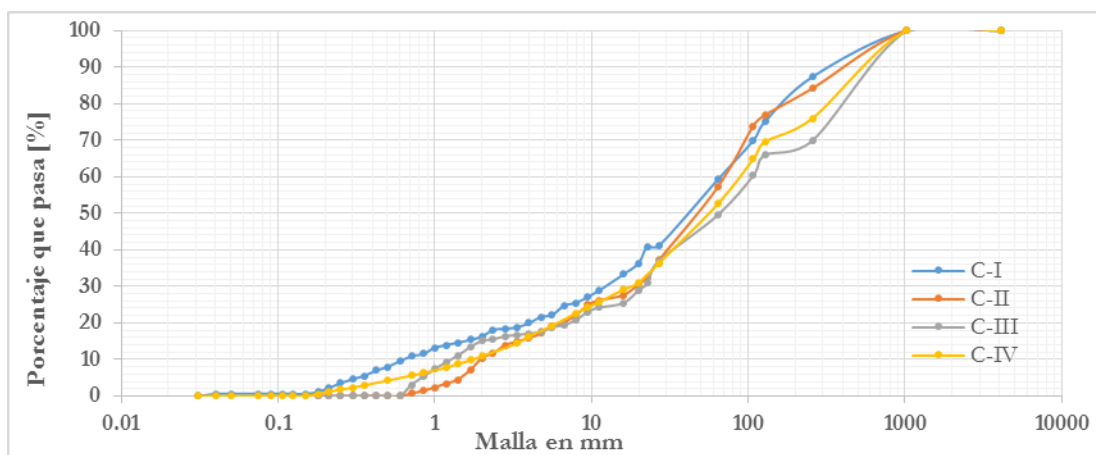


Figura 2-4: Curvas granulométricas de las cuatro calicatas realizadas.

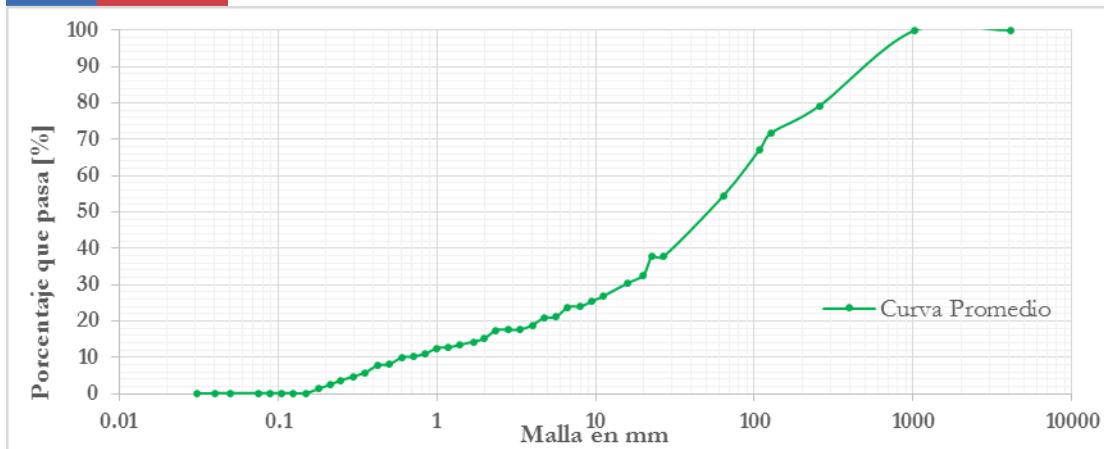


Figura 2-5: Curva granulométrica promedio.

Se observa que las cuatro curvas tienen una buena correlación, presentando mayor dispersión, para los diámetros 1 mm y a los 300 mm aproximadamente. Se determina la curva representativa del lecho como el promedio de las cuatro curvas obtenidas, sin necesidad de aplicar filtros.

La Figura 2-5 muestra la curva promedio considerando las cuatro inspecciones realizadas, y corresponde a una granulometría extendida bien graduada.

Coefficiente de Manning

El coeficiente de Manning se estima relacionando primero un diámetro característico del sedimento con la rugosidad del fondo mediante la expresión propuesta por Strickler (1923) (Ecuación 1). Luego, se estima el coeficiente de Manning en relación a la rugosidad del fondo a partir de la expresión de Manning-Strickler (Brownlie, 1983) (Ecuación 2).

$$\frac{k_s}{d_{50}} = 3,3 \quad (2.1)$$

$$n_0 = \frac{k_s^{\frac{1}{6}}}{8.1g^{0.5}} \quad (2.2)$$

Considerando el d_{50} igual 70 mm, el cual se obtiene del análisis granulométrico de las capas de menos profundidad (0.5 m) de las cuatro calicatas realizadas, se estima k_s y el coeficiente de Manning como:

$$d_{50} = 70 \text{ mm} \Rightarrow k_s = 0.231 \text{ m} \Rightarrow n_0 = 0.031$$

De acuerdo a estos resultados, el coeficiente de Manning adoptado en el modelo para el lecho será de 0.031. No se aplican factores de corrección por vegetación y forma de la sección ya que se estudiará una sección tipo y uniforme.

2.1.4 Gasto sólido de Fondo

Para el cálculo del gasto de sólido se utiliza la expresión de Meyer Peter & Müller (1951) ya que es la fórmula más utilizada en Chile:

$$\frac{q_s}{\sqrt{(s-1)gd_{50}^3}} = \left(\frac{4\tau_0}{\rho(s-1)gd_{50}} - 0.188 \right)^{\frac{3}{2}} \quad (2.3)$$

$$\tau_0 = u_*^2 \rho \quad (2.4)$$

$$u_* = \sqrt{ghi} \quad (2.5)$$

Donde q_s es el gasto volumétrico por unidad de ancho en [m³/s/m], $s = \frac{\rho_s - \rho}{\rho}$ y τ_0 el esfuerzo de corte que el lecho de diámetro d_{50} ejerce sobre el flujo. Considerando el d_{50} igual 70 mm el gasto volumétrico estimado es de 0.097 m³/s/m.

2.2 Antecedentes del muro guardaradier

La función del muro guardaradier es elevar la cota del lecho con el objetivo de contrarrestar la socavación en la zona de las pilas de los puentes. En una primera etapa el muro genera una zona de depositación que rellena el talud de aguas arriba del muro disminuyendo el gradiente de la zona hasta alcanzar una pendiente de equilibrio. En la segunda etapa el muro sostiene esta masa de sedimentos. Las mayores sollicitaciones que resiste el muro ocurren en las crecidas.

2.2.1 Geometría

El muro guardaradier es un muro transversal a lo ancho de todo el río Maipo y se ubica aguas abajo del puente Maipo Ruta 5. Tiene 16 m de largo y está compuesto por cuatro tramos, el primero es un talud que enfrenta al flujo con pendiente adversa 0.6:1(H: V), el segundo es el coronamiento que mantiene una cota constante en sus 4 m de largo, el tercero es un talud de pendiente 1.5:1, y el cuarto, es una cuña de respaldo de 3 m de largo y cota constante. En la Figura 2-6 se muestra un esquema del diseño del muro y en la Figura 2-7 una fotografía de la condición actual del muro construido.

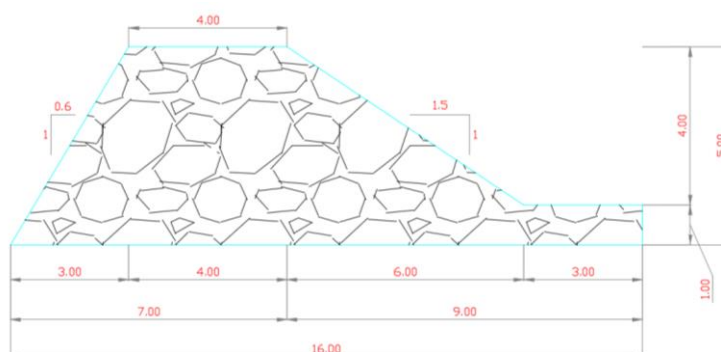


Figura 2-6: Esquema de la geometría del muro guardaradier.



Figura 2-7: Fotografía del muro guardaradier construido.

2.2.2 Enrocados

El muro guardaradier está construido en base a enrocados cuya geometría se aproxima a la de un tronco piramidal o proporciones similares. Las aristas de las rocas son vivas y sus pesos varían entre 500 y 2500 kg. La densidad de la roca es como mínimo de 2.6 ton/m^3 . La roca es de cantera certificada. La colocación de las rocas en el río fue mediante pluma, retroexcavadora y estrobos, minimizando los espacios entre rocas y trabadas adecuadamente aprovechando la gradación de tamaño.

2.2.3 Hidráulica

El comportamiento hidráulico en la zona de estudio del muro guardaradier es caracterizada mediante un modelo numérico efectuado en Mike 21, como parte de la etapa N°3, utilizando el módulo hidrodinámico con malla no estructurada (HD FM) para los eventos de periodo de retorno 50 y 100 años. Los resultados del modelo asociados al caudal de periodo de retorno 100 años, se presentan en función de la altura de escurrimiento, velocidad del flujo y altura de carga, en la Figura 2-9, Figura 2-10 y Figura 2-11, respectivamente. En la Figura de la sección 4.3.1 del Anexo 2 se presenta la diferencia entre las alturas de escurrimiento obtenidas para el periodo de

retorno de 100 años y las asociadas al periodo de retorno 50 años. Mayor información respecto de los resultados y la configuración del modelo se incluyen en Anexo 2.

En general, en relación a las alturas de escurrimiento se puede observar el efecto de peralte del flujo hacia aguas arriba, provocado por la presencia de las pilas de los puentes emplazados en la zona de estudio. En la zona marcada con un rectángulo rojo en la Figura 2-9 se aprecia un aumento de las alturas de escurrimiento, ya que dicha zona se ubica justamente entre la descarga del muro guardaradier y el pretil ejecutado para la actual construcción del Nuevo Puente Ruta 5. Por otra parte, respecto de las velocidades, se observa como en los cauces principales la velocidad varía entre 4 y 6 m/s, mientras que entre las pilas de los puentes el flujo se acelera. Inmediatamente aguas arriba de las pilas se aprecia una disminución de la velocidad del flujo. En la zona marcada con un rectángulo rojo en la Figura 2-10 se observa la aceleración del flujo producto de la descarga del muro guardaradier, y a continuación el efecto de remanso provocado por la presencia del pretil. Inmediatamente aguas abajo del pretil se obtienen altas velocidades, con valores superiores a 7.5 m/s.

En particular, a lo largo de la sección transversal sobre el muro guardaradier se puede apreciar una distribución no uniforme del caudal, caracterizada por la variabilidad obtenida tanto de la altura de escurrimiento como de la velocidad del flujo. Esta condición es esperable, dado que aguas arriba del muro guardaradier el flujo, proveniente de dos brazos principales con distinto caudal y direcciones de flujo, es obstaculizado por la presencia de las pilas de 3 puentes, de distintas secciones, y con espaciamiento variable entre las pilas, además del angostamiento de la sección del cauce en el sector de emplazamiento de la obra.



Figura 2-8: Ubicación de perfiles para extracción de resultados, vista en planta.

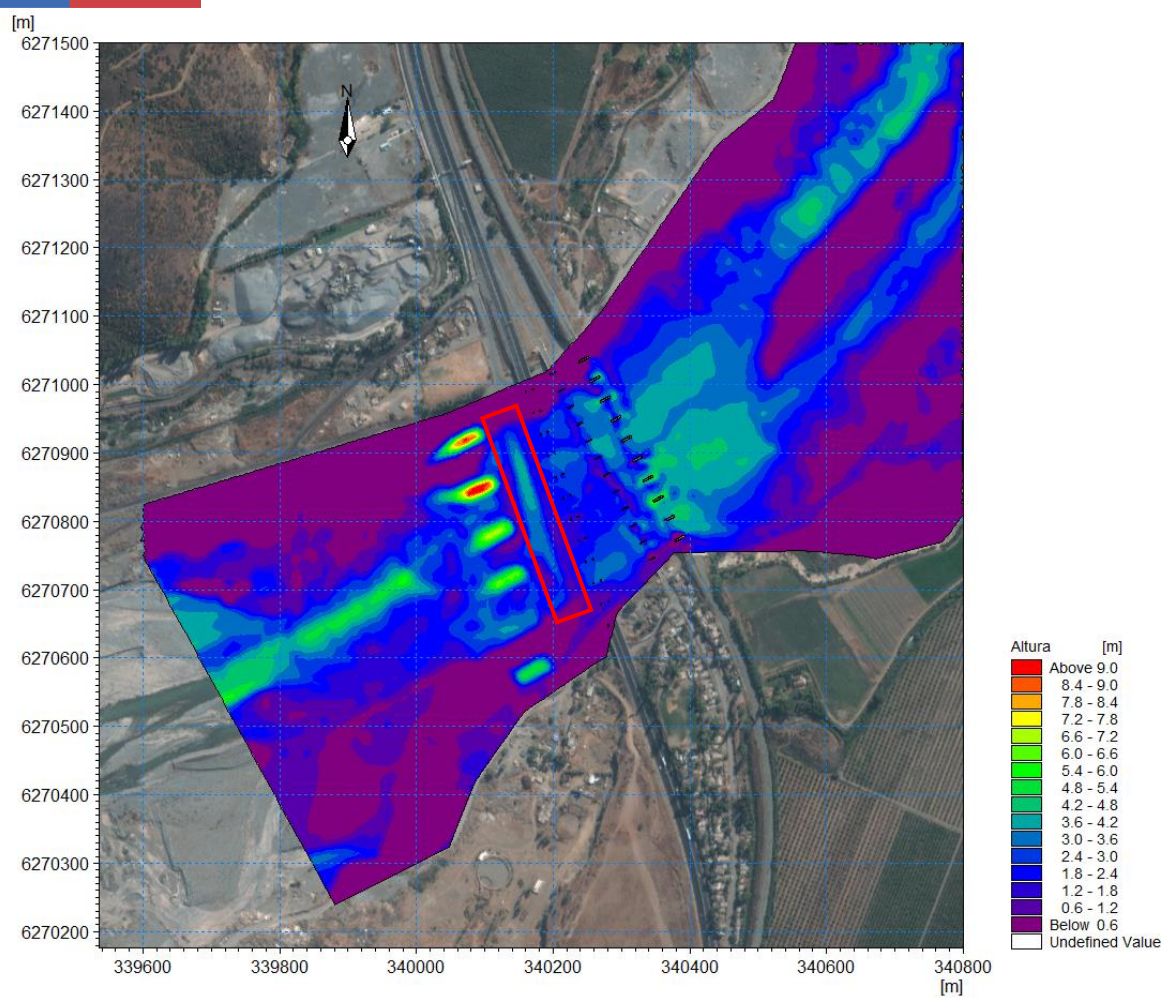


Figura 2-9: Altura de escurrimiento, vista en planta.

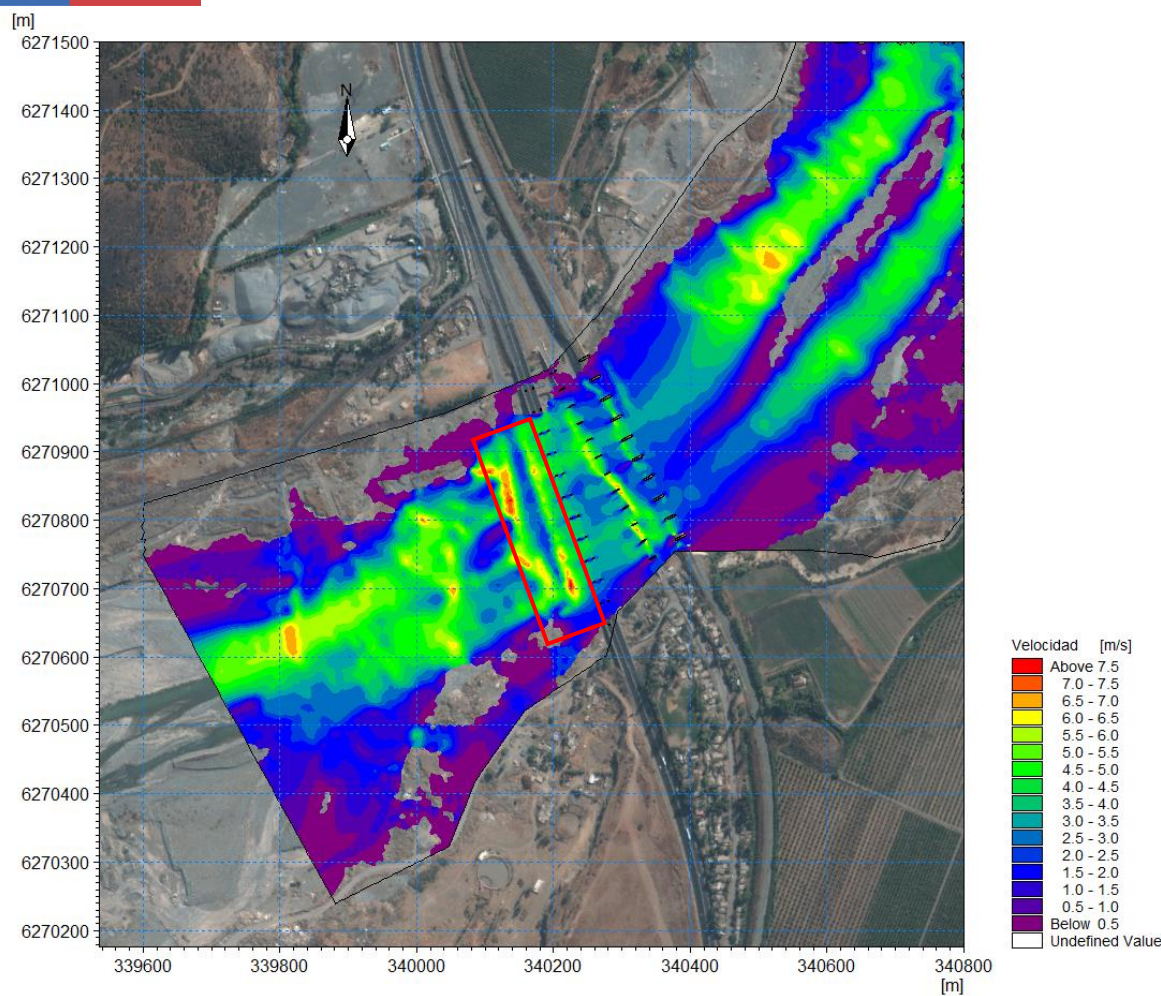


Figura 2-10: Velocidad de corriente, vista en planta.

Dados los resultados descritos anteriormente, con el objeto de determinar las condiciones hidráulicas a ensayar en el modelo físico, se extraen las alturas de escurrimiento y las velocidades en cuatro perfiles transversales discretizados cada 10 metros, dos aguas arriba y dos sobre el muro guardaradier, cuya disposición en planta se observa en la Figura 2-8. En cada punto de los perfiles transversales se calculan las alturas de carga, con la finalidad de obtener la condición más crítica en cuanto a las solicitaciones de esfuerzo sobre el muro guardaradier para los eventos asociados a los periodos de retorno de 50 y 100 años. En la Tabla 2-3 y Tabla 2-4 se presentan la altura de escurrimiento y velocidad máxima y promedio para cada perfil, así como también la altura de carga máxima y promedio. En la Figura 2-11 se presenta la distribución de las alturas de carga en todo el dominio de modelación.

Tabla 2-3: Altura de carga crítica para crecida con periodo de retorno de 100 años.

PERFIL TRANSVERSAL	H_{max}	H_{promedio}	V_{max}	V_{promedio}	Altura de Carga Max [m]	Altura de Carga Promedio [m]
Perfil N°1 aguas arriba muro	3.26	2.01	4.27	2.39	4.19	2.40
Perfil N°2 aguas arriba muro	2.27	1.39	5.42	3.29	3.64	2.09
Perfil N°3 sobre el muro	1.98	1.31	6.83	4.71	3.94	2.58
Perfil N°4 sobre el muro	3.55	2.26	6.71	4.08	4.12	3.19

Tabla 2-4: Altura de carga crítica para crecida con periodo de retorno de 50 años.

PERFIL TRANSVERSAL	H_{max}	H_{promedio}	V_{max}	V_{promedio}	Altura de Carga Max [m]	Altura de Carga Promedio [m]
Perfil N°1 aguas arriba muro	2.98	1.91	4.08	2.68	3.79	2.11
Perfil N°2 aguas arriba muro	2.04	1.26	5.05	3.64	3.26	1.83
Perfil N°3 sobre el muro	1.78	1.15	6.48	4.66	3.53	2.28
Perfil N°4 sobre el muro	3.32	2.06	6.28	3.86	3.78	2.84

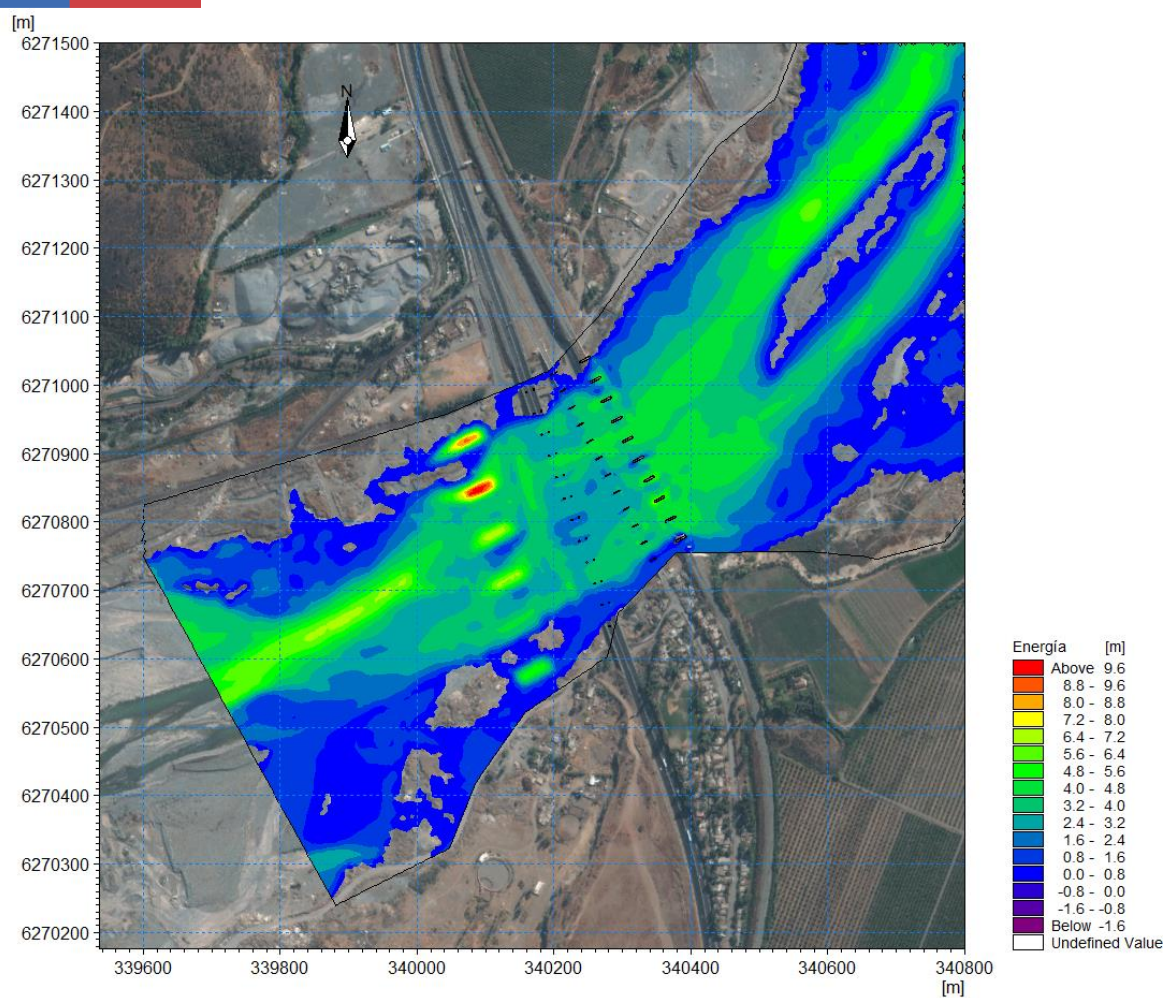


Figura 2-11: Altura de Carga, vista en planta.

3 MODELO FÍSICO

Un modelo físico es una representación a escala de un sistema o fenómeno, el cual permite visualizar y estudiar un proceso físico en un ambiente controlado. Estos modelos pueden ser utilizados con distintos objetivos, siendo uno de ellos el análisis del funcionamiento y la optimización de diseños, previo a su construcción o funcionamiento. Desde el punto de vista hidráulico, un modelo físico sirve para replicar las condiciones de flujo de un sistema hídrico y estudiar el comportamiento durante su diseño o modificación. Adicionalmente, estos modelos a escala permiten estudiar eventos especiales al imponer condiciones de funcionamiento que podrían causar problemas o daños.

Un modelo físico debe actuar como un dispositivo de precisión, permitiendo predecir el comportamiento de un fenómeno físico. Es importante que las mayores fuerzas dominantes actuando sobre el sistema estén representadas en una correcta proporción respecto del sistema real (Hughes, 1993), de forma que los fenómenos observados y las mediciones realizadas entreguen resultados confiables. Se dice que las condiciones de flujo en un modelo físico representan a las del prototipo si el modelo muestra similitud de forma (geométrica), similitud de movimiento (cinemática) y similitud de fuerzas (dinámica).

La similitud geométrica se obtiene cuando la relación entre el prototipo y el modelo son iguales para todas las dimensiones lineales (Gotvassli, 2013). La similitud cinemática se caracteriza por una similitud en el movimiento de las partículas en el prototipo y el modelo. Esta similitud existe cuando la relación entre las componentes de todos los vectores de movimiento son iguales para todas las partículas durante todo el tiempo (Hughes, 1993). La similitud dinámica indica que sobre partículas homologas actúan fuerzas homologas, manteniendo una relación constante entre ellas. Debido a la imposibilidad de homologar la totalidad de las fuerzas actuando sobre el sistema, se debe representar el efecto dominante tratando de reducir los efectos de escala.

En el caso de escurrimientos en superficie libre, las fuerzas predominantes son las fuerzas de gravedad e inercia que origina el movimiento y la fuerza de roce que se opone al movimiento. A pesar de que existen otras fuerzas que influyen en el escurrimiento, tales como las de origen viscoso y las de tensión superficial, estas intervienen en un menor grado por lo que pueden ser despreciadas. Considerando que el fenómeno que se desea estudiar es un escurrimiento en superficie libre, el modelo debe ser construido a semejanza de Froude y manteniendo constante los aspectos relativos a la fuerza de roce. Lo anterior implica que el número de Froude y el coeficiente de roce se deben preservar, es decir, debe ser el mismo en el prototipo y el modelo. Adicionalmente, el régimen de escurrimiento debe ser el mismo, el cual se define dependiendo del número de Reynolds.

3.1 Ley de semejanza

Para establecer similitud entre prototipo y modelo se definen las escalas dependiendo de las variables que se desean estudiar. Si consideramos $a(x, y, z, t)$ una variable cualquiera del prototipo, y sea $a'(x', y', z', t')$ la misma variable en el modelo, se define la escala de a (λ_a) como:

$$\lambda_a = \frac{a(x, y, z, t)}{a'(x', y', z', t')} \quad (3.1)$$

Considerando los supuestos explicados anteriormente, el presente estudio se realiza asumiendo que el número de Froude debe conservarse en el prototipo y modelo. Por esta razón, se debe cumplir el siguiente criterio:

$$\lambda_{Fr} = \frac{Fr_m}{Fr_p} = 1 \quad (3.2)$$

donde Fr_p y Fr_m corresponden al número de Froude en el prototipo y modelo, respectivamente.

Utilizando la definición del número de Froude se obtiene lo siguiente:

$$Fr^2 = \frac{u^2}{gL} \Rightarrow \lambda_{Fr^2} = \frac{\lambda_u^2}{\lambda_g \lambda} = 1 \quad (3.3)$$

donde u es la velocidad media del flujo, g la aceleración de gravedad y L corresponde a una longitud característica. De igual modo, λ_u , λ_g y λ corresponden a las escalas asociadas a cada una de dichas variables.

Es claro que la aceleración gravitatoria es la misma en prototipo y modelo, por lo que el factor de escala para la gravedad es igual a la unidad ($\lambda_g = 1$). Luego, considerando λ como la escala de longitud, se obtiene la siguiente relación para la escala de velocidades:

$$\lambda_{Fr} = \frac{\lambda_u^2}{1 \cdot \lambda} = 1 \Rightarrow \lambda_u = \sqrt{\lambda} \quad (3.4)$$

La similitud en el régimen de escurrimiento depende del número de Reynolds. Este número adimensional relaciona la inercia y las fuerzas viscosas mediante la relación que se muestra en la Ecuación 6.5, siendo u la velocidad del flujo, L una longitud característica (como altura de escurrimiento o radio hidráulico en canales) y ν la viscosidad cinemática del fluido. En el modelo se trabaja con el mismo fluido presente en el prototipo (agua), por lo que la escala de

viscosidad es $\lambda_v = 1$. Considerando lo anterior, se obtiene la siguiente relación para el factor de escala del número de Reynolds:

$$Re = \frac{uL}{\nu} \Rightarrow \lambda_{Re} = \frac{\lambda_u \lambda}{\lambda_v} = \lambda^{3/2} \quad (3.5)$$

donde λ_{Re} corresponde a la escala asociada al número de Reynolds.

Además, el caudal se puede calcular como $Q = uA$, siendo u la velocidad media del flujo y A el área de la sección transversal del escurrimiento. Utilizando esta definición y considerando que la escala del área es $\lambda_A = \lambda^2$, la escala de caudales, λ_Q , cuando hay semejanza de Froude queda determinada por:

$$\lambda_Q = \lambda_u \lambda_A = \lambda_u \lambda^2 \Rightarrow \lambda_Q = \lambda^{5/2} \quad (3.6)$$

Finalmente, utilizando la ecuación de Manning se puede obtener el factor de escala para el coeficiente de rugosidad. La pendiente del plano de carga debe conservarse en el modelo para replicar la pérdida de carga del prototipo, por lo que $\lambda_J = 1$. Tomando esto en cuenta, se obtiene la siguiente relación:

$$n = \frac{J^{1/2} A^{5/3}}{Q P^{2/3}} \Rightarrow \lambda_n = \frac{\lambda_J^{1/2} \lambda_A^{5/3}}{\lambda_Q \lambda_P^{2/3}} = \lambda^{1/6} \quad (3.7)$$

donde P es el radio hidráulico.

En resumen, las relaciones de escala para un modelo físico construido con semejanza de Froude se presentan en la Tabla 3.1.

Tabla 3-1 Resumen de escalas en modelo físico.

Variable		Escala	Relación
Longitud	L	λ	λ
Superficie	A	λ_A	λ^2
Velocidad	v	λ_v	$\lambda^{0.5}$
Tiempo	t	λ_t	$\lambda^{0.5}$
Caudal	Q	λ_Q	$\lambda^{2.5}$
Reynolds	Re	λ_{Re}	$\lambda^{1.5}$
Rugosidad	n	λ_n	$\lambda^{\frac{1}{6}}$

3.2 Características de las obras a estudiar

El modelo físico del muro guardaradier del río Maipo pretende estudiar el funcionamiento hidráulico de la obra en una sección tipo perpendicular al muro y representativa de la pendiente del cauce. En particular, se desea observar, el comportamiento del muro para las condiciones de escurrimiento asociadas a un periodo de retorno de 50 y 100 años en cuanto a:

- Profundidad de la socavación al pie del muro.
- Resistencia del muro al inicio de su funcionamiento, es decir, cuando la pared de aguas arriba enfrenta al flujo.
- Resistencia del muro en su condición actual, es decir, cuando la zona de aguas arriba del muro está colmatada hasta la altura del muro.

3.3 Elección de la escala

En los fenómenos hidráulicos con escurrimientos en superficie libre, al ser las fuerzas gravitacionales e inerciales las que dominan el sistema, el estudio se realiza a semejanza de Froude. Esta condición indica que el número de Froude en el modelo debe ser el mismo que en el prototipo.

$$Fr_p = Fr_m \quad (3.8)$$

La escala geométrica del modelo físico (λ) y la ley de semejanza adoptada permiten obtener relaciones con el resto de las variables que intervienen en el fenómeno hidráulico de interés como lo muestra la Tabla 3-1.

Intuitivamente, escalas más grandes permiten representar los fenómenos cuya dimensión son del orden del prototipo, sin embargo, variables como tiempos, costos y capacidad de las instalaciones limitan este anhelo.

El equilibrio entre estos dos aspectos que apuntan en sentido contrario se obtiene considerando los siguientes criterios.

- Turbulencia del escurrimiento
- Semejanza Friccional
- Efectos de escala

De acuerdo a la experiencia del instituto los modelos físicos varían entre las escalas 1:20 y 1:80, en este caso, dado que se estudia una obra de enrocados se busca la mayor escala posible que

nos permita manipular y trabar las rocas tal como se construyó en prototipo. Por esta razón, la principal limitación es la capacidad de bombeo del galpón, cuyo máximo es de 250 l/s. A continuación se presenta un análisis de las variables fundamentales del modelo para distintas escalas.

Tabla 3-2: Análisis de escala, dimensiones principales del modelo.

T=100 años	Prototipo	Escala Modelos		
		30	20	15
Nº Froude (Fr)	1.27	1.27	1.27	1.27
Ancho (B) [m]	20	0.67	1.00	1.33
Altura (H) [m]	2.05	0.07	0.10	0.14
Velocidad (v) [m/s]	5.7	1.04	1.27	1.47
Tiempo (t) [s]	12	0.07	0.13	0.21
Coefficiente de Manning (n)	0.03	0.017	0.018	0.019
Dimensiones de las rocas [m]	1.4	0.047	0.070	0.093
	0.2	0.007	0.010	0.013
	0.6	0.020	0.030	0.040
Nº de Reynolds (Re)	1.15E+07	7.00E+04	1.29E+05	1.98E+05
Nº de Reynolds de la partícula (Re*)	6.49E+05	3.95E+03	7.26E+03	1.12E+04

Finalmente, se adopta la escala geométrica $\lambda = 1:20$ ya que está dentro de la capacidad de bombeo del galpón y porque se obtiene dimensiones razonables de las rocas para el muro de enrocados (del orden de los centímetros).

3.3.1 Turbulencia del escurrimiento

A partir de los resultados del eje hidráulico presentados en los antecedentes, se estima que el número de Reynolds asociado al caudal de la crecida con 100 y 50 años periodo de retorno es de aproximadamente $1.1 \cdot 10^7$ y $6.21 \cdot 10^6$ respectivamente, lo que indica que el régimen de escurrimiento es turbulento para el caudal de diseño.

Para minimizar los efectos de escala asociados a la viscosidad, innumerables publicaciones establecen como recomendación que la turbulencia del escurrimiento debe ser la misma en el modelo y prototipo, es decir, régimen turbulento en el caso del presente estudio. El régimen de flujo depende del valor del número de Reynolds. En el caso de escurrimientos en superficie libre, al utilizar el radio hidráulico como longitud característica, el rango en que se produce la transición de laminar a turbulento es de 500 hasta 12500 (Chow, 1994). En la realidad no existe un límite superior definitivo, siendo el valor más usual 2000. Al usar este valor extremo superior para asegurar el régimen de escurrimiento en todo el canal, resulta lo siguiente:

$$\lambda_{Re} = \frac{Re_p}{Re_m} = \lambda^{3/2} \Rightarrow Re_m = 1.29 * 10^5 \geq 2000 \text{ para } Tr = 100 \text{ años} \quad (3.9)$$

$$\Rightarrow Re_m = 6.94 * 10^4 \geq 2000 \text{ para } Tr = 50 \text{ años}$$

Entonces, el flujo en el modelo será un escurrimiento en régimen turbulento.

3.3.2 *Semejanza Friccional*

El lecho natural será modelado con material seleccionado fijado con laca. La selección del material para el lecho se realiza de acuerdo a la granulometría representativa de los sedimentos, lo cual se logra escalando las características de los sedimentos presentes en el sector (Capítulo 3.4).

3.3.3 *Efectos de Escala*

En Heller (2011) se establece que en vertederos de pared gruesa se debe tener una altura de escurrimiento sobre el vertedero mayor a 7 cm, en este caso, el muro se puede asimilar a un vertedero. El modelo cumple con esta condición ya que la altura estimada sobre el muro en el modelo es de 10 cm.

De acuerdo a la revisión bibliográfica realizada para el estudio de estabilidad de enrocados se utilizan en modelo físicos rocas entre 15 mm y 5 mm. Con la escala escogida, los enrocados en modelo, tendrán dimensiones del orden de centímetro por lo que están dentro del rango utilizado en estudios anteriores.

Por ambas razones, se concluye que los efectos de escala del modelo no alterarán los fenómenos en estudio de forma significativa.

3.4 **Análisis de Sedimentos**

El Río Maipo presenta un lecho natural en el tramo estudiado, razón por la cual el sedimento presente en el cauce puede estar sujeto a arrastre de fondo. En el modelo físico esta condición se representa considerando un lecho de material seleccionado fijado con laca y un material escalado incorporado en el extremo de aguas arriba del modelo. Esta configuración resulta adecuada ya que en las experiencias no se busca analizar la evolución local de las formas de fondo del cauce, sino ver la dinámica del transporte de sedimentos hacia aguas abajo.

La selección del material del lecho se realiza de acuerdo con la granulometría representativa de los sedimentos. El efecto de escala en el modelo físico debe considerar que las partículas utilizadas se mantengan en el fondo y no entren en suspensión. Considerando lo anterior, la condición de transporte de fondo se verifica a través de dos análisis: primero se analiza si las partículas existentes están sujetas a arrastre de fondo, lo cual se realiza estimando el esfuerzo de corte crítico necesario para que las partículas de fondo comiencen a moverse, y posteriormente se analiza su efecto en distintos tamaños de partícula, de forma de definir un tamaño límite para el transporte en suspensión.

La condición necesaria para que las partículas comiencen a moverse se analiza utilizando los conceptos desarrollados por Shields y extendidos por otros autores, los cuales consideran una relación entre el número de Reynolds de la partícula (Re_p) y el esfuerzo de corte adimensional (τ_*) para la condición de inicio de movimiento de una partícula. El esfuerzo de corte adimensional crítico (τ_{*c}), definido como el esfuerzo de corte adimensional necesario para el inicio del movimiento de una partícula, se calcula utilizando la fórmula de Brownlie (1981). Esta ecuación es un ajuste matemático a la banda de transporte presente en el diagrama de Shields y se define de la siguiente forma:

$$\tau_{*c} = 0.22Re_p^{-0.6} + 0.06\exp(-17.77Re_p^{-0.6}) \quad (3.10)$$

El número de Reynolds de la partícula (Re_p) se obtiene de la expresión:

$$Re_p = \frac{\sqrt{gRh}d_s}{\nu} \quad (3.11)$$

Donde g es la aceleración de gravedad, $R = (\rho_s - \rho)/\rho$ es la densidad relativa del sedimento sumergido, d_s el diámetro característico del sedimento y ν la viscosidad cinemática del agua.

Para determinar si el lecho presenta transporte de fondo se compara el esfuerzo de corte crítico con el esfuerzo de corte adimensional actuando el fondo del río:

$$\tau_* = \frac{\gamma R_H J}{\gamma R d} = \frac{R_H J}{R d_s} \quad (3.12)$$

Donde $\gamma = \rho g$ es la densidad específica del fluido, R_H es el radio hidráulico y J la pendiente del radio de carga.

Las condiciones del flujo asociadas a las crecidas se obtienen utilizando los ejes hidráulicos del prototipo estimados a partir del modelo 2D implementado en Mike 21.

Con este análisis se verifica que el lecho está sujeto a transporte de sedimentos. Considerando que existe una condición suficiente para el transporte de sedimentos se procede a determinar el

tamaño mínimo de la partícula que puede ser utilizada en el modelo físico, esto tiene por objetivo evitar que las partículas más pequeñas del prototipo entren en suspensión, asegurando el arrastre de fondo en todo momento.

La condición crítica para la suspensión queda definida por la siguiente relación (Niño y García, 1998; López y García 2001).

$$\frac{u_*}{v_s} = 1 \quad (3.13)$$

Donde v_s es la velocidad de sedimentación y u_* la velocidad de corte del flujo. La velocidad de sedimentación se estima utilizando la fórmula propuesta por Chang (1997) y la velocidad de corte con la siguiente ecuación.

$$u_* = \sqrt{gR_HJ} \quad (3.14)$$

De este análisis se decide limitar la granulometría representada en el modelo a partículas mayores o iguales a 0.5 mm.

Finalmente, para escalar la curva granulométrica se utiliza la escala geométrica ya que, tal como se comentó en el capítulo 2, para el cálculo de gasto de fondo se utiliza la ecuación de Meyer Peter & Müller, y según el criterio de igual potencia de arrastre de López (1973), para esta ecuación la escala de sedimento coincide con la escala geométrica. (Referencia se incluye en Anexos 4).

3.5 Curva granulométrica en el modelo físico.

A partir del criterio que se expone en el punto anterior se obtiene la siguiente curva sedimentológica para la reproducción del lecho móvil en el modelo físico. La Figura 3-1 muestra sobre el mismo plano, la curva granulométrica promediada en prototipo y la escalada. Se debe tener en consideración que la fracción fina de la curva del modelo se corta en 0.5 mm de acuerdo a lo establecido en el punto anterior.

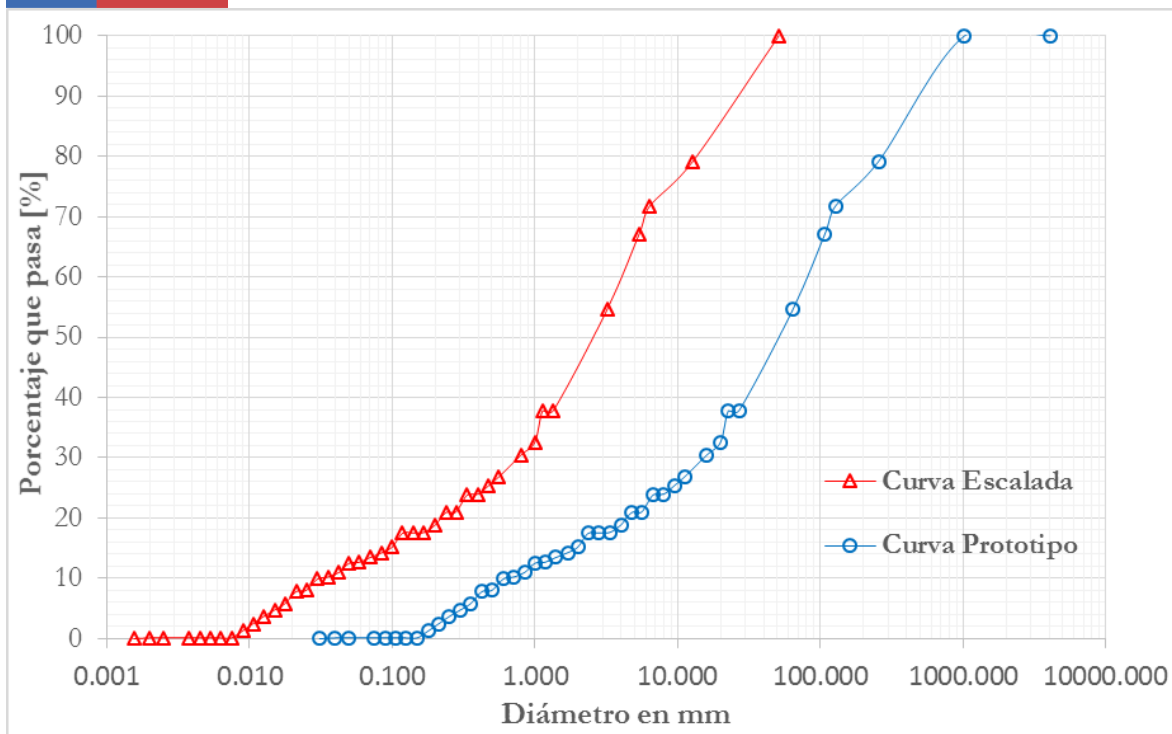


Figura 3-1: Gráfico comparativo de la curva granulométrica del prototipo y la curva del modelo.

4 INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

4.1 Descripción general

Se construye un modelo físico que representa un tramo del muro guardaradier montado en una sección tipo perpendicular al mismo. Esta sección representa la pendiente promedio del lecho en la zona de la ruta 5 del río Maipo. La construcción busca reproducir las características del muro guardaradier y la rugosidad del lecho. Considerando la escala de longitudes 1:20 el muro guardaradier tiene un largo de 0.80 m, ancho de 1 m y alto de 0.25 m. La construcción tiene un largo total de 14 m, 7 aguas arriba del muro y 6 metros aguas abajo.

La captación de agua es en una sentina disponible en el laboratorio. Esto se realiza a través de dos bombas adecuadas para elevar el rango de caudales con los que opera el modelo. El agua es conducida al estanque de alimentación a través de tuberías en la que se instalan flujómetros electromagnéticos para medir el caudal entrante. El estanque de carga considera un aquietador para disminuir la turbulencia del flujo. Además, se dispone de una compuerta de entrada que permite controlar las condiciones iniciales del flujo e imponer las condiciones de borde. Aguas abajo de la compuerta se instala el sistema de alimentación del caudal sólido.

La sección tipo a estudiar corresponde a una sección rectangular de ancho constante e igual a 1 m y altura de 0.7 m. La pendiente en el tramo aguas arriba del muro guardaradier es de 0.0078 y en el tramo aguas abajo del muro guardaradier es de 0.0087.

El modelo representa el lecho de río considerando un tramo inicial (aguas arriba del muro) representado por la curva granulométrica escalada y cuyos sedimentos se fijan con laca. Esta condición permite representar la rugosidad del tramo según la granulometría existente. Luego un segundo tramo de dos metros con lecho móvil, de 0.7 m de profundidad (aguas abajo del muro) y finalmente un tercer tramo con las mismas características del tramo inicial.

La profundidad de la zona del lecho móvil se definió mediante el cálculo de la socavación al pie de un umbral. Para esto se utilizaron dos ecuaciones, la fórmula de Ivanissevich (1980) válida para el caso que se tiene flujo supercrítico sobre el umbral y aguas abajo del umbral y la fórmula de Bormman y Julien (1991) que corresponde al caso de flujo crítico o supercrítico que se sumerge en el escurrimiento de aguas abajo.

Fórmula de Ivanissevich (1980)

$$\frac{s_{max}}{h_0} = 1.04 C_v^{1.5} \left(\frac{v_0^2}{2gh_0} \right)^{0.75} \left(\frac{h_0}{d_{90}} \right)^{0.5} \quad (4.1)$$

Fórmula de Bormann y Julien (1991)

$$s_{max} + D_p = K (h_0 v_0)^{0.6} \left(\frac{v_0}{g^{0.8} d_{90}^{0.4}} \right) \text{sen}(\beta) \quad (4.2)$$

$$K = C_d^2 \left(\frac{\rho \text{sen}(\phi)}{\text{sen}(\phi + \beta) C_f (\rho_s - \rho)} \right)^{0.8} \quad (4.3)$$

$$\beta = 0.32 \text{sen}(\alpha_b) + 0.15 \ln \left(1 + \frac{D_p}{h_0} \right) + 0.13 \ln \left(\frac{h_d}{h_0} \right) - 0.05 \ln \left(\frac{v_0}{\sqrt{gh_0}} \right) \quad (4.4)$$

Donde:

- s_{max} : Socavación máxima [m]
- D_p : Caída entre el umbral y el lecho de aguas abajo [m]
- h_0 : Altura de escurrimiento sobre el umbral [m]
- C_v : Coeficiente de velocidad que varía entre 0.9 y 1.
- v_0 : Velocidad sobre el umbral [m/s]
- C_d : Coeficiente de Difusión del chorro (se considera 1.8).
- ϕ : Ángulo de reposo del sedimento [°]
- C_f : Coeficiente de relación friccional (Se considera 2)
- α_b : Ángulo que forma el paramento horizontal de la estructura con la horizontal [°]
- h_d : nAltura de escurrimiento aguas abajo [m]

Tabla 4-1: Profundidad máxima de socavación al pie del umbral.

Fórmula	Socavación Máxima [m]	
	Prototipo	Modelo
Ivanissevich (1980)	5.118	0.470
Bormann y Julien (1991)	1.774	0.114

Resolviendo estas ecuaciones se obtienen los resultados de la Tabla 4-1. A partir de estas estimaciones se determina que la profundidad de la fosa de lecho móvil sea de 70 centímetros.

Al final del tramo de estudio se construye un estanque sedimentador que actúa como trampa de sedimentos donde se acumula el material arrastrado, al final de este estanque se instala una clapeta para controlar el desagüe del modelo e imponer la condición inicial y de borde del modelo. Finalmente, el agua es restituida a la sentina a través de un canal de retorno. La disposición general de los elementos incluidos en el modelo físico se presentan en el plano N°1, Anexo 6.

4.1.1 *Variable de medición e instrumentación*

En cada una de las experiencias se realiza una serie de mediciones que permiten caracterizar el escurrimiento bajo distintas condiciones y el comportamiento de la obra. Las variables que se consideran en este estudio son las siguientes:

- Verificación de los caudales de entada al estanque de alimentación.
- Altura de escurrimiento y velocidad en una sección de control.
- Ubicación en planta del enrocado al finalizar la experiencia, distinguiendo cuatro colores de rocas asociados a cuatro rangos de pesos, de menor a mayor, blanco, verde, rojo y azul.
- Descripción cualitativa del transporte de sedimentos.
- Descripción de la fosa de socavación al finalizar la experiencia.

El modelo físico cuenta con la instrumentación requerida para medir las variables antes descritas. En el caso del caudal, estos son impulsados por dos bombas centrífugas desde una sentina hasta el estanque de carga. El rango de operación de las bombas considera las condiciones representativas de las crecidas con periodo de retorno de 50 y 100 años. El caudal es medido utilizando flujómetros inductivos, ambos ubicados en las tuberías de descarga al estanque de entrada.

La altura de escurrimiento en la sección de control se registra utilizando un limnómetro y la velocidad promedio se mide mediante un Micromolinete. Adicionalmente, la observación y caracterización de los enrocados del muro guardaradier se registra con cámara de video. Al finalizar la experiencia, se obtiene las dimensiones de la socavación con un scanner, que permite comparar la situación al inicio de la experiencia con la final.

4.1.2 *Definición de las condiciones de borde*

Ante la falta de mediciones en terreno, la condición de borde del caudal líquido se estima mediante modelación numérica 2D implementada en Mike 21. Para la construcción de este modelo numérico se utiliza la modelación elaborada en la etapa N°3, y además, se incluyen las pilas aguas arriba del muro guardaradier. En el Anexo 2 se describe en detalle la modelación numérica elaborada.

La sección del lecho del río Maipo no es uniforme, lo que causa que el flujo se distribuya de forma diferenciada a lo ancho del muro guardaradier. Por esta razón, la condición de borde impuesta en el modelo físico pretende reproducir la condición del flujo más desfavorables para el muro guardaradier estimada en la modelación numérica, es decir, el punto de la sección transversal del muro guardaradier donde la altura de carga es mayor. En la Tabla 4-2 se presentan las condiciones de altura y velocidad del flujo seleccionadas mediante este criterio. Ambas variables se escalan aplicando las siguientes expresiones:

$$H_m = \frac{H_p}{\lambda} \quad v_m = \frac{v_p}{\lambda^{\frac{1}{2}}} \quad (4.5)$$

Tabla 4-2: Condición de Borde aguas Arriba

Periodo Retorno [años]	Altura de escurrimiento [m]	Velocidad [m/s]	Altura de Carga [m]
50	0.13	1.21	0.20
100	0.10	1.27	0.18

La velocidad obtenida se impone como la velocidad media de la sección de control del modelo físico, por lo que el caudal en modelo se obtiene multiplicando este valor por el área de la sección. Los caudales del modelo asociados a las crecidas con periodo de retorno 50 y 100 años se muestran en la Tabla 4-3.

Tabla 4-3: Caudales de operación del modelo físico, Río Maipo

Periodo de Retorno [años]	Caudales Río Maipo	
	Prototipo [m³/s]	Modelo [l/s]
50	1851	153
100	2255	130

Definir la condición de borde del caudal sólido es de gran complejidad, ya que depende de la dinámica del flujo de aguas arriba, de la disponibilidad de sedimentos, de la distribución de sedimentos, del acorazamiento de los sedimentos, entre otros, por lo que cualquier estimación, inclusive la que se realiza en terreno, presenta alta incertidumbre. Considerando esto, en modelación física se suele definir la tasa de entrada mediante experimentación, donde se busca una tasa de equilibrio, es decir, aquella tasa para la cual el caudal de entrada y salida es el mismo. Sin embargo esta técnica es iterativa por lo que requiere realizar un gran número de experiencias que generan un costo en tiempo significativo que, en este caso, considerando los plazos, no es viable. Este procedimiento generalmente se utiliza en el área de investigación científica. En este caso se calcula la tasa de transporte mediante la fórmula de Meyer-Peter & Müller (Ecuación 2.3)

que considera que la disponibilidad de sedimentos es mayor a la tasa de transporte. La expresión se aplica a las condiciones experimentales.

Variable	Periodo de Retorno	
	100 años	50 años
$Q \left[\frac{m^3}{s} \right]$	0.120	0.153
$h [m]$	0.1	0.13
i	0.0078	0.0078
$d_{50} [m]$	0.0023	0.0023
$B [m]$	1	1
$\tau_0 [Pa]$	7.83	9.67
$q_s \left[\frac{m^2}{s} \right]$	0.000025	0.000034

4.1.3 Descripción de las experiencias a realizar

Se realizarán dos conjuntos de experiencias:

- I. Dos modelaciones con alimentación de caudal líquido, y la zona de aguas arriba del muro colmatada. Se reproducirán las condiciones críticas asociadas a los caudales de la crecida con periodo de retorno de 50 y 100 años. Se observará el proceso de socavación al pie del muro guardaradier. El lecho aguas arriba del muro es lecho fijo, con sedimento lacado. La obra se fija, por lo que se representa la forma y rugosidad pero no se estudia la estabilidad. Al pie de la obra hay dos metros de lecho con fondo móvil, a continuación, tres metros de lecho con fondo fijo y sedimento lacado hasta el final del canal.

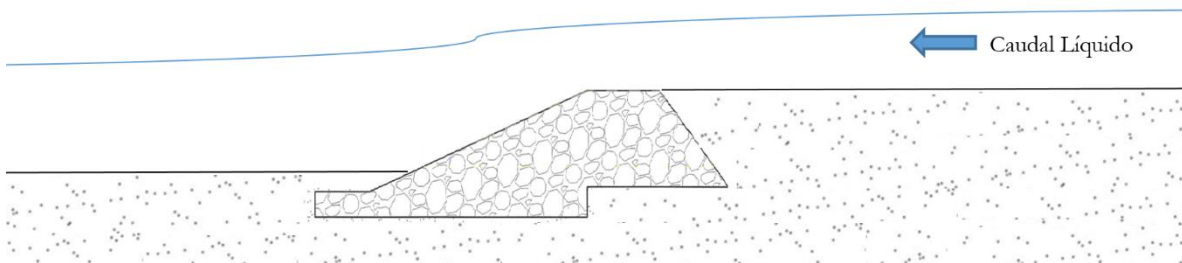


Figura 4-1: Experiencias tipo I.

- II. Modelaciones con alimentación de caudal líquido y sólido, y la pared de aguas arriba del muro enfrentando al flujo. Esta condición representa los primeros años de funcionamiento de la obra. La primera experiencia se realizará con un caudal de $40 \text{ m}^3/\text{s}$, al finalizar esta experiencia, se analizará la estabilidad del muro y se definirá el caudal de

la siguiente experiencia. Este proceso será iterativo hasta encontrar la condición para la cual el muro guardaradier se desestabiliza. Junto con la estabilidad del muro, se observará el proceso de sedimentación aguas arriba del muro guardaradier. En este bloque de ensayos, el lecho aguas arriba del muro es lecho fijo, con sedimento lacado. La obra se arma sobre fondo móvil, y las rocas se unen mediante trabazón por lo que pueden desplazarse. Al pie de la obra hay dos metros de lecho con fondo móvil y a continuación, lecho con fondo fijo y sedimento lacado hasta el final del canal.

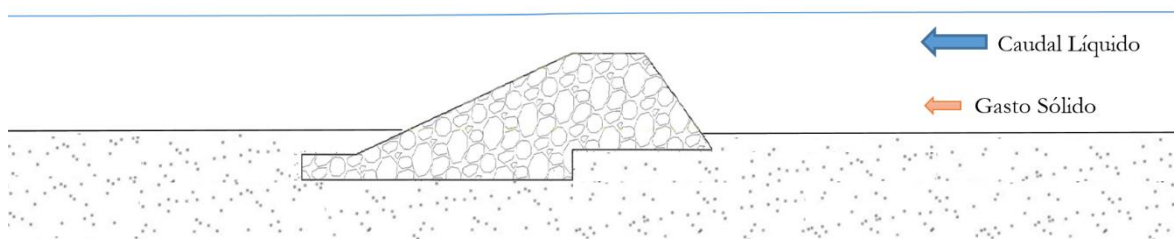


Figura 4-2: Experiencias tipo II.

El conjunto I, busca estimar las socavaciones máximas que podrían ocurrir al pie del muro, por esta razón se utiliza agua limpia (sin carga de sedimentos).

El conjunto I pretende estimar las máximas solicitaciones que resiste una sección tipo del muro, durante el proceso en el que se alcanza una pendiente de equilibrio en la zona de aguas arriba del muro. Es por esta razón que este conjunto de experiencias incorpora una tasa de sedimentos de entrada.

4.2 Puesta en marcha y verificación

Antes de comenzar con la etapa de experimentación, se realiza la puesta en marcha y verificación de la instalación experimental. Este proceso permite evaluar el funcionamiento del sistema de medición, del sistema de alimentación y retorno, y del modelo físico propiamente tal.

En este caso se puso énfasis en dos procesos, en el llenado inicial del modelo físico y en el registro fotográfico. El modelo físico contempla una zona de lecho móvil, en este tipo de modelos, para evitar que el flujo impermanente inicial emitido por el sistema de bombas altere el lecho móvil y provoque socavaciones que no tienen relación con el fenómeno en estudio, se inunda el modelo desde aguas abajo. Lentamente se eleva la cota de aguas abajo hasta que la zona con lecho móvil se encuentre sumergida. Luego se activa la bomba de aguas arriba, pero con un caudal muy pequeño. Poco a poco se va aumentando el caudal de aguas arriba mientras se baja la condición de aguas abajo. Así se va vaciando el modelo físico hasta alcanzar la condición de borde estimada. Esta metodología funcionó adecuadamente ya que no se

observaron socavaciones en el proceso de llenado e inicio de activación bombas (sistema de alimentación).

El segundo procedimiento que se analizó fue el registro fotográfico. La posición, capacidad y velocidad de la cámara fue la adecuada ya que las imágenes captadas permiten comparar el estado inicial y final del muro guardaradier, pudiendo distinguir los colores de los enrocados desplazados. En la Figura 4-3 se esquematiza el perfil longitudinal de la zona analizada, en la Figura 4-4 se muestra la vista en planta del muro al inicio de la experiencia de prueba y en la Figura 4-5 la vista en planta del muro una vez finalizada la experiencia de prueba.

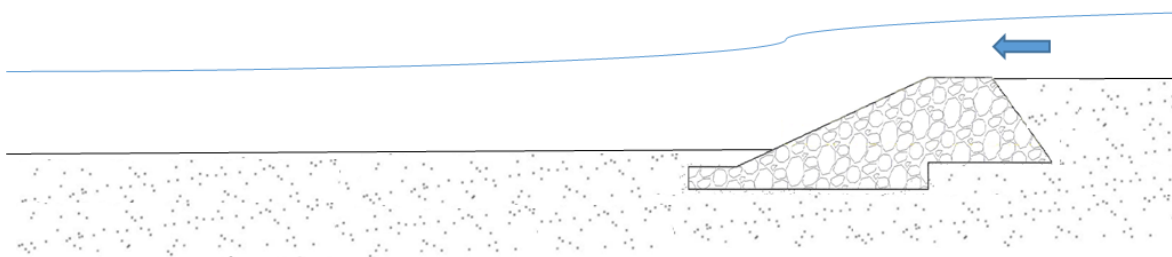


Figura 4-3: Perfil referencial de la vista en planta que se presenta en Figura 4-4 y Figura 4-5.



Figura 4-4: Vista en planta al inicio de la experiencia.



Figura 4-5: Vista en planta al final de la experiencia.

Más aún, realizando un seguimiento en detalle se pudo observar que la cantidad de imágenes por segundo captadas permite detectar el instante en que se inicia el movimiento de una roca y seguir su desplazamiento. Tal como se esperaba las primeras rocas en moverse son las de menor peso (color blanco). En la Figura 4-6 y Figura 4-7 se ejemplifica esta metodología.

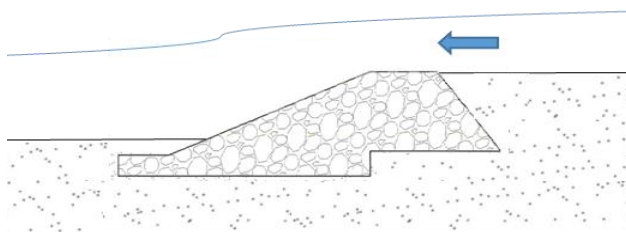


Figura 4-6: Perfil longitudinal representativo del tramo que se presenta en Figura 4-7.

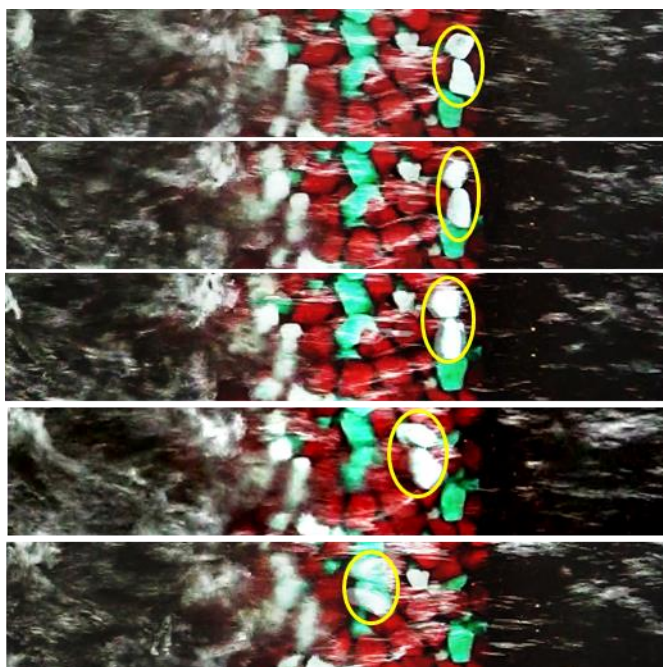


Figura 4-7: Detección del inicio del movimiento de rocas del muro guardaradier. Se muestran cinco instantes de tiempos ordenados cronológicamente de arriba hacia abajo.

En cuanto al funcionamiento del modelo físico, en la experiencia de pruebas el muro falló cuando el caudal de entrada alcanzaba los 70 l/s (Figura 4-5). Este caudal es bastante menor al caudal asociado a las condiciones críticas de las crecidas con periodo de retorno de 50 y 100 años. Por esta razón se reevalúan las condiciones de las experiencias a realizar.

- Experiencias tipo I: Este conjunto de experiencias tiene el objetivo de medir la máxima socavación al pie de la obra. Sin embargo, en la experiencia de prueba no se generó la socavación esperada y observada en terreno debido a la falla del muro de enrocados. Por esta razón, se decide fijar el muro guardaradier, limitando el transporte de enrocados, y estudiar, en este conjunto de experiencias, únicamente la socavación al pie del muro.
- Experiencias tipo II: Inicialmente se acordó estudiar las condiciones más críticas del flujo, con respecto al muro, asociadas a las crecidas con 50 y 100 años periodo de retorno. Sin embargo, dado que en la experiencia de prueba a los 70 l/s el muro falló, se determina comenzar estudiando un caudal menor a 70 l/s con su respectiva tasa de caudal sólido calculada con Meyer Peter & Müller. Dependiendo del estado del muro al finalizar la primera experiencia se definirá si se aumenta o se disminuye el caudal de entrada para la experiencia siguiente. Este proceso será iterativo hasta encontrar el caudal a partir del cual el muro falla.

5 RESULTADOS

En el siguiente capítulo se presentan los resultados obtenidos en la experiencia tipo I, considerando las condiciones experimentales y las variables hidráulicas asociadas a la crecida centenaria, descritas anteriormente. La presentación de los resultados comienza con la descripción de los niveles de escurrimiento a lo largo del modelo. Posteriormente, se analiza la profundidad de la socavación observada y, finalmente, se presenta una descripción cualitativa de los sedimentos movilizados.

5.1 Condiciones de Borde

Antes de comenzar con las mediciones y registro de resultados, es fundamental confirmar si las condiciones de borde previamente estimadas se cumplen en el modelo físico. Para realizar esta verificación se midió, cinco metros aguas arriba del muro, el caudal de entrada (Tabla 5-1), la altura de escurrimiento (Tabla 5-2) y la velocidad (Tabla 5-3). La velocidad se mide con un Micromolinete Nixon 404, cuyo certificado de calibración se encuentra en el Anexo 7. Es posible observar que la condición de borde medida es muy cercana a la estimada. La velocidad puntual presenta una mayor diferencia, sin embargo la promedio es bastante cercana, por lo que se considera adecuada.

Tabla 5-1: Caudal Modelo Físico Experiencia Tipo I. Tr=100 años y Tr=50 años

Caudal Tr=100 [l/s]	Caudal Tr=50 [l/s]
122.15	149.75
119.5	153.23

Tabla 5-2: Altura. Condición de Borde Aguas Arriba. Experiencia tipo I. Tr=100 años y Tr=50 años.

	Tr=100	Tr=50
Cota de Fondo ref local [cm]	20.40	20.20
Pelo de Agua ref. local [cm]	30.15	32.00
Altura [cm]	9.75	11.8

Tabla 5-3. Velocidad. Condición de Borde Aguas Arriba. Experiencia tipo I. $T_r=100$ años y $T_r=50$ años.

	$T_r=100$	$T_r=50$
Nº de vueltas por seg. Promedio [r.p.s.]	35	37
Velocidad Puntual medida [m/s]	1.46	1.53
Velocidad Promedio [m/s]	1.23	1.27

5.2 Eje Hidráulico

La medición del eje hidráulico se realiza en treinta secciones transversales, las cuales se definen de tal forma de poder registrar todos los tipos de escurrimiento y singularidades presentes en el tramo en estudio. Las secciones transversales se encuentran espaciadas entre 0.15 y 1 m. Todas las mediciones se realizan en el eje central. Para ambos periodo de retorno el eje hidráulico presenta características similares en cuanto a tipo de régimen y ubicación del resalto, por lo que a continuación se realiza una descripción genérica.

El tramo aguas arriba del muro guardaradier (metro 9-6 de la Figura 5-4) es de lecho natural fijo y se observan alturas entre 2.4 m y 1.9 m en prototipo, es un flujo supercrítico con altura uniforme en la transversal. A medida que el flujo se acerca al muro guardaradier el eje hidráulico se deprime.



Figura 5-1: Flujo aguas arriba del muro guardaradier.

Sobre el muro guardaradier (metro 6-5 de la Figura 5-4) el flujo es supercrítico alcanzando alturas entre 2.1 m y 1.4 m en prototipo. El lecho es fijo y la altura en la sección transversal uniforme. Cabe mencionar que no se observa despegue de la lámina de agua a pesar de la caída que genera el muro guardaradier. En esta zona, el flujo continúa siendo supercrítico.



Figura 5-2: Flujo sobre el muro guardaradier.

Aguas abajo del muro guardaradier, hay un tramo de lecho móvil (metro 4.8-2.8 de la Figura 5-4) donde se observa un resalto, cuya posición varía levemente en el tiempo acercándose y alejándose al pie de la obra. La superficie libre del resalto presenta importantes perturbaciones, a diferencia del resto del eje hidráulico del modelo. Aguas abajo del resalto el flujo es subcrítico con alturas entre 2.8 y 4.8 metros en prototipo.



Figura 5-3: Flujo Aguas abajo del muro guardaradier.

La zona aguas abajo del lecho móvil es de lecho natural fijo (metro 2.8-0 de la Figura 5-4) y el flujo es supercrítico con alturas entre 2.04 y 2.04 metros en prototipo

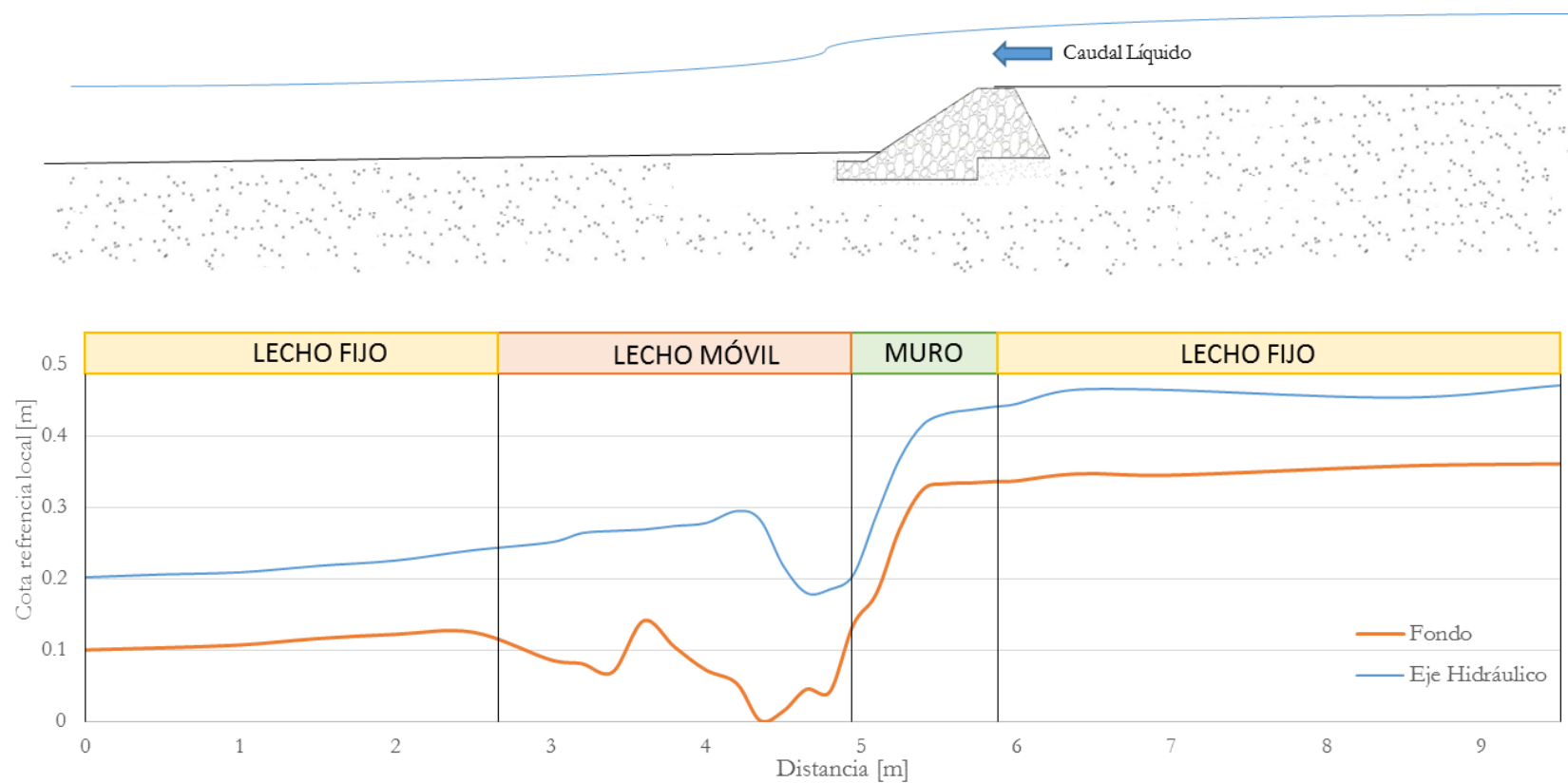


Figura 5-4: Eje Hidráulico Modelo Físico. Experiencia tipo I. $Tr=100$ años. Arriba, perfil longitudinal referencial. Abajo, gráfico de eje hidráulico medido en el eje central de la sección.

5.3 Socavaciones

El registro de la socavación se realiza mediante dos metodologías, utilizando un scanner que mide la superficie del lecho al inicio de la experiencia y al final (Figura 5-5). Este instrumento no permite medir durante el experimento ya que requiere que la superficie esté seca. La otra metodología es mediante limnómetro, para esto se definen ocho perfiles en el tramo del lecho móvil, y en el eje central de estos perfiles se mide la cota del lecho en varios instantes de tiempo de la experiencia. El término de la experiencia ocurre cuando se alcanza la socavación máxima y esta condición se controla con el segundo método mencionado.

La experiencia tardó 4 horas y 10 minutos. En la Tabla 5-4 se presentan los registros tomados. La socavación máxima se alcanza en el perfil cuatro, en prototipo es de 3.3 metros. Este valor se encuentra dentro del rango determinado por las formulaciones teóricas utilizadas en la etapa anterior para estimar la socavación.

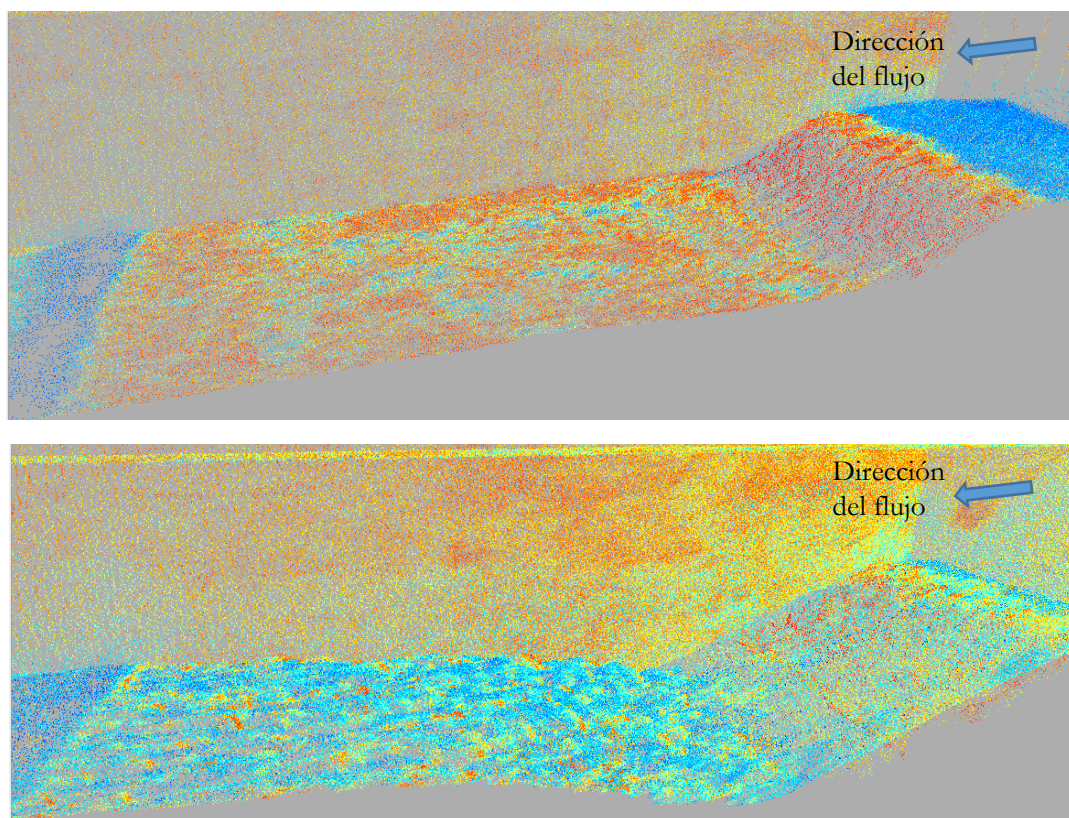


Figura 5-5: Topografía medida con el scanner. Arriba condición inicial. Abajo condición final.

Tabla 5-4: Profundidad de socavación a lo largo de la experiencia tipo I. Arriba Tr=100 años y Abajo Tr=50 años.

Hora	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
10:20	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10:40	-0.005	-0.104	-0.119	-0.112	-0.051	-0.004	-0.056	-0.006
11:30	-0.006	-0.112	-0.139	-0.146	-0.099	-0.061	-0.034	-0.011
12:00	-0.005	-0.059	-0.137	-0.150	-0.097	-0.050	-0.038	-0.004
12:20	-0.005	-0.118	-0.139	-0.166	-0.132	-0.068	-0.060	-0.048
13:45	-0.003	-0.111	-0.089	-0.097	-0.115	-0.066	-0.053	-0.051
14:10	0.000	-0.089	-0.137	-0.124	-0.118	-0.068	-0.064	-0.056
14:30	0.000	-0.078	-0.137	-0.093	-0.128	-0.074	-0.009	-0.055
Socavación Máx. Modelo Tr 100 años [m]	-0.006	-0.118	-0.139	-0.166	-0.132	-0.074	-0.064	-0.056
Socavación Máx. Prototipo Tr 100 años [m]	-0.124	-2.356	-2.786	-3.326	-2.630	-1.480	-1.284	-1.124

Hora	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
9:45	0	0	0	0	0	0	0	0
10:18	-0.013	-0.126	-0.168	-0.173	-0.161	-0.098	-0.067	-0.054
10:58	-0.014	-0.196	-0.116	-0.128	-0.144	-0.095	-0.092	-0.056
11:18	-0.015	-0.199	-0.206	-0.194	-0.176	-0.098	-0.075	-0.046
11:45	-0.008	-0.178	-0.166	-0.145	-0.156	-0.101	-0.104	-0.067
12:10	-0.009	-0.176	-0.166	-0.137	-0.135	-0.092	-0.124	-0.071
12:30	-0.0085	-0.135	-0.176	-0.175	-0.111	-0.105	-0.105	-0.079
12:45	-0.008	-0.114	-0.183	-0.177	-0.165	-0.142	-0.102	-0.101
13:10	-0.013	-0.158	-0.177	-0.172	-0.157	-0.055	-0.057	-0.047
Socavación Máx. Modelo Tr 50 años [m]	-0.015	-0.199	-0.206	-0.1945	-0.176	-0.142	-0.1247	-0.101
Socavación Máx. Prototipo Tr 50 años [m]	-0.300	-3.980	-4.120	-3.890	-3.520	-2.840	-2.494	-2.020

El material transportado fue principalmente arena y arena fina, quedando en la zona socavada una capa importante de gravas. En las Figura 5-6 y Figura 5-7 se observa la diferencia de los tamaños de los sedimentos que se pusieron al inicio de la experiencia en contraste con los sedimentos que quedaron al final de la experiencia.



Figura 5-6: Sedimento lecho móvil experiencia tipo I. $Tr=100$ años. A la izquierda al inicio de la experiencia. A la derecha, al final de la experiencia.

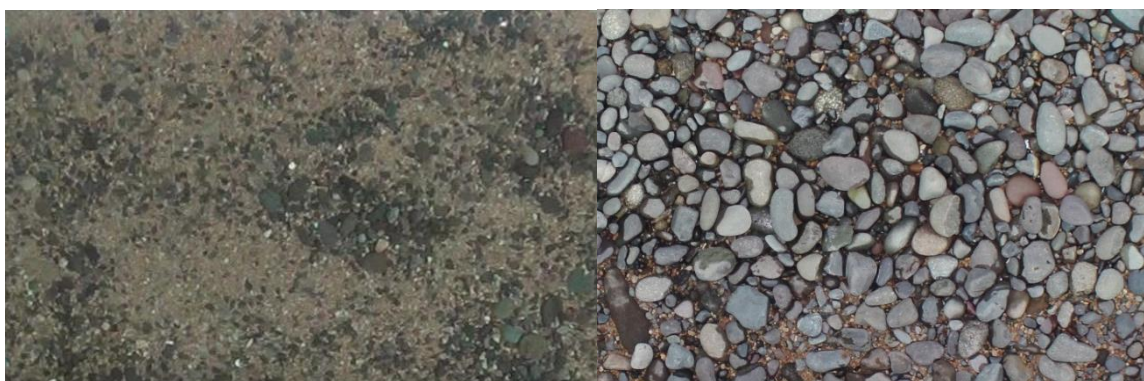
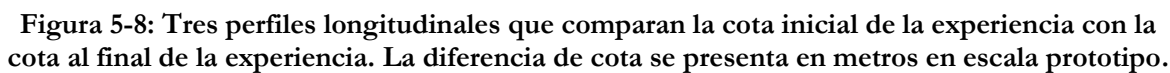


Figura 5-7: Vista en planta Sedimento Lecho móvil experiencia tipo I. $Tr=100$ años. A la izquierda al inicio de la experiencia. A la derecha, al final de la experiencia.

En la Figura 5-8 se presentan tres perfiles longitudinal del modelo físico ribera izquierda, central y ribera sur. En estos perfiles se compara la cota inicial con la final. La diferencia puntual se presenta en el eje x en metros, escala prototipo. El volumen total removido en escala prototipo es de 975 m^3 , de los cuales 943 m^3 son de erosión y 32 m^3 de deposición.



A pesar de que el material transportado fue principalmente arenas, también hubo transporte de gravas de diversos tamaños, tal como se aprecia en la Figura 5-9.



Figura 5-9: Material removido del tramo de lecho móvil. Experiencia tipo I. $T_r=100$ años.

6 BIBLIOGRAFÍA

- Alvarado, L. (1985).** Uso de enrocados en obras hidráulicas. *Anales de la Universidad de Chile*.
- Ashida, K. and Michiue, M. (1972).** “Study on hydraulic resistance and bedload transport rate in alluvial streams”, *Proc. Jpn Soc. Civ. Engng.*, 206, 59-69.
- Bormann, N. & Julien, P. (1991).** Scour Downstream of Grade-Control Structures. *Journal of hydraulic engineering*.
- Chanson, H. (2004).** “Hydraulics of open channel flow”, Butterworth-Heinemann.
- Garcia, M. (2008).** “Sedimentation engineering: processes, measurements, modeling, and practice”, ASCE.
- Heller, V. (2011).** Scale effects in physical hydraulic engineering models. *Journal of Hydraulic Research*, 49(3), 293-306.
- Lopez, A (1973).** “Escala de reducción de sedimento en un modelo con fondo móvil”. Segundo Coloquio Nacional, Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica.
- Mery, H. (2013).** Hidráulica aplicada al diseño de obras. Ril Editores.
- Meyer-Peter, E., & Müller, R. (1948, June).** “Formulas for bed-load transport”, *LAHR*.
- Parker, G. (1990).** “Surface-based bedload transport relation for gravel rivers”, *Journal of hydraulic research*, 28(4), 417-436.
- Van Rijn, L. C. (1984).** “Sediment transport, part I: bed load transport. *Journal of hydraulic engineering*”, 110(10), 1431-1456.
- Ven Te Chow. (1994).** “Hidráulica de canales abiertos.”, Mac Graw Hill.
- Wilcock, P. R., & Crowe, J. C. (2003).** “Surface-based transport model for mixed-size sediment”, *Journal of Hydraulic Engineering*, 129(2), 120-128.