

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CORDOBA

Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales
Centro de Estudios y Tecnología del Agua

PRACTICA SUPERVISADA

Carrera de Ingeniería Civil

**“EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE ALTERNATIVAS DE
OPERACIÓN DE LOS ÓRGANOS DE EVACUACIÓN MÓVILES
DEL DIQUE LOS MOLINOS, JUJUY”**



Autor: Pacheco, Carlos Andrei

Tutor interno: Hillman, Gerardo

Supervisor externo: Gyssels, Paolo

AÑO 2013

AGRADECIMIENTOS

- A mis padres y a mi familia por darme la posibilidad de estudiar y su apoyo incondicional.
- A Carlos Marcelo García, por elegirnos para emprender este proyecto, por su respeto, amabilidad y paciencia.
- A Gerardo Hillman, por su confianza en mí y su predisposición en todo momento.
- A mi grupo de estudio
- A mis amigos y amigas por estar siempre presentes.
- A mí equipo de trabajo que siempre me colaboraron y logramos conformar un agradable grupo.

TÍTULO: EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE ALTERNATIVAS DE OPERACIÓN DE LOS ÓRGANOS DE EVACUACIÓN MÓVILES DEL DIQUE LOS MOLINOS, JUJUY

RESUMEN

El objetivo de esta práctica supervisada es verificar y optimizar las consignas de operación de las estructuras de control, a los fines de regular los procesos hidrosedimentológicos presentes en las proximidades de la presa aguas arriba. Esta evaluación se llevará a cabo para las condiciones de flujo relevantes (descarga de las crecidas frecuentes en todo el sistema, descarga máxima en vertedero fijo y descarga máxima en vertedero móvil y descargador).

Primeramente se desarrollan las técnicas de operación de compuertas realizadas en la actualidad en el dique Los Molinos Jujuy a partir de informes y antecedentes recopilados. Se definen distintos escenarios, condiciones experimentales y un procedimiento de operación para la evaluación de las distintas situaciones a estudiar.

Se ha definido como caudal de referencia $600\text{m}^3/\text{s}$, considerado un evento de recurrencia ordinaria y compatible con las posibilidades reales de operación de los órganos de evacuación móviles (según los criterios de operación actuales). Se advierte que la totalidad del caudal puede ser evacuado por la estructura del dique móvil y canal moderador. Partiendo de este caudal de referencia se desarrollarán ensayos a fondo móvil, sin aporte de material aguas arriba de la zona de estudio. Los ensayos sin aportes, tienen como premisa fundamental abordar el análisis del efecto hidrodinámico y morfológico del cauce agua arriba, resultante de distintas combinaciones o alternativas de apertura de compuertas.

Posteriormente se detallan los ensayos realizados para los distintos escenarios y condiciones propuestas, haciendo un análisis de la eficiencia en el uso de distintas metodologías de manejo para cada ensayo.

Se propone una metodología de operación de manejo de compuertas cuando arriba el evento hidrológico de la crecida.

ÍNDICE

CAPITULO 1: MARCO REFERENCIAL DEL TRABAJO.....	12
1.1 Introduccion	12
1.2 Objetivos	12
1.2.1 Objetivo general de la práctica supervisada	12
1.2.2 Objetivos específicos de la práctica supervisada	12
1.3 Localización y descripción de la presa Los Molinos	13
1.4 Resumen de la problematica.....	14
1.5 Modelo Físico Los Molinos	16
1.5.1 Características del modelo físico.....	17
1.5.2 Componentes del Modelo Físico del Dique Los Molinos	17
CAPITULO 2: POLÍTICAS DE OPERACION DE COMPUERTAS EN EL DIQUE LOS MOLINOS, JUJUY 21	
2.1 Introducción	21
2.2 Estudios realizados por la u.n.l.p (1971)	21
2.2.1 Conclusiones obtenidas de los ensayos	22
2.3 Procedimientos recomendados por la s.s.r.h de jujuy	23
2.3.1 Procedimiento operativo durante crecientes	23
2.3.2 Con compuertas cerradas	23
2.3.3 Con compuertas abiertas	29
2.4 Estudios realizados en la fcefyn-unc	36
2.4.1 Sensibilidad del modelo físico	36
2.4.2 Área de estudio a representar en el modelo	39
2.4.3 Material fondo móvil.....	40
2.4.4 Política de operación de compuertas propuesta	42
CAPITULO 3: METOLOGIA EXPERIMENTAL	44
3.1 Introducción	44
3.2 Procedimiento previo al ensayo.....	44
3.3 Procedimiento durante el ensayo	45
3.4 Procedimiento posterior al ensayo	48
CAPITULO 4: ENSAYOS REALIZADOS	52
4.1 Introducción	52
4.2 Ensayos a caudal constante	53
4.2.1 Ensayo 24	53
4.2.2 Ensayo 25	61

4.2.3 Ensayo 26	66
4.2.4 Ensayo 27	73
4.3 Ensayos a caudal variable.....	79
4.3.1 Ensayo 28	79
4.3.2 Ensayo 30	86
4.3.3 Ensayo 29	91
CAPITULO 5: CONCLUSIONES	101
5.1 Conclusiones técnicas	101
5.2 conclusiones de la práctica supervisada	102
REFERENCIAS.....	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de la presa Los Molinos. Imagen satelital	13
Figura 2: Esquema en planta de la presa Los Molinos	14
Figura 3: Fotografía aérea de la presa con sus elementos componentes.....	14
Figura 8: Erosión localizada al pie del canal moderador.....	15
Figura 4: Tarquinamiento del dique fijo.....	15
Figura 5: Erosión generalizada en el lecho.....	15
Figura 6: Abrasión del dique móvil.....	15
Figura 7: Abrasión del dique fijo	15
Figura 9. Modelo Físico Los Molinos	16
Figura 10: Planta esquemática de las instalaciones del Laboratorio de Hidráulica	18
Figura 11: Cámara de aforo del Río Reyes	18
Figura 12: Cámara de carga del Río Reyes	18
Figura 13: Corte esquemático de cámara de aforo.....	19
Figura 14: Cámara de ingreso Río Grande.....	19
Figura 15: Estructura de cierre.....	19
Figura 16: Compuerta rebatible.....	19
Figura 17: Tanque volumétrico	19
Figura 18: Desarenador	20
Figura 19: Esquema de Nomenclatura.....	23
Figura 20: Procedimiento de crecidas. Con compuertas cerradas.....	24
Figura 21: Procedimiento de crecidas. Con compuertas cerradas.....	25
Figura 22: Procedimiento de crecidas. Con compuertas cerradas.....	25
Figura 23: Procedimiento de crecidas. Con compuertas cerradas.....	26
Figura 24: Procedimiento de crecidas. Con compuertas cerradas.....	26
Figura 25: Procedimiento de crecidas. Con compuertas cerradas.....	27
Figura 26: Procedimiento de crecidas. Con compuertas cerradas.....	27
Figura 27: Procedimiento de crecidas. Con compuertas cerradas.....	28
Figura 28: Procedimiento de crecidas. Con compuertas abiertas	30
Figura 29: Procedimiento de crecidas. Con compuertas abiertas	30
Figura 30: Procedimiento de crecidas. Con compuertas abiertas	31
Figura 31: Procedimiento de crecidas. Con compuertas abiertas	31
Figura 32: Procedimiento de crecidas. Con compuertas abiertas	32
Figura 33: Procedimiento de crecidas. Con compuertas abiertas	32
Figura 34: Procedimiento de crecidas. Con compuertas abiertas	33
Figura 35: Procedimiento de crecidas. Con compuertas abiertas	33
Figura 36: Líneas de flujo. Ensayo 1	37
Figura 37: Líneas de flujo. Ensayo 2	37
Figura 38: Líneas de flujo. Ensayo 3	38
Figura 39: Área de estudio con lecho erosionable (fondo móvil)	40
Figura 40: Perfil longitudinal al inicio de cada ensayo	40
Figura 41: Granulometría del prototipo y modelo.....	41
Figura 42. Hidrograma unitario	43
Figura 43: Nivelación del terreno.....	44
Figura 44: Nivelación del terreno.....	45

Figura 45: Nivelación del terreno.....	45
Figura 46: Condición inicial aguas arriba.....	46
Figura 47. Puntos Relevados	46
Figura 48: Puntos característicos aguas arriba del dique.....	47
Figura 49: Puntos relevados.....	47
Figura 50. Variación de la fosa en el tiempo.....	48
Figura 51: Fosa de erosión	49
Figura 52. Fosa de erosión	49
Figura 53. Fosa de erosión obtenida con el Surfer.....	50
Figura 54. Diagrama de los ensayos.....	52
Figura 55. Nomenclatura de compuertas	52
Figura 56. Puntos relevados.....	54
Figura 57: Variación de la erosión en el tiempo.....	55
Figura 58. Puntos relevados.....	56
Figura 59. Variación de la erosión en el tiempo.....	56
Figura 60. Puntos relevados.....	57
Figura 61. Variación de la erosión en el tiempo.....	58
Figura 62. Fosa de erosión DM3.....	59
Figura 63. Fosa de erosión DM3.....	59
Figura 64. Fosa de erosión CM1.....	59
Figura 65. Fosa de erosión CM1.....	60
Figura 66. Fosa de erosión DM3 y DM2	60
Figura 67. Puntos relevados.....	62
Figura 68. Variación de la erosión en el tiempo.....	63
Figura 69. Fosa de erosión	63
Figura 70. Variación de la erosión en el tiempo.....	64
Figura 71. Fosa final. Surfer.....	65
Figura 72. Puntos relevados.....	67
Figura 73. Variación de la erosión en el tiempo.....	68
Figura 74. Variación de la erosión en el tiempo.....	69
Figura 75. Fosa final	70
Figura 76. Superficie generada.....	70
Figura 77. Fosa final	71
Figura 78. Curvas de nivel	72
Figura 79. Puntos relevados.....	74
Figura 80. Variación de la erosión en el tiempo.....	75
Figura 81. Variación de la erosión en el tiempo.....	76
Figura 82. Superficie generada.....	77
Figura 83. Fosa final	78
Figura 84. Curvas de nivel	78
Figura 85. Variación de caudales de ingreso.....	81
Figura 86. Punto relevado	81
Figura 87. Variación de la erosión en el tiempo.....	83
Figura 88. Variación del caudal en el tiempo.....	84
Figura 89. Fosa final	85

Figura 90. Curvas de nivel	85
Figura 91. Puntos relevados	88
Figura 92. Variación de las cotas en el tiempo.....	89
Figura 93. Variación de la erosión en el tiempo.....	90
Figura 94. Variación de caudales en el tiempo	90
Figura 95. Variación del caudal de ingreso	93
Figura 96. Puntos relevados	94
Figura 97. Variación de las cotas en el tiempo.....	95
Figura 98. Variación de las cotas en el tiempo.....	96
Figura 99. Variación de la erosión en el tiempo.....	97
Figura 100: Fosa final	99
Figura 101: Curvas de nivel	99

ÍNDICE TABLAS

Tabla 1. Ensayos U.N.L.P	21
Tabla 2. Procedimiento con compuertas cerradas	28
Tabla 3. Procedimiento con compuertas abiertas	34
Tabla 4: Resumen de operación de compuertas abiertas y cerradas	35
Tabla 5: Estado de compuertas.....	37
Tabla 6: Velocidades con tubo Pitot.....	38
Tabla 7: Porcentajes de caudal evacuado por cada estructura de descarga bajo diferentes condiciones de ingreso de caudal	38
Tabla 8: Ejemplo de volumen de arena removido	51
Tabla 9: Ensayos realizados a fondo móvil con caudal constante de 600 m ³ /s	53
Tabla 10 Cotas relevadas.....	54
Tabla 11: Cotas relevadas.....	56
Tabla 12. Variación de la erosión en el tiempo	58
Tabla 13. Apertura de compuertas	61
Tabla 14. Apertura de compuertas	61
Tabla 15: Cotas relevadas.....	62
Tabla 16: Cotas relevadas.....	62
Tabla 17: Apertura de compuertas	66
Tabla 18: Apertura de compuertas	66
Tabla 19: Cotas relevadas.....	67
Tabla 20: Cotas relevadas.....	68
Tabla 21: Volumen de arena removido.....	72
Tabla 22: Apertura de compuertas	73
Tabla 23: Apertura de compuertas	73
Tabla 24: Cotas relevadas.....	74
Tabla 25: Cotas relevadas.....	74
Tabla 26. Volumen de arena removido.....	79
Tabla 27: Apertura de compuertas	79
Tabla 28: Apertura de compuertas	80
Tabla 29: Variación de caudales de ingreso	80
Tabla 30: Cotas relevadas.....	82
Tabla 31. Comportamiento hidráulico	84
Tabla 32: Volumen de arena removido.....	86
Tabla 33: Apertura de compuertas	87
Tabla 34: Variación de caudales de ingreso	87
Tabla 35: Operación de compuertas	88
Tabla 36. Cotas relevadas.....	89
Tabla 37. Cotas relevadas.....	89
Tabla 38. Comportamiento hidráulico	91
Tabla 39: Apertura de compuertas	92
Tabla 40. Variación de caudales de ingreso	93
Tabla 41: Cotas relevadas.....	94
Tabla 42: Cotas relevadas.....	95
Tabla 43. Volumen removido	98

Tabla 44: Volumen de arena removido..... 100

CAPITULO 1: MARCO REFERENCIAL DEL TRABAJO

1.1 INTRODUCCION

En el siguiente apartado se explicarán primeramente los objetivos de la práctica supervisada, la cual fue desarrollada en el modelo físico Los Molinos Jujuy que fue un proyecto que ganó la U.N.C para la empresa Benito Roggio. Posteriormente se realizará una descripción del embalse y además se detallarán las características del modelo físico en cuestión.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general de la práctica supervisada

- Evaluación experimental de alternativas de operación de los órganos de evacuación móviles del dique Los Molinos, JuJuy.

1.2.2 Objetivos específicos de la práctica supervisada

- Diagnóstico de la situación operativa actual en el dique Los Molinos, Jujuy.
- Proposición, evaluación y análisis de una metodología de operación.
- Selección de la mejor alternativa de operación

La evaluación de las políticas de operación de compuertas es uno de los objetivos por el cual se realizó la construcción del modelo físico Los Molinos. Estas políticas se evaluaron a partir de los antecedentes, informes de la situación actual y una serie de ensayos en los cuales se analizan distintos escenarios. Finalmente a partir de las conclusiones se propone una política de operación de compuertas óptima.

Los motivos por los cuales se desea optimizar el manejo de compuertas en las crecidas son principalmente:

- Liberar la zona de toma de los sedimentos que se acumulan en la misma y en los alrededores.
- Obtener un cauce activo de estiaje cerca a la obra de toma una vez transcurrido el evento.
- Aumentar la remoción de sedimentos de la zona de embalse.

1.3 LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DE LA PRESA LOS MOLINOS

El embalse derivador Los Molinos es una obra hidráulica situada en la Provincia de Jujuy, República Argentina. El mismo se encuentra un kilómetro río abajo de la confluencia de los ríos Reyes y Grande a pocos kilómetros de la ciudad de San Salvador de Jujuy (ver Figura 1). El objetivo de esta obra es abastecer de agua para riego y consumo a la región.

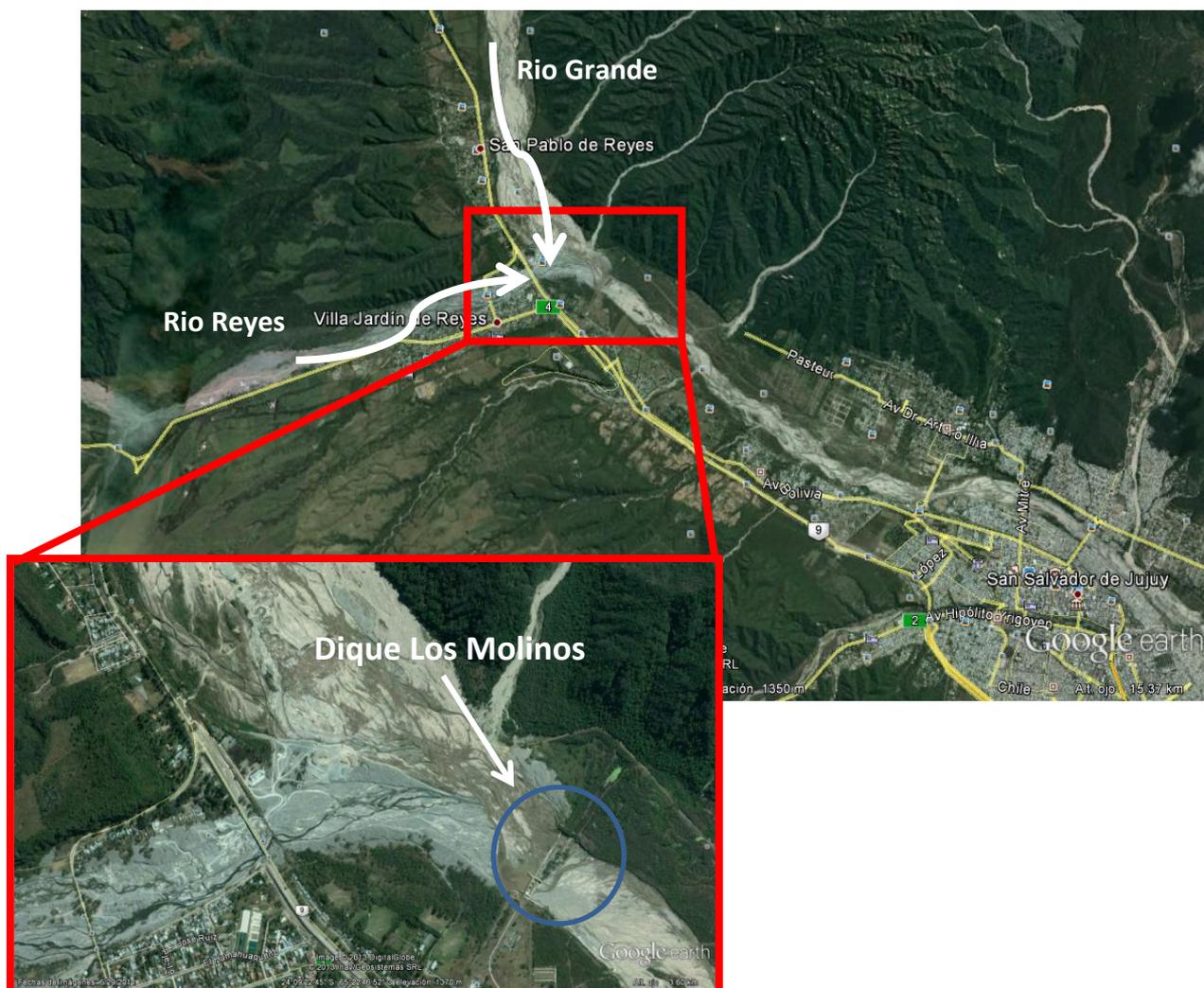


Figura 1. Localización de la presa Los Molinos. Imagen satelital

La presa está constituida por los siguientes elementos (ver Figura 2 y Figura 3):

- Terraplén de materiales sueltos de 340 metros de longitud y 13.1 metros de altura.
- Un vertedero fijo que se denomina en este informe como dique fijo de 200 metros de longitud.
- Un vertedero controlado por compuertas circulares que se denomina como dique móvil de 70 metros de ancho con vanos cada 15 metros.
- Un canal de limpieza de 10 metros de longitud al cual se llama canal moderador, el cual se encuentra accionado por 2 compuertas.
- Una obra de toma que desvía un caudal máximo $25 \text{ m}^3/\text{s}$ para el abastecimiento de agua para consumo y riego.

- Terraplén de materiales sueltos de 440 metros de longitud y 12.3 metros de altura.

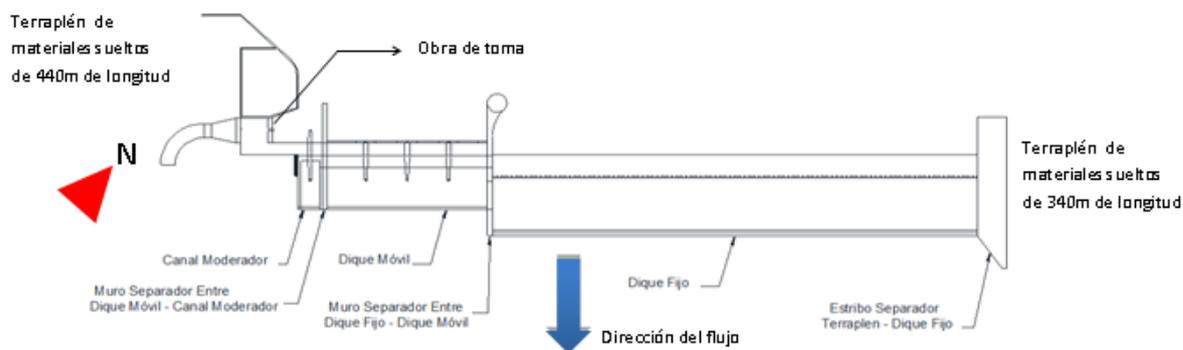


Figura 2: Esquema en planta de la presa Los Molinos



Figura 3: Fotografía aérea de la presa con sus elementos componentes

1.4 RESUMEN DE LA PROBLEMÁTICA

Según el informe realizado por la empresa Halcrow (2009), la presa Los Molinos presenta los siguientes problemas asociados a diversas causas naturales como:

- **Sedimentación y tarquinamiento** aguas arriba de la presa, debido al gran acarreo de materiales transportados por el río (ver Figura 4).
- **Erosión generalizada del lecho** aguas debajo de la presa, lo cual hace que peligre la estabilidad de esta (ver Figura 5).
- Deterioro por **abrasión** de todas las superficies expuestas al paso del agua, en particular el perfil vertedero y la pileta plana de quietamiento del dique fijo cuya magnitud de erosión no es detectable por la cantidad de material depositado allí, (ver Figura 6 y Figura 7).
- **Erosiones locales** importantes aguas debajo de las obras de descarga, particularmente aguas abajo del canal moderador. Estas erosiones a pie de presa comprometen la estabilidad de la misma (ver Figura 8).
- **Falta de mantenimiento** en las obras civiles y electromecánicas que no permiten el adecuado manejo de las obras de descarga. En especial las que presentan componentes móviles (por ej. Compuertas).



Figura 4: Tarquinamiento del dique fijo



Figura 5: Erosión generalizada en el lecho del río



Figura 6: Abrasión del dique móvil



Figura 7: Abrasión del dique fijo



Figura 8: Erosión localizada al pie del canal moderador

Las modificaciones proyectadas propusieron un cambio del cuenco disipador del Dique Móvil y del Canal Moderador, la reconstrucción con hormigón de alta resistencia en las zonas donde se observaron los mayores daños por abrasión y la construcción de un muro colado aguas abajo de las estructuras de descarga para garantizar la estabilidad de las obras ante las erosiones previstas.

Resulta imprescindible caracterizar los fenómenos físicos involucrados en los procesos erosivos y acotar el nivel de incertidumbre que ofrecen las distintas formulaciones matemáticas utilizadas para valorar estos fenómenos, este proceso se facilita a través de un modelo físico, constituyendo este aspecto uno de los principales objetivos de la modelación.

Finalmente es importante destacar que otro aspecto a considerar dentro de los objetivos de la modelación es el análisis de las políticas de operación y manejo de los órganos de control del dique a los fines de optimizar el efecto de llamada que los mismos producen y además en caso de la ocurrencia de una crecida liberar la zona toma de agua para su correcto funcionamiento.

1.5 MODELO FÍSICO LOS MOLINOS

El Modelo Físico Los Molinos se realizó en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la UNC (ver Figura 9) a pedido de la empresa Benito Roggio. Los principales objetivos por los cuales se realizó dicho modelo son los siguientes:

- Análisis de los procesos erosivos aguas abajo de la presa.
- Curvas de descarga de los órganos de operación de la presa y el análisis hidrodinámico de la obra en el contexto fluvial.
- Políticas de operación de compuertas.

Esta tesis se enmarca en el tercer objetivo que es la política de operación de los órganos móviles de la presa.



Figura 9. Modelo Físico Los Molinos

1.5.1 Características del modelo físico

El modelo físico tridimensional se construyó siguiendo los lineamientos impuestos por el Criterio de Semejanza de Froude, escala 1:65, con capacidades para llevar a cabo experimentos en una etapa a Fondo Rígido y en otra a Fondo Móvil. Para ello se dispuso de un sector del modelo donde pueda ejecutarse indistintamente: un fondo rígido conformado según la topografía relevada del lugar, o bien un fondo móvil (arena) que permita analizar los procesos erosivos.

En la elección de la escala se contemplaron las variables a estudiar, los efectos de escala y las capacidades del Laboratorio (capacidad de bombeo, espacio disponible, entre otros.)

Respecto al área de estudio, el modelo físico representa todas las estructuras presentes en el cuerpo de la presa, incluyendo entre otras, los cierres y las tres estructuras de control (presa móvil, presa fija, y canal moderador), conjuntamente con sus respectivos órganos de regulación (compuerta sector, compuerta plana, etc.)

Aguas arriba, el dominio de análisis del modelo físico se extiende a través de un desarrollo longitudinal, tanto sobre el río Grande como sobre el río Reyes, representando el cauce hasta unos 1.000 m aguas arriba de la presa, de modo tal que asegure la correcta representación de los parámetros hidrodinámicos, hidráulicos y sedimentológicos que afectan al comportamiento y desempeño de las estructuras a analizar.

Particularmente en el río Reyes, el desarrollo de la modelación incluye la representación en escala de los puentes presentes en proximidades del área de desembocadura, en la Ruta Nacional N° 9 y el ex. FF CC General Belgrano.

La longitud representada aguas abajo del cuerpo de la presa (500 m en prototipo) se ha definido de tal forma que las condiciones de borde no afecten los procesos hidráulicos y sedimentológicos bajo estudio.

1.5.2 Componentes del Modelo Físico del Dique Los Molinos

Los elementos que componen del modelo son:

- **Cisterna:** se encuentra dentro de las instalaciones del Laboratorio de Hidráulica, es de forma anular y tiene una capacidad de almacenamiento de 65 m³.
- **Bombas tipo flight:** el laboratorio posee dos bombas, de tipo centrífugas y sumergibles; tienen una capacidad de bombeo de 70 l/seg. cada una, y con una altura de carga de 2 metros.
- **Cámaras de Aforo:** ubicadas en el exterior, tienen la función de medir los caudales que circulan en los ríos de los modelos, ya sea río Reyes o Cañada, y los ríos Grandes o Suquía.
- **Cámara de Carga:** recinto donde se selecciona el modelo por donde circulará el agua, consta de compuertas que permiten optar por la utilización del modelo Los Molinos o el del Río Suquía.

- **Cámara de Ingreso:** están dispuestas en el extremo aguas arriba de los ríos Grande y Reyes. Su función es la de aquietar y distribuir el agua que proviene de las cámaras de carga, para simular las condiciones hidrológicas reales.
- **Obra de Cierre:** está constituida por márgenes derecha e izquierda, dique fijo (DF), dique móvil (DM), canal moderador (CM) y obra de toma.
- **Compuerta Rebatible:** se trata de una compuerta, cuya altura se regula a través de un tornillo, tiene la finalidad de simular las condiciones hidrológicas del río aguas abajo de la presa.
- **Tanque Volumétrico:** es el recinto donde se miden caudales de egreso del modelo, como medida de control y comparación de los medidos en las cámaras de aforo.
- **Sedimentador o Desarenador:** espacio donde al agua sedimenta la arena erosionada en los tramos de fondo móvil; luego la conduce, a través del retorno, a la cisterna.

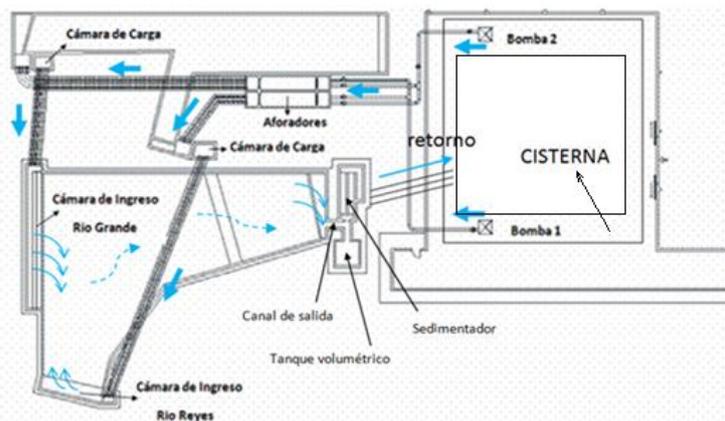


Figura 10: Planta esquemática de las instalaciones del Laboratorio de Hidráulica



Figura 11: Cámara de aforo del Río Reyes



Figura 12: Cámara de carga del Río Reyes

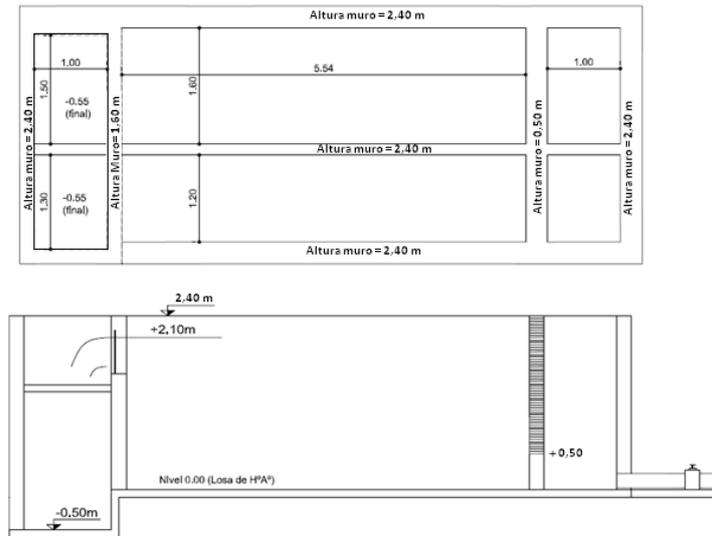


Figura 13: Corte esquemático de cámara de aforo



Figura 14: Cámara de ingreso Río Grande

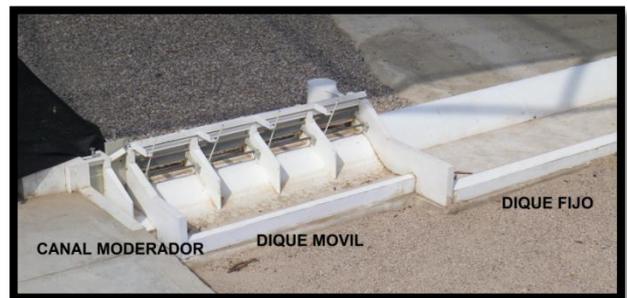


Figura 15: Estructura de cierre



Figura 16: Compuerta rebatible



Figura 17: Tanque volumétrico



Figura 18: Desarenador

CAPITULO 2: POLÍTICAS DE OPERACION DE COMPUERTAS EN EL DIQUE LOS MOLINOS, JUJUY

2.1 INTRODUCCIÓN

Inicialmente se detallarán los primeros estudios hidráulicos con operación de compuertas realizados en el modelo físico desarrollado en la UNLP, en dicho informe, se describen distintas situaciones con diferentes caudales y se describe el funcionamiento de las obras en cada caso propuesto.

Posteriormente se describe el procedimiento operativo de compuertas durante las crecientes propuesto por el Ingeniero Quintana, tanto con compuertas cerradas como con compuertas abiertas.

Finalmente se desarrollará el proceso evolutivo que incluyó una serie de ensayos para arribar a una política de operación de compuertas ofrecida por el Laboratorio de Hidráulica de la FCEFyN - U.N.C.

2.2 ESTUDIOS REALIZADOS POR LA U.N.L.P (1971)

Los experimentos desarrollados en la Universidad Nacional de La Plata quedaron constituidos por nueve ensayos en un modelo físico a fondo móvil con y sin aporte de sedimentos, para un rango de caudales que va entre 400 (m³/s) y (4200m³/s), simulando un caudal de derivación a la toma de 25 (m³/s).

A continuación se presenta una tabla con los ensayos realizados donde se muestra la variación de caudal de aporte en cada ensayo, la contribución de sólidos a través de la fórmula de Meyer Peter y Muller, lo arribado a la zona de toma y las distintas operaciones de manejo de compuertas:

Nomenclatura de las estructuras del dique

↓ Dirección del flujo

Obra de Toma	Canal Moderador (CM)		Dique Móvil (DM)				Dique Fijo (DF)
	A	B	1	2	3	4	

Ensayos realizados										
Ensayo	Q (m ³ /s)	Q _s	Q _{TOMA} (m ³ /s)	Compuertas DM				Compuertas CM		Cota superficie agua (m)
				1 (% ap)	2 (% ap)	3 (% ap)	4 (% ap)	A (%ap)	B (%ap)	
1	400	MPM	25	100	100	-	-	~	~	1373
2	400	MPM	25	~	~	~	~	100	100	1373
3	400	MPM	25	100	100	-	-	100	100	
4	200	MPM	25	~	-	-	-	100	100	1373
5	200	MPM	25	~	-	-	-	50	50	1373
6	200	MPM	25	~	-	-	-	25	25	1373
7	100	MPM	25	~	-	-	-	25	25	1373
8	25	MPM	25	-	-	-	-	-	-	
9	4200	0	-	100	100	100	100	100	100	

Tabla 1. Ensayos U.N.L.P

Referencias

- ~ Se regula la abertura para lograr la cota deseada
- 0% de abertura de compuerta
- MPM Caudal sólido aplicado al ensayo: el correspondiente a lo obtenido con la fórmula de Meyer Peter

Observaciones de los ensayos

- Ensayo 3 Importante escurrimiento sobre dique fijo imposible derivar 25 m³/s
- Ensayo 4 Se maniobra la compuerta N°4, para lograr la cota. Sólo se logra cuando está totalmente cerrada. El canal de alimentación descarga al río 175 m³/s
- Ensayo 5 Se produjo un importante ingreso de material a la toma y al canal de derivación
- Ensayo 6 Se produjeron torbellinos de eje vertical al extremo aguas arriba del muro insumergible que separa el canal de alimentación de la obra móvil.
- Ensayo 7 Similar al caso anterior, con agravante de la acumulación de material en la zona próxima de toma.
- Ensayo 8 Verificar el funcionamiento del canal de derivación
- Ensayo 9 Todas abiertas menos las de toma.

Todos estos ensayos le permitieron a la U.N.L.P evaluar las operaciones de compuertas y arribar a las siguientes conclusiones:

2.2.1 Conclusiones obtenidas de los ensayos

Las conclusiones respecto a la operación de compuertas obtenidas por la UNLP (1971) fueron las siguientes:

- a) Es conveniente encauzar al río hacia la obra móvil mediante una adecuada maniobra de las compuertas de sector durante las crecidas.
- b) Se estima excesivo el material que ingresa a la toma, entendiéndose que dicho ingreso es consecuencia de la formación de vórtices de eje vertical en el canal moderador.
- c) La formación de esos vórtices es atribuible a que en la entrada del canal moderador se produce el encuentro de dos corrientes: una proveniente del río Grande transversalmente y que ingresa al canal bordeando el muro insumergible que lo separa de la obra móvil; y la otra proveniente del río Reyes que ingresa por el muro del canal de limpieza.
- d) En determinadas condiciones de funcionamiento el material sólido que se desplaza con la corriente puede ingresar a la obra de toma como consecuencia de una insuficiente llamada de las compuertas de fondo del canal moderador.

Este estudio es el punto de partida para evaluar la operación de compuertas del dique, ya que nos brinda las variables a tener en cuenta en el análisis del manejo de los órganos de evacuación, como ser el caudal a analizar, la cota de superficie 1373 m que es cota límite la cual no se tiene escurrimiento por el dique fijo y la configuración de las compuertas para cada uno de los distintos caudales.

Lo realizado por la U.N.L.P no nos brinda una política de operación de compuertas cuando ocurre la crecida. Pero nos dice que operaciones realizar con las compuertas cuando se tiene un caudal de 400(m³/s), 200 (m³/s) y 4200 (m³/s) principalmente.

Así:

- Si tenemos un caudal de 400 (m³/s) debemos cerrar las compuertas 1 y 2 regulando las compuertas del canal moderador, o también se pueden abrir las compuertas del canal moderador y regular las del dique móvil para lograr la cota 1373 m.

- Si tenemos un caudal de 200 (m³/s) para lograr el nivel 1373 m, tenemos que ir regulando la compuerta 1 manteniendo las demás compuertas del dique móvil cerradas y variando la apertura de las compuertas del canal moderador.
- Si tenemos un caudal de 4200 (m³/s) debemos tener todas las compuertas abiertas, tanto las del dique móvil como las del canal moderador.

2.3 PROCEDIMIENTOS RECOMENDADOS POR LA S.S.R.H DE JUJUY

2.3.1 Procedimiento operativo durante crecientes

Se describirá a continuación 2 políticas de operación a realizar al momento de recibir una crecida de 600 (m³/s) que se corresponde con una crecida de frecuencia anual, estas operaciones fueron recomendadas por el Ing. Quintana (operador de la presa durante 20 años).

Estos procedimientos de operación de compuertas fueron reproducidos en el modelo físico del laboratorio de hidráulica de la U.N.C, en los ensayos 33 y 34.

Al igual que en el estudio del informe de La Plata se utilizará la nomenclatura de números para las compuertas siguiendo el mismo orden ya propuesto en el dique móvil y en el canal moderador. Lo dicho anteriormente se puede observar en el siguiente esquema. (Figura 19)

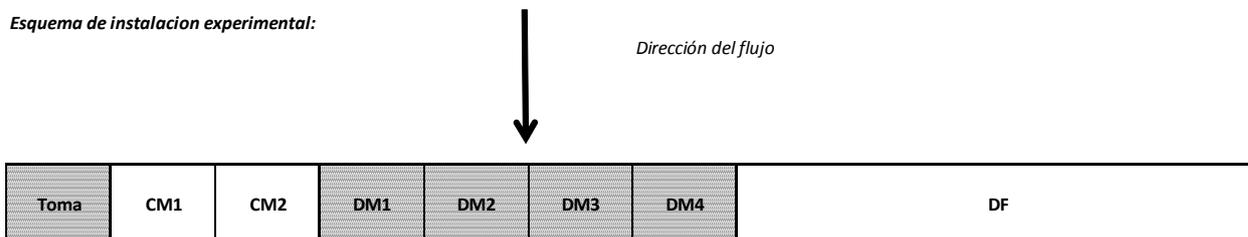


Figura 19: Esquema de Nomenclatura

2.3.2 Con compuertas cerradas

A continuación se transcriben los pasos a realizar recomendados por el Ing. Quintana, esperando al evento con las compuertas cerradas:

- 1) Acordar con las policías de guerrero y Humahuaca la alerta temprana.
- 2) Cerrar la totalidad de las compuertas haciendo pasar el pico de creciente por el dique fijo. (Figura 20)
- 3) Cuando la merma de caudal descubra la mitad de altura de las compuertas sector del dique móvil, levantar veinticinco (25) centímetros estas compuertas, comenzando por la número 3, luego la 2, siguiendo con la 4 y terminando con la 1. (Figura 21)
- 4) Cuando el nivel de agua sobre la cresta del vertedero fijo sea de cinco (5) centímetros aproximadamente, proceder a incrementar la apertura de las compuertas del dique móvil otros veinticinco (25) centímetros siguiendo la misma secuencia del caso anterior. (Figura 22)

- 5) Al cortarse la evacuación de caudal por el dique fijo, levantar, siguiendo la misma secuencia señalada, las compuertas del dique móvil hasta el 50% de la apertura total. (Figura 23)
- 6) Levantar las compuertas del canal moderador comenzando por la número 2. La apertura de estas compuertas es total. (Figura 24)
- 7) Al cortarse el caudal por el dique móvil, comenzar con la limpieza de la zona de toma mediante la siguiente secuencia: cerrar las compuertas del moderador y abrir las de la toma hasta cargar el canal aductor del desripiador. Abrir la compuerta dos del moderador hasta evacuar toda el agua del canal aductor. Repetir la secuencia hasta lograr la limpieza de la zona. (Figura 25 y Figura 26)
- 8) Comenzar la derivación normal cerrando la compuerta del moderador y abriendo las de la toma de acuerdo a necesidades preestablecidas. (Figura 27)

A continuación de resumen los pasos que componen la política de operación descrita anteriormente, cabe observar que se omite el paso 1 por ser cuestiones de gestión previa.

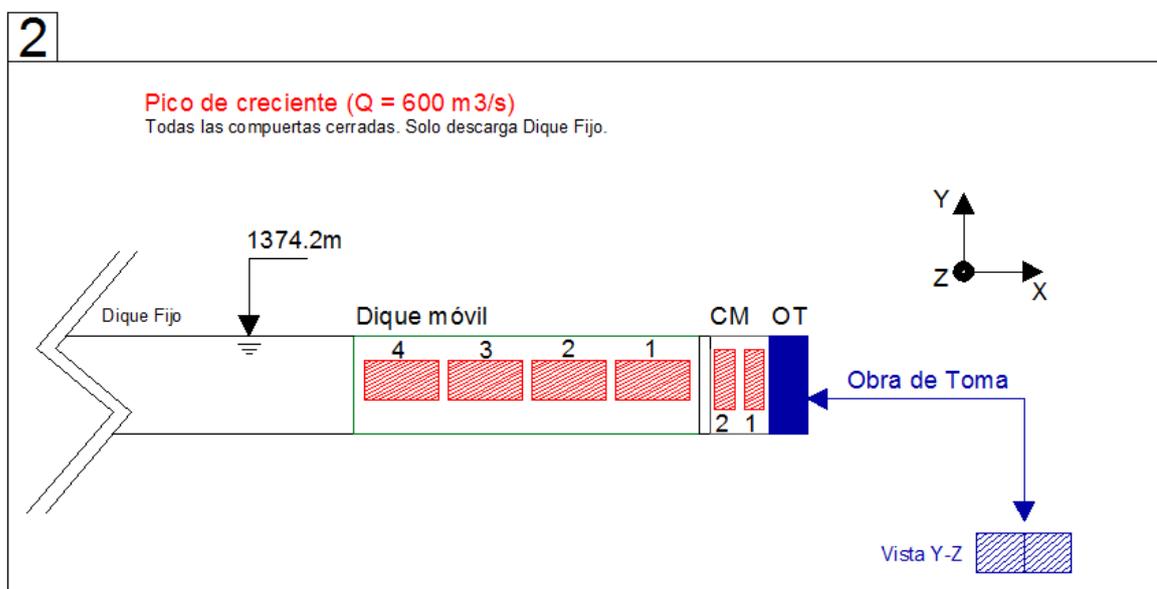


Figura 20: Procedimiento de crecidas. Con compuertas cerradas

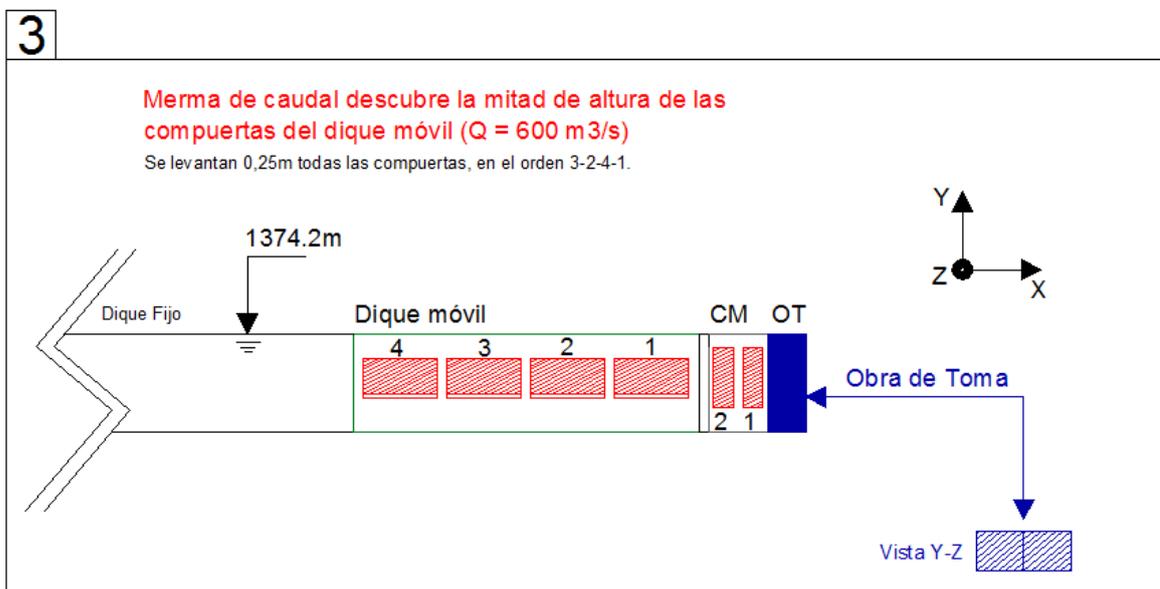


Figura 21: Procedimiento de crecidas. Con compuertas cerradas

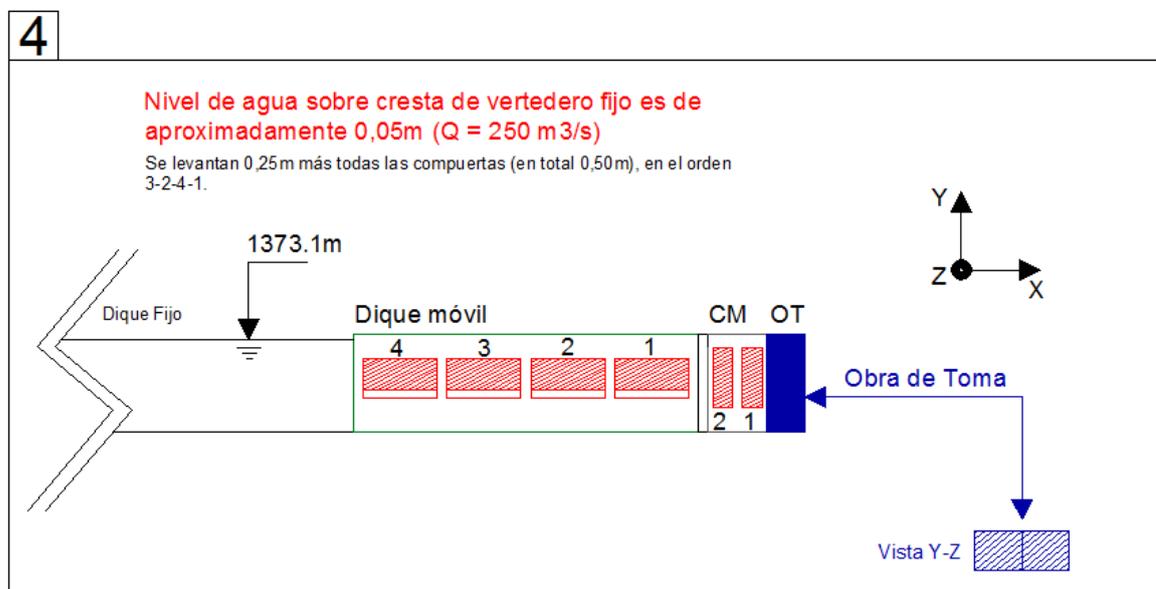


Figura 22: Procedimiento de crecidas. Con compuertas cerradas

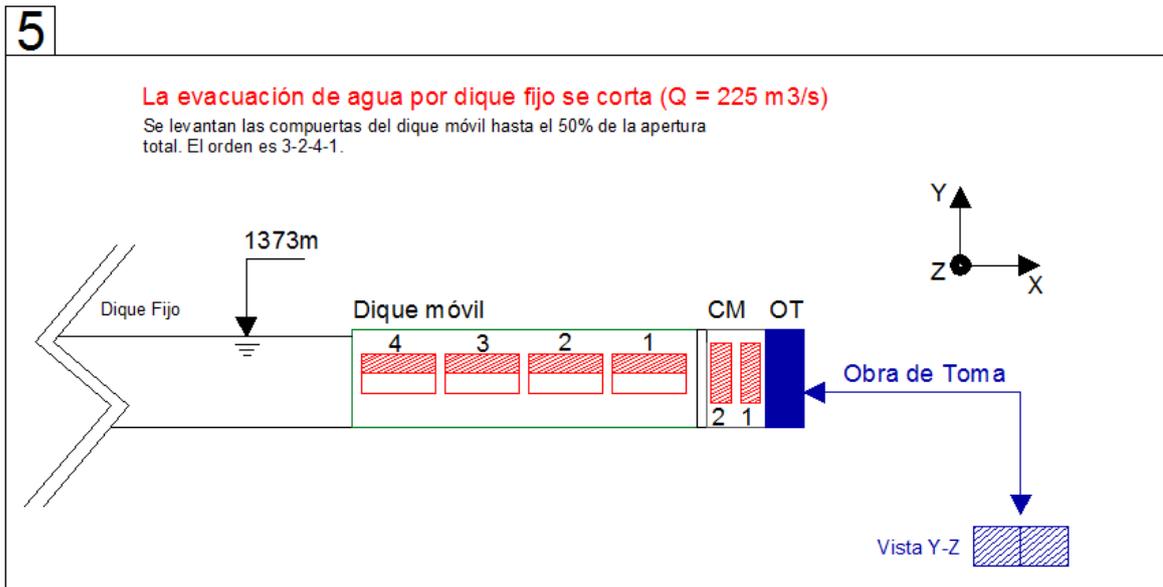


Figura 23: Procedimiento de crecidas. Con compuertas cerradas

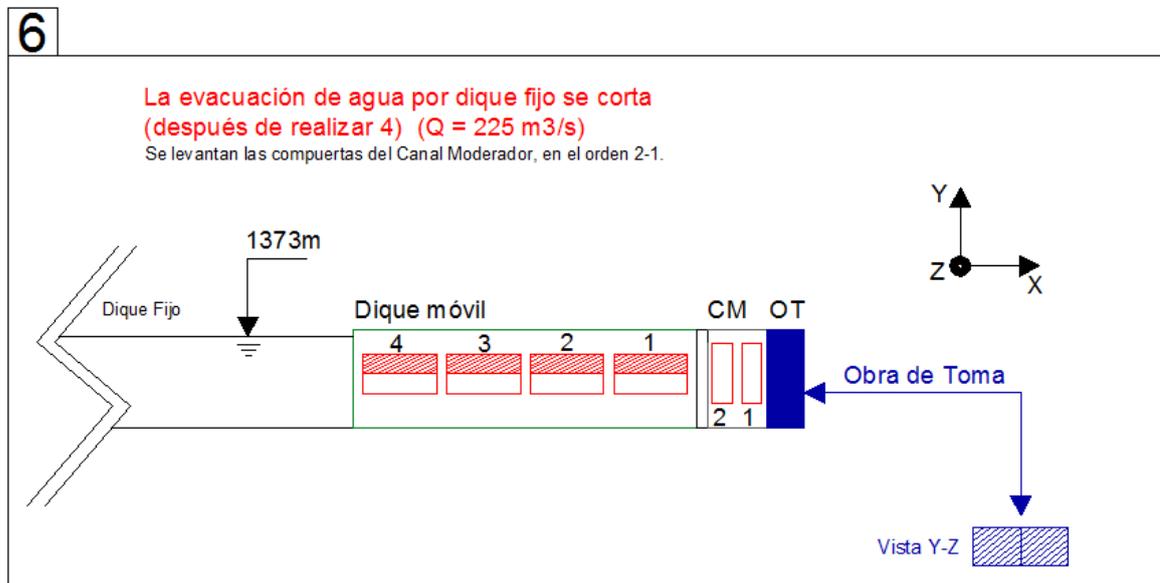


Figura 24: Procedimiento de crecidas. Con compuertas cerradas

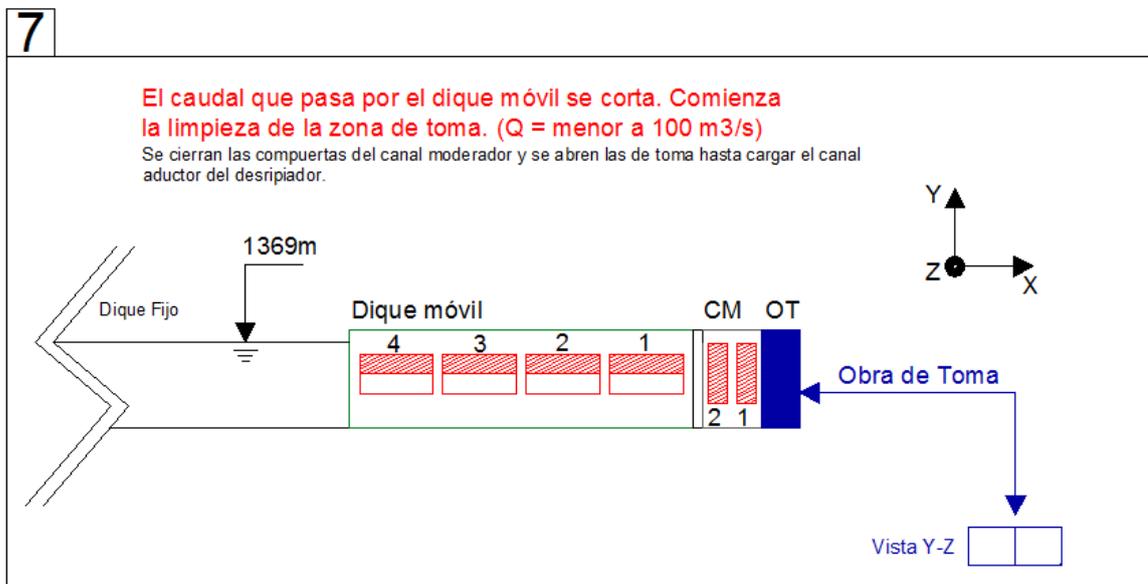


Figura 25: Procedimiento de crecidas. Con compuertas cerradas

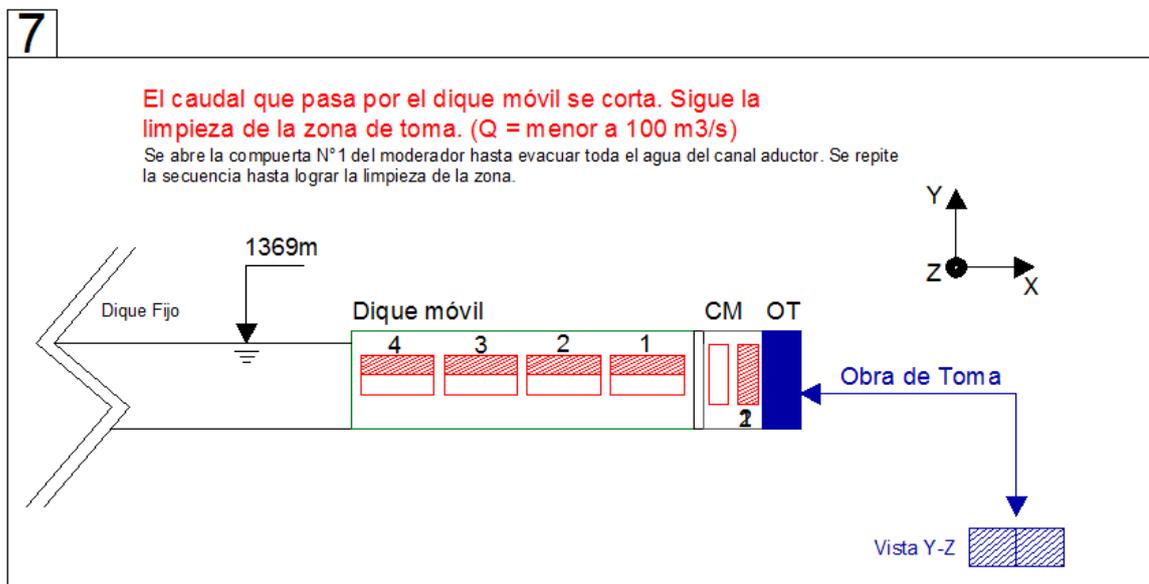


Figura 26: Procedimiento de crecidas. Con compuertas cerradas

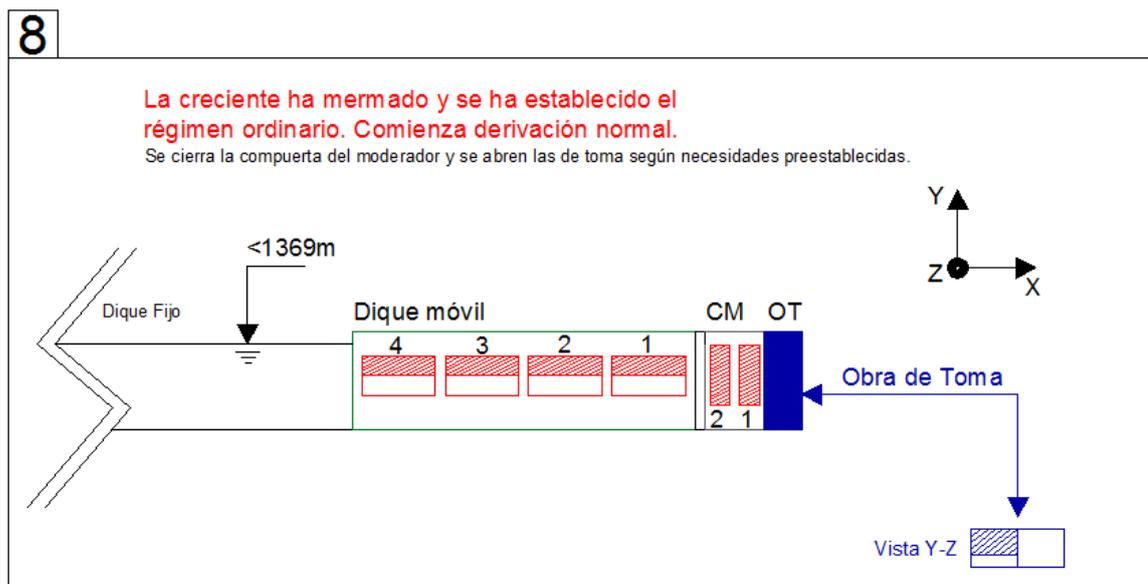


Figura 27: Procedimiento de crecidas. Con compuertas cerradas

Una vez caracterizada la política sugerida por el Ing. Quintana el Laboratorio de Hidráulica procedió a reproducir la misma a través un ensayo (Ensayo 33), el mismo se resume en la siguiente tabla:

Etapa	% de apertura							Q prototipo (m ³ /s)	Cota sup. agua DF (m)	Observaciones
	DM4	DM3	DM2	DM1	CM 2	CM1	Toma			
1	-	-	-	-	-	-	-	600	1374.2	Se hace pasar el agua totalmente por el DF
2	10%	10%	10%	10%	-	-	-	600	1374.2	Orden de apertura: DM 3,2,4,1
3	20%	20%	20%	20%	-	-	-	250	1373.1	Orden de apertura: DM 3,2,4,1
4	50%	50%	50%	50%	100%	100%	-	225	1373	Orden de apertura: DM 3,2,4,1 - CM1,2
5	-	-	-	-	-	-	100%	menor a 100	1369 (Cota en DM)	Cierro CM. Abro toma hasta cargar desripiador. Abro CM hasta evacuar flujo. Repito pasos.

Tabla 2. Procedimiento con compuertas cerradas

Conclusiones de la operación con compuertas cerradas del Ing. Quintana

Las conclusiones que uno puede extraer de lo observado en el ensayo 33 es que el hormigón de los saltos esqui del dique móvil no se deteriora, debido a que no pasan grandes caudales con sedimento a través del mismo.

Por otro lado, la apertura parcial de compuertas del dique móvil ocasiona el deterioro de los sellos inferiores y de los labios metálicos de las compuertas por el choque de las rocas sobre la estructura. Además los canales de llamada aguas arriba de la obra que se forman al realizar la apertura de una estructura de descarga son de menor magnitud.

2.3.3 Con compuertas abiertas

A continuación se detallan los pasos a realizar recomendados por el Ing. Quintana, esperando al evento con las compuertas abiertas:

- 1)** Recibida la alerta temprana, proceder a la apertura del total de las compuertas frontales (la dos del canal moderador y las cuatro del dique móvil). Las de la toma se mantienen cerradas. (Figura 28)
- 2)** Una vez que el caudal deja de pasar por el dique fijo proceder a cerrar la compuerta cuatro del dique móvil. (Figura 29)
- 3)** Alcanzado el nivel del 50% de la altura total de la apertura de los vanos del dique móvil, cerrar la compuerta número 3 del dique móvil. (Figura 30)
- 4)** Comenzar con la limpieza de la zona de toma abriendo las compuertas de la toma y cerrando las del canal moderador. Luego de cargado el canal aductor del desripador, abrir nuevamente las compuertas del canal moderador repitiendo la operación hasta la limpieza total de la zona. (Figura 31)
- 5)** Comenzar con la derivación normal de acuerdo a la demanda prevista, regulando el caudal con una de las compuertas de la toma y con la compuerta uno del canal moderador. (Figura 32)
- 6)** Cuando disminuye el caudal en el río, cerrar la compuerta uno del dique móvil. (Figura 33)
- 7)** Con la compuerta dos del dique móvil, la dos del canal moderador y una de las compuertas de la toma regular, a requerimiento, el caudal derivado. (Figura 34)
- 8)** Pasada la creciente cerrar la compuerta uno del canal moderador y mantener la regulación con la compuerta dos del dique móvil y una de las compuertas de la toma. (Figura 35)

Al igual que en el caso anterior se reprodujeron estas recomendaciones en un ensayo (Ensayo 34) en el Laboratorio de Hidráulica.

A continuación de resumen los pasos que componen la política de operación descrita anteriormente.

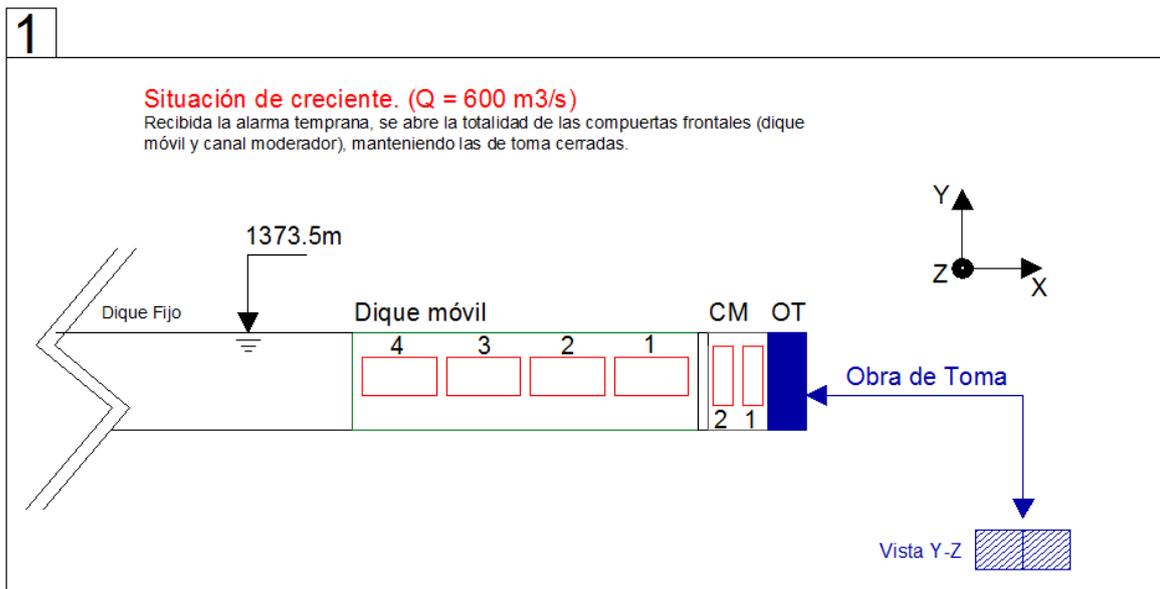


Figura 28: Procedimiento de crecidas. Con compuertas abiertas

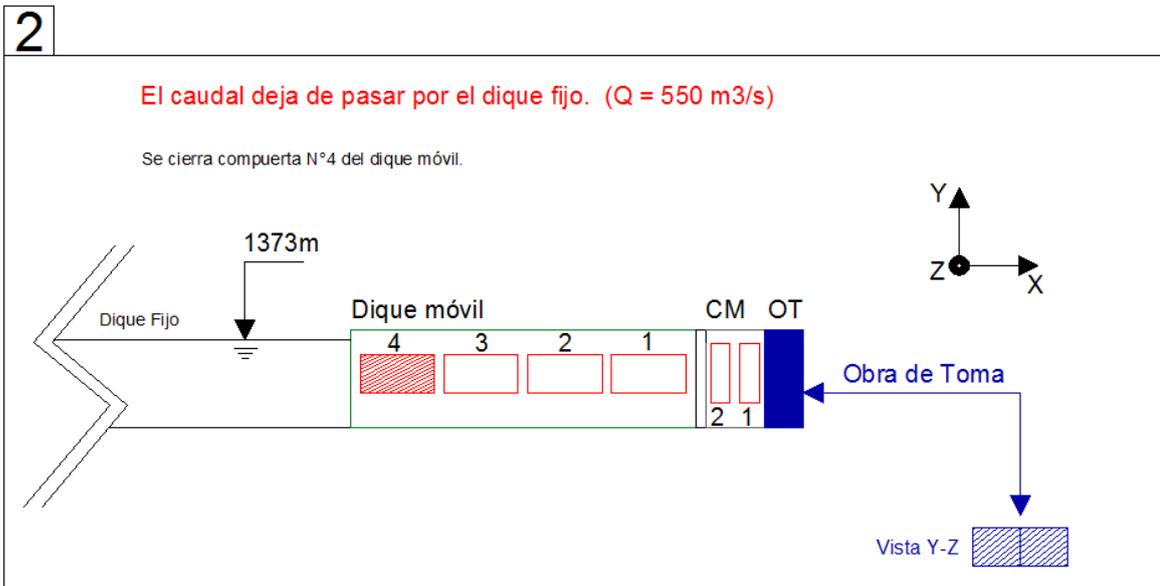


Figura 29: Procedimiento de crecidas. Con compuertas abiertas

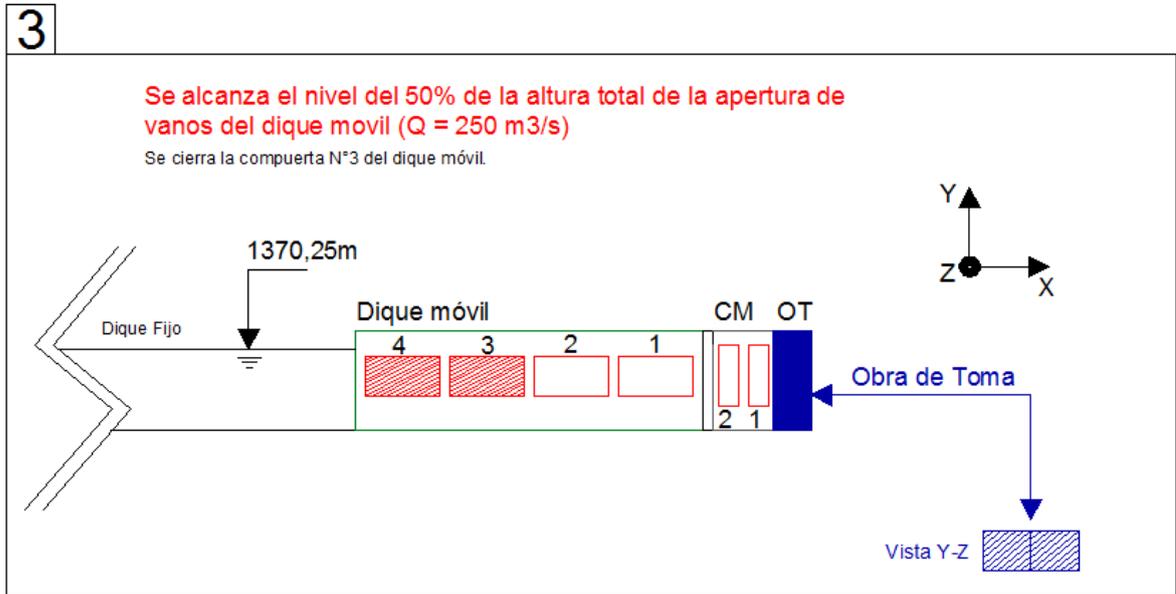


Figura 30: Procedimiento de crecidas. Con compuertas abiertas

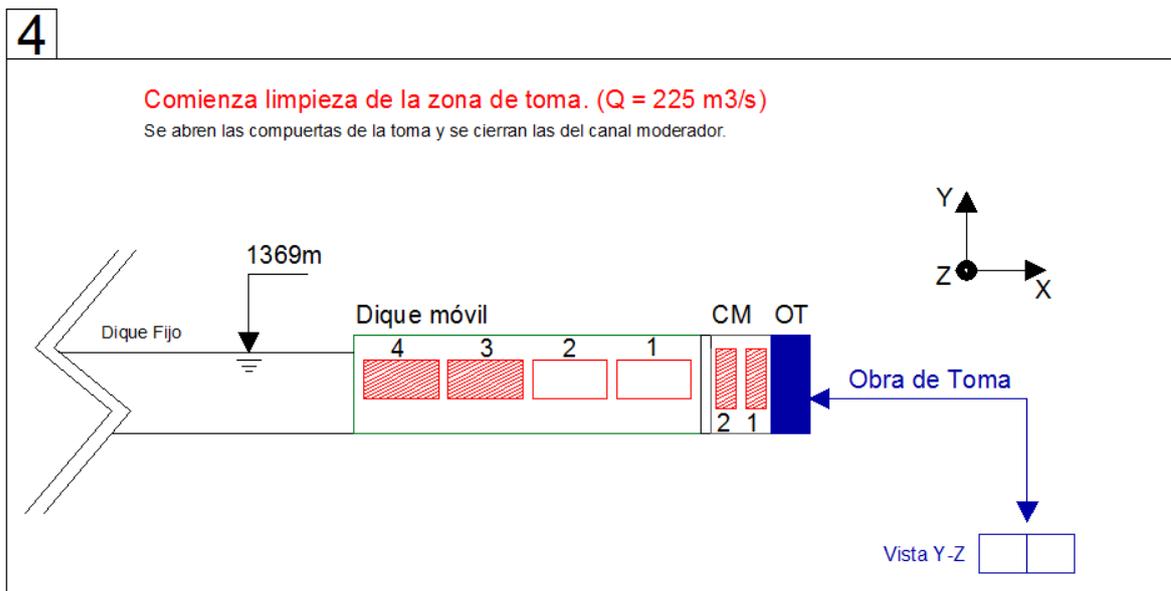


Figura 31: Procedimiento de crecidas. Con compuertas abiertas

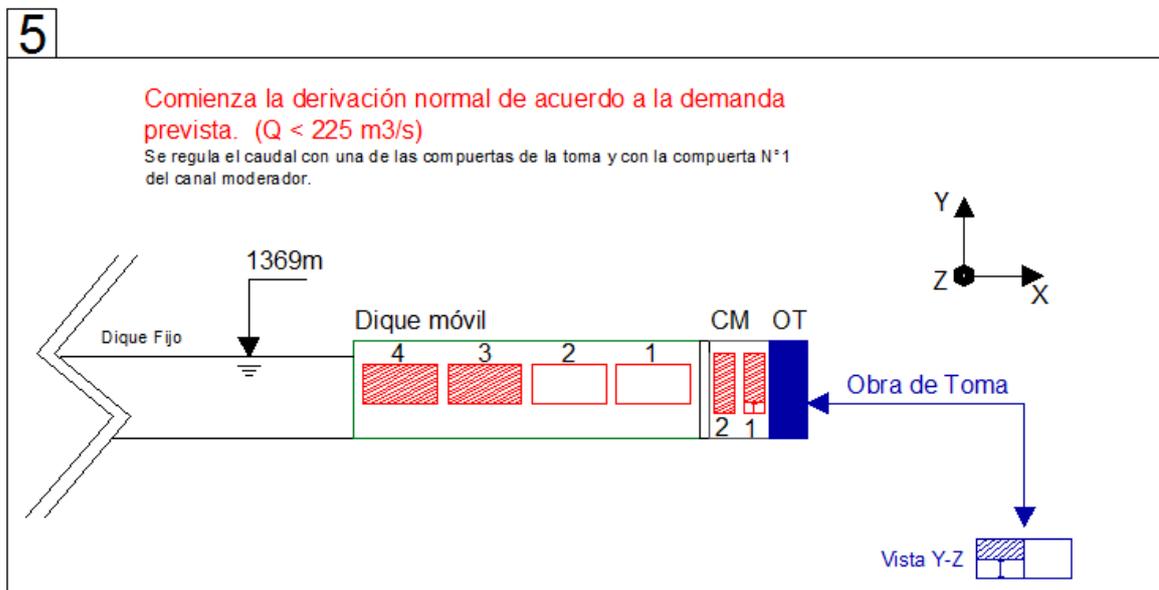


Figura 32: Procedimiento de crecidas. Con compuertas abiertas

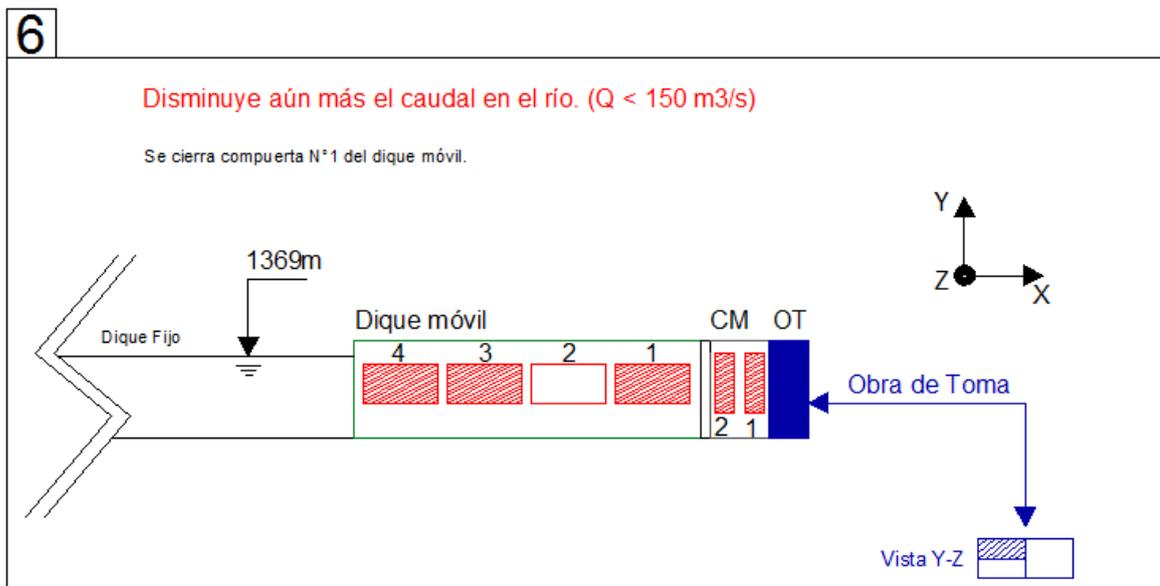


Figura 33: Procedimiento de crecidas. Con compuertas abiertas

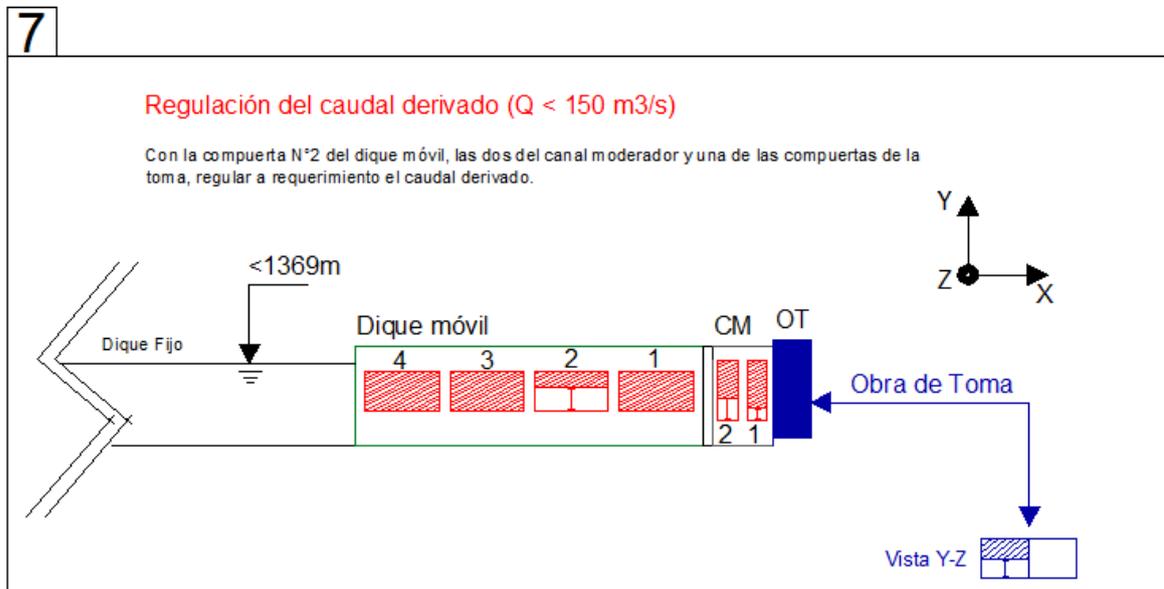


Figura 34: Procedimiento de crecidas. Con compuertas abiertas

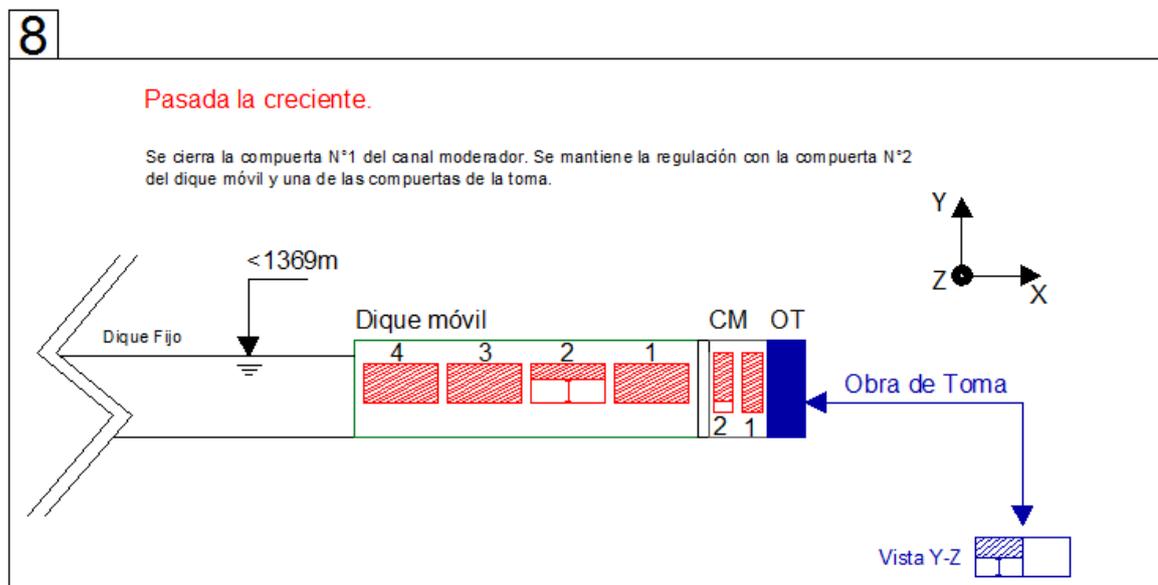


Figura 35: Procedimiento de crecidas. Con compuertas abiertas

Una vez caracterizada la política sugerida por el Ing. Quintana el Laboratorio de Hidráulica procedió a reproducir la misma a través un ensayo (Ensayo 34), el mismo se resume en la siguiente tabla:

Etapa	% de apertura							Q en prototipo (m ³ /s)	Cota sup. agua DF (m)	Observaciones
	DM1	DM2	DM3	DM4	CM 1	CM2	Toma			
1	100%	100%	100%	100%	100%	100%	-	600	1373,5	
2	100%	100%	100%	-	100%	100%	-	550	1373	
3	100%	100%	-	-	100%	100%	-	250	1370,25 (Cota Margen Derecha DM)	
4	100%	100%	-	-	-	-	100%	225	1369 (Cota Margen Derecha DM)	Cierro CM. Abro toma hasta cargar desripiador. Abro CM hasta evacuar flujo. Repito pasos.

Tabla 3. Procedimiento con compuertas abiertas

Conclusiones de la operación con compuertas abiertas del Ing. Quintana

Las conclusiones que uno puede extraer de lo observado en el ensayo 34 es que en el dique móvil se evita el deterioro de los sellos inferiores y de los labios metálicos de las compuertas. Además los canales de llamada aguas arriba de la obra que se forman al realizar la apertura de una estructura de descarga son de mayor magnitud.

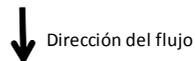
El inconveniente que se genera en este caso es el deterioro del hormigón de los saltos esquí del dique móvil ya que al pasar grandes caudales con sedimentos a través de ellos, altas velocidades de flujo actúan sobre la estructura lo que es nocivo para la misma.

RESUMEN

DIQUE LOS MOLINOS - JUJUY

Procedimiento durante crecidas para caudales menores a 600 m³/s

Nomenclatura de las estructuras del dique



Obra de Toma	Canal Moderador (CM)		Dique Móvil (DM)				Dique Fijo (DF)
	1	2	1	2	3	4	

1)

Con compuertas cerradas									
Pasos	Compuertas DM				Compuertas CM		Toma (% ap)	Cota superficie	Observaciones
	1	2	3	4	1 (% ap)	2 (% ap)			
2	-	-	-	-	-	-	-	1377	Al comienzo se hace pasar el agua totalmente por el DF
3	0,25 m	0,25 m	0,25 m	0,25 m	-	-	-	1375	Orden de apertura: 3,2,4,1
4	0,5 m	0,5 m	0,5 m	0,5 m	-	-	-	1373,05	Orden de apertura: 3,2,4,1
5 y 6	1,25 m	1,25 m	1,25 m	1,25 m	100%	100%	-	1373	Orden de apertura: 3,2,4,1 DM 2,1 CM
7 y 8	-	-	-	-	-	-	100%	1369	Cierro CM. Abro toma hasta cargar desripiador. Abro CM hasta evacuar flujo. Repito estos pasos.

Referencias

- Cerrado
1,25 m en DM :50% de abertura total de compuerta

2)

Con compuertas abiertas									
Pasos	Compuertas DM				Compuertas CM		Toma (%ap)	Cota superficie	Observaciones
	1 (%ap)	2 (%ap)	3 (%ap)	4 (%ap)	1 (%ap)	2 (%ap)			
1	100%	100%	100%	100%	100%	100%	-	1377	Orden de apertura: 3,2,4,1 CM ; 2 y 1 CM
2	100%	100%	100%	-	100%	100%	-	1373	Caudal deja de pasar por el DF
3	100%	100%	-	-	100%	100%	-	1370,25	Alcanzado el nivel de 50% de la apertura de los vanos de DM.
4	100%	100%	-	-	-	-	100%	-	Cierro CM. Abro toma hasta cargar desripiador. Abro CM hasta evacuar flujo. Repito estos pasos.
5	100%	100%	-	-	~	-	~	-	Comenzar derivación normal de acuerdo a la demanda
6	-	100%	-	-	~	-	~	-	Al disminuir el caudal se cierra DM 1
7	-	100%	-	-	~	~	~	-	Regular a requerimiento el caudal derivado
8	-	~	-	-	~	-	~	-	Pasada la creciente

Referencias

~ Se regula la abertura para lograr caudal deseado
- Compuerta cerrada

Tabla 4: Resumen de operación de compuertas abiertas y cerradas

2.4 ESTUDIOS REALIZADOS EN LA FCEFYN-UNC

Estos estudios buscan arribar a una política de operación propuesta, la cual busca verificar y optimizar las consignas de manejo de las estructuras de control, a los fines de regular los procesos hidrosedimentológicos presentes en las proximidades de la presa aguas arriba. Esta evaluación se lleva a cabo para las condiciones de flujo relevantes (descarga de las crecidas frecuentes en todo el sistema, descarga máxima en vertedero fijo y descarga máxima en vertedero móvil y descargador).

Los experimentos se realizaron sin aporte de material, esta situación tiene como premisa fundamental abordar el análisis del efecto hidrodinámico y morfológico del cauce aguas arriba, resultante de distintas combinaciones o alternativas de apertura de compuertas.

Los objetivos del procedimiento de operación propuesto son:

- Estimar de forma cualitativa la zona de influencia hidráulica y sedimentológica debido al efecto “llamada” que producen la apertura de los órganos de descarga (vertedero móvil y descargador de fondo) del dique Los Molinos.
- Caracterizar espacialmente los patrones hidrodinámicos del flujo en el entorno de las compuertas, así como también la evolución temporal de la batimetría aguas arriba de las obras.
- Estimar la capacidad hidráulica y sedimentológica de evacuación de cada órgano de descarga y del conjunto.

Para arribar a un procedimiento de operación óptimo se realizó un conjunto de ensayos, los cuales permitieron evaluar las distintas variables que intervienen en un proceso de selección de política de operación.

Se realizaron una serie de 7 ensayos tanto a caudal variable como a caudal constante, los cuales serán descriptos en el capítulo 4.

Para abordar el desarrollo dichos ensayos se tuvieron en cuenta 3 premisas fundamentales:

- La sensibilidad a la capacidad de evacuación de las estructuras ante distintas combinaciones o configuraciones.
- El área de estudio a representar en el modelo.
- El material a utilizar para el fondo móvil aguas arriba

Estas premisas fundamentales serán desarrolladas a lo largo de este apartado.

2.4.1 Sensibilidad del modelo físico

La sensibilidad del modelo físico ante diferentes formas de ingreso de caudal al mismo se determinó a partir de los ensayos realizados en el Laboratorio de Hidráulica.

Esta etapa permitió cuantificar el caudal evacuado por las diferentes estructuras de descarga, bajo diferentes condiciones de ingreso de caudal. Los ensayos realizados se realizaron con un caudal de 600 m³/s en prototipo.

Los escenarios ensayados fueron:

- Ensayo 1: Caudal ingresado totalmente por el Río Reyes.
- Ensayo 2: El caudal fue ingresado tanto por el Río Grande (el 65% del total) como por el Río Reyes (el 35% restante).
- Ensayo 3: Caudal ingresado totalmente por el Río Grande

Para clarificar lo anteriormente descrito, se presenta la siguiente tabla:

Ensayo	Q prototipo (m3/s)	Q Río Grande (m3/s)	Q Río Reyes (m3/s)	% de apertura					
				CM1	CM2	DM1	DM2	DM3	DM4
1	525	0	525	100%	100%	100%	100%	100%	100%
2	528	331	197	100%	100%	100%	100%	100%	100%
3	643	643	0	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Tabla 5: Estado de compuertas

En todos los casos, la cota de la superficie de agua estuvo alrededor de los 1751.5 m en prototipo; es decir por debajo de la cota del labio del DF (1373), por lo que el flujo no paso a través de esta estructura.

Se utilizó la técnica PTV (Velocimetría por seguimiento de Partículas) para obtener las velocidades superficiales y las líneas de flujo. (Figura 36, Figura 37 y Figura 38)

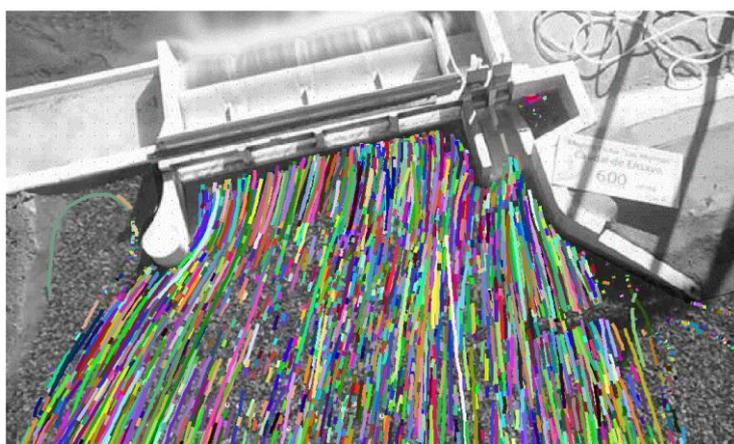


Figura 36: Líneas de flujo. Ensayo 1

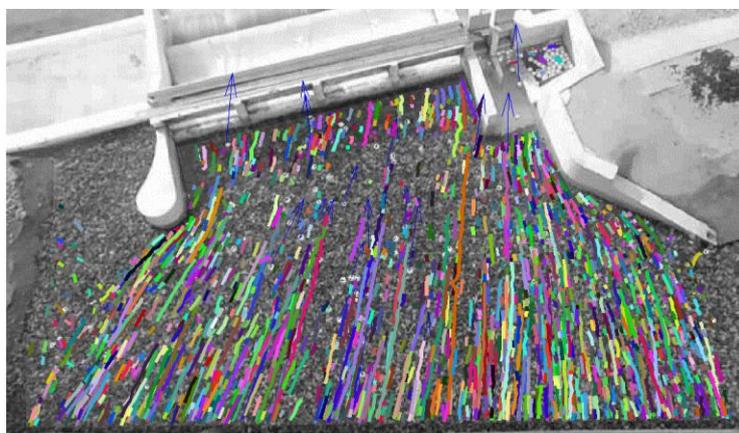


Figura 37: Líneas de flujo. Ensayo 2

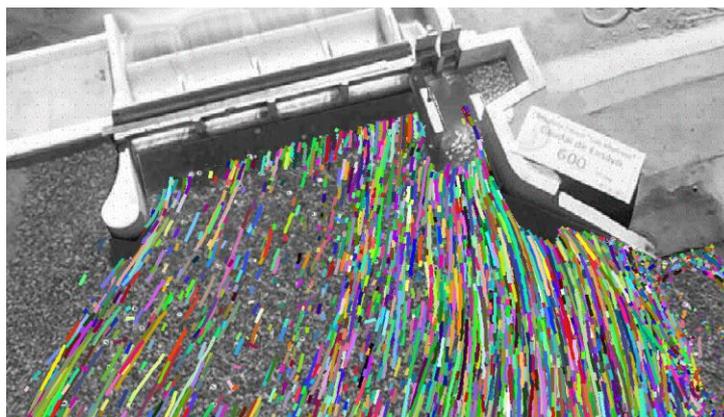


Figura 38: Líneas de flujo. Ensayo 3

Se puede observar las zonas de separación del flujo debido a los obstáculos existentes en las márgenes del DM. Estos muros lo que hacen es disminuir el caudal evacuado por las compuertas de los extremos (DM1 y DM4). Además, el muro existente entre DM y CM provoca que el caudal evacuado por CM1 sea mayor al de CM2.

También se midieron las velocidades con tubo Pitot obteniéndose lo que se muestra en la siguiente figura:

Ensayo	Q Total en prototipo (m ³ /s)	Prototipo														
		Velocidad media (m/s)						Caudal (m ³ /s)								
		CM1	CM2	DM1	DM2	DM3	DM4	CM1	CM2	DM1	DM2	DM3	DM4	TOTAL	Δ	Error
1	525	5,40	5,40	2,78	2,99	3,21	3,21	87,85	87,85	94,41	101,70	109,17	109,17	590	65	11%
2	528	5,87	5,70	3,16	3,06	3,28	3,26	95,48	92,67	107,52	103,96	111,71	110,83	622	94	15%
3	643	6,42	5,85	3,59	3,75	3,89	3,45	104,39	95,15	122,02	127,45	132,33	117,45	699	56	8%
Máximo	643	6,42	5,85	3,59	3,75	3,89	3,45	104,39	95,15	122,02	127,45	132,33	117,45			
Mínimo	525	5,40	5,40	2,78	2,99	3,21	3,21	87,85	87,85	94,41	101,70	109,17	109,17			
Promedio	565	5,90	5,65	3,17	3,26	3,46	3,31	95,90	91,89	107,98	111,04	117,74	112,48			
Desvío	67	0,51	0,23	0,41	0,42	0,37	0,13	8,28	3,71	13,81	14,26	12,70	4,38			

Tabla 6: Velocidades con tubo Pitot

Si tomamos los valores promedio de los ensayos realizados, podemos decir que la compuerta DM3 es la más eficiente. Si seguimos este criterio, le sigue DM2, luego DM4 y DM1.

Conclusiones

En la siguiente tabla se presentan los porcentajes de caudal evacuado por cada estructura en cada ensayo realizado:

Ensayo	Prototipo					
	% de caudal evacuado					
	CM1	CM2	DM1	DM2	DM3	DM4
1	15%	15%	16%	17%	18%	18%
2	15%	15%	17%	17%	18%	18%
3	15%	14%	17%	18%	19%	17%

Tabla 7: Porcentajes de caudal evacuado por cada estructura de descarga bajo diferentes condiciones de ingreso de caudal

De acuerdo a los resultados obtenidos se puede destacar lo siguiente:

- A partir de las mediciones realizadas, se ha comprobado que para distintas combinaciones de distribución de caudales y por ende distintas condiciones de ingreso al modelo, el caudal evacuado por las diferentes obras de descarga presenta a lo sumo una diferencia del 1%, entre una condición y otra.
- Al hacer ingresar toda el agua por el Río Reyes (Ensayo 1), las compuertas que más trabajan son las centrales y luego las laterales. En orden de evacuación de caudal, se pueden ordenar de la siguiente forma de mayor a menor: DM4, DM3, DM2 y DM1. El flujo se concentra en la margen izquierda del DM y esto es debido a la fuerza centrífuga ya mencionada, que genera la entrada de caudal por este curso fluvial.
- Por otro lado, al hacer ingresar toda el agua por el Río Grande (Ensayo 3), también son las compuertas centrales las que más trabajan. En orden de evacuación de caudal, se pueden ordenar de la siguiente manera de mayor a menor: DM3, luego DM2, DM4 y finalmente DM1. Además, CM1 evacúa mayor caudal que CM2. El caudal evacuado por CM es mayor en este caso que en el Ensayo 1.
- En el ensayo 2, en el que se hace ingresar al modelo un 65% del caudal por el Río Grande y un 35% del mismo por el Río Reyes (tal como lo dicta el estudio hidrológico realizado en la cuenca) se obtiene como resultado una combinación de los ensayos anteriormente descriptos (el 1 y el 3).

Finalmente podemos concluir que el modelo es poco sensible a la distribución de caudales en el ingreso al mismo.

2.4.2 Área de estudio a representar en el modelo

De acuerdo a la observación temporal de imágenes satelitales se ha inferido que la máxima zona activa por la llamada de las obras de descarga se desarrolla en un dominio prácticamente de 200 m x 200 m en el prototipo, por lo que se dispone en el modelo de fondo móvil respetando el área mencionada. Figura 39

En el sector indicado se reemplazará el fondo fijo, por arena de granulometría cuasi uniforme en el rango 0,6 -1 mm de diámetro.

La zona de ingreso de flujo al modelo permanece con lecho fijo y entre la zona inmediatamente adyacente al dique y el lecho fijo, se colocó material de transición de tamaño 1 – 5 mm para evitar un cambio abrupto de la rugosidad y la aparición de efectos parásitos indeseados.

Aguas abajo del dique móvil se colocará una tolva que permitirá retener sedimentos y medir el volumen sólido que haya pasado por la/las compuertas.



Figura 39: Área de estudio con lecho erosionable (fondo móvil)

En cuanto al perfil longitudinal inicial, previo a cada ensayo, se nivela el fondo móvil de arena a la cota de descarga de cada estructura, manteniendo hacia aguas arriba el ángulo de reposo del material hasta alcanzar la cota del dique fijo (1.373,00). En la siguiente figura se puede apreciar lo dicho para el perfil longitudinal:

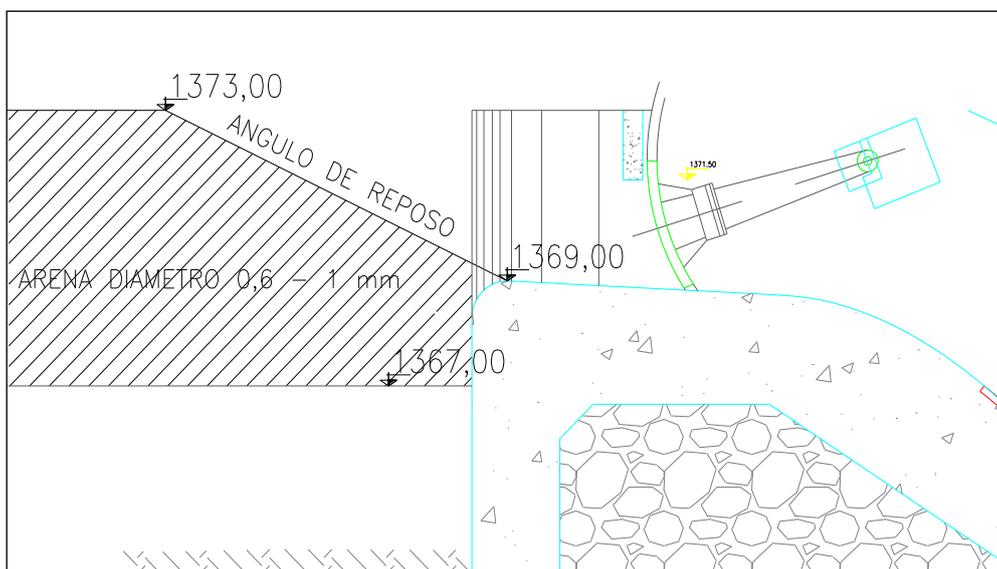


Figura 40: Perfil longitudinal al inicio de cada ensayo

2.4.3 Material fondo móvil

Para determinar el material de fondo móvil se utilizó a modo de referencia la granulometría para el prototipo establecida por el Laboratorio de Hidráulica de la Universidad de La Plata (1971), resultante del análisis de 16 granulometrías de lecho

en la zona del modelo, 10 en el Río Grande aguas arriba de las obras, 4 en el Reyes y 2 aguas abajo (curva Lecho del Río en Figura 41).

En la actualidad, el lecho del río aguas abajo del dique, se encuentra 6 m por debajo de su condición inicial. Esto responde a los procesos erosivos ocurridos con la consecuente remoción del material fino superior. Este cambio granulométrico ha sido analizado por Halcrow (2009) mediante 3 sondeos y recientemente, por la empresa ROGGIO, a través de la realización de 2 sondeos de 20m aguas abajo de la obra y 10 cateos a una profundidad de 4m. En las respectivas memorias, se cita, que se trata de suelos tipo grava arenosa con algunos y/o muchos rodados y que se han hallado bloques de roca o clastos de diferentes espesores de hasta 40 cm.

Para representar el lecho móvil en el modelo se ha considerado un material natural de la misma densidad y de características clásticas similares a las del lecho actual, cuya curva granulométrica llevada a escala 1:65 la denominaremos “curva ideal”.

Para pasar de la constitución ideal a la real a emplear en el modelo, es necesario tener en cuenta que escalar todos los diámetros lleva a que parte importante del contenido de esa curva granulométrica ideal, aproximadamente el 35 % está constituido por diámetros inferiores a 75 micrones (pasante Tamiz 200). Este material muy fino que no participa en la rugosidad es generador de efectos parásitos no deseables, como falta de turbulencia y tensión superficial, por lo que se ha excluido esta fracción fina, lo que resulta en la curva denominada “lecho del modelo” en la Figura 41.

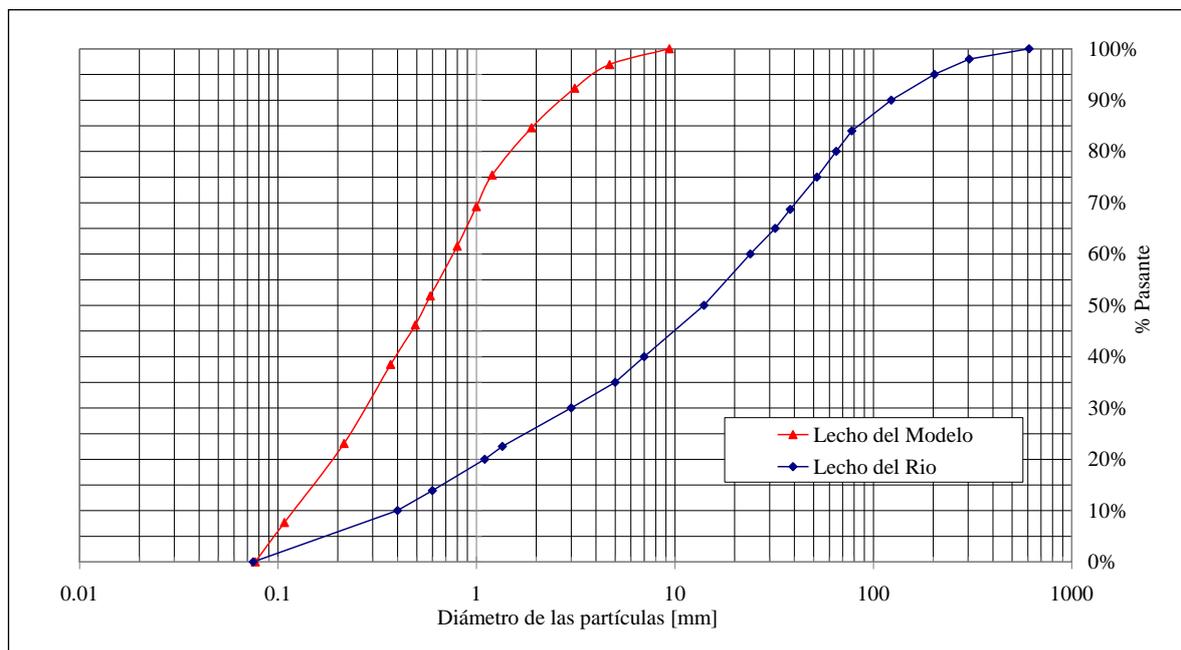


Figura 41: Granulometría del prototipo y modelo

Además es importante considerar que si el diámetro medio del material del modelo resulta menor a 0,6 – 1 mm, se forman formas de fondo como rizos y/o ondulaciones de pequeña longitud, que falsean la similitud con las naturales. Por esta razón se consideran estos diámetros, como los mínimos admisibles.

A partir de esta última conclusión se elige el material de fondo móvil de 0,6 – 1 mm para obtener un flujo adecuado de sedimentos a través de las estructuras y también a lo largo del lecho aguas arriba del dique, no se elige un tamaño inferior, debido a que resultaría un estudio no representativo a la realidad. Tomando este valor como el límite permitido se cambia el fondo móvil por un fondo fijo en el área de estudio a representar en el modelo físico.

2.4.4 Política de operación de compuertas propuesta

De acuerdo a los ensayos realizados que se explicarán en el capítulo 4 y a los resultados obtenidos de los mismos, proponemos a continuación un procedimiento de operación de compuertas cuando ocurra la crecida anual:

- En la rama ascendente del hidrograma de crecida esperar con todas las compuertas del DM abiertas.

De esta manera; en el arribo del evento hidrológico, las compuertas trabajan a pelo libre produciendo la evacuación del sedimento del lecho desde distancias más considerables.

- Una vez observado el máximo caudal y en coincidencia con el comienzo del receso del hidrograma, resultaría recomendable favorecer la sedimentación lo más lejos de la obra de toma posible; para lograr este efecto, es fundamental, que la estructuras de evacuación trabajen a presión conformando nuevamente un embalse hacia aguas arriba.
- Al alcanzar el caudal máximo de la crecida, los descargadores de fondo del CM (CM1 y CM2) deben abrirse durante el tiempo necesario para liberar la zona de toma de los sedimentos depositados. Posteriormente, deben cerrarse, con el objeto de resguardar la estructura de la presa, ante potenciales socavaciones extremas en la pila próxima (la que separa CM y DM).

Se ha observado que la mejor forma de esperar la crecida de 600 m³/s es con las 4(cuatro) compuertas del Dique Móvil abiertas. Esto es con DM1, DM2, DM3 y DM4, manteniéndose cerrados los descargadores de fondo del Canal Moderador. Para lograr que las 4 compuertas del DM trabajen a presión bajo este caudal, lo que debe realizarse es generar la limpieza de la zona de toma abriendo CM. Luego de que se haya evacuado el sedimento de esta zona, se procede a cerrar CM para evitar socavación en la zona inmediatamente aguas arriba de DM1.

- Posteriormente, al ir decreciendo el caudal (receso del hidrograma); se deben ir cerrando las compuertas en forma progresiva de tal manera que las estructuras de descarga que permanezcan abiertas trabajen siempre a presión.

El orden de cierre de las compuertas a medida que decrece el caudal es el siguiente:

-DM4

-DM3

- DM2

- DM1.

Terminología importante de la teoría del hidrograma unitario

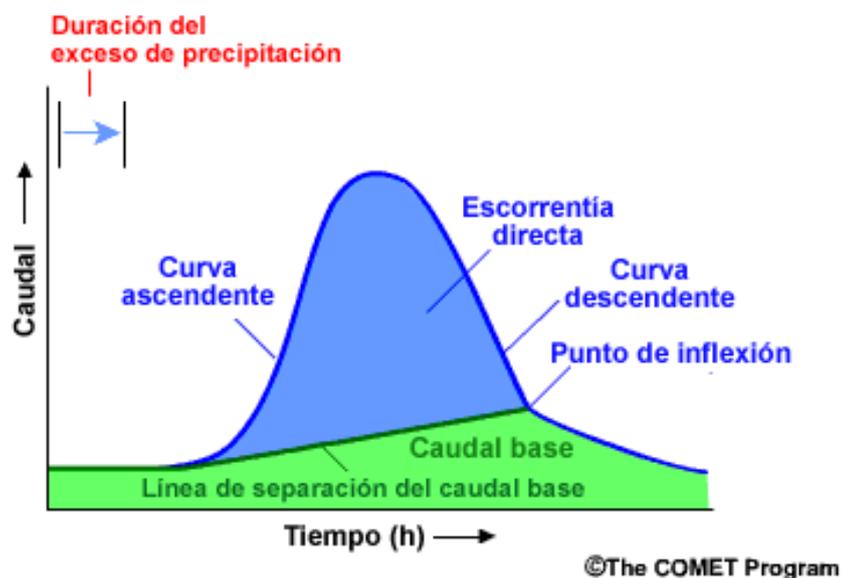


Figura 42. Hidrograma unitario

- Curva ascendente del hidrograma:

Todas las compuertas del DM abiertas. Trabajan a pelo libre, se produce la limpieza de la zona aguas arriba del dique.

- Caudal pico del hidrograma:

Abro CM para producir la limpieza de la zona de toma durante un intervalo de tiempo.

CM trabaja a presión

- Receso del hidrograma:

Todas las compuertas del DM que permanezcan abiertas hacer que trabajen a presión. La sedimentación ocurre lejos del dique.

Orden de cierre: DM4→DM3→DM2→DM1

CAPITULO 3: METOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1 INTRODUCCIÓN

En el siguiente capítulo se desarrollaran las actividades realizadas en cada uno de los ensayos, las cuales se hicieron para obtener un escenario adecuado según cada caso propuesto y para relevar de la mejor manera los datos necesarios para el análisis.

En esta metodología se describen las tareas que se hicieron antes de cada ensayo para obtener una representación lo más aproximada a la realidad, también se describe lo realizado durante el ensayo con el fin de relevar correctamente todos los datos necesarios y finalmente se resumen las actividades hechas al finalizar el ensayo con el objetivo de obtener el impacto final que ocasiono el evento.

3.2 PROCEDIMIENTO PREVIO AL ENSAYO

Se niveló el sedimento (arena 0,6 - 1mm) de manera uniforme a una cota aproximada de 1373m en prototipo, correspondiente a la cota superior (labio) del dique fijo. La tarea se realizó mediante nivel óptico y mira milimétrica, llevando la arena almacenada en ensayos anteriores en la tolva de retención. Se prestó especial atención a las zonas próximas a las compuertas, que constituyen el lugar de mayor interés. Se mantuvo todas las compuertas cerradas.



Figura 43: Nivelación del terreno



Figura 44: Nivelación del terreno



Figura 45: Nivelación del terreno

3.3 PROCEDIMIENTO DURANTE EL ENSAYO

Se evacuó por el río Grande un caudal de aproximadamente 150 m³/s (prototipo). Se buscó así inundar la zona próxima a las compuertas, sin perturbar las condiciones iniciales, simulando de la manera más apropiada las condiciones reales que se dan en la crecida. Así obtuvimos la condición inicial del ensayo.

A continuación, se ajustó el caudal del Río Grande hasta lograr el deseado. Luego, se hizo ingresar el caudal deseado por el Río Reyes.

Se tomaron fotografías de la zona aguas arriba del dique desde un punto fijo, para luego comparar la configuración del cauce a medida que las compuertas evacuan los sedimentos. A modo de ejemplo se muestra en la (Figura 46) la zona de estudio en el momento previo a iniciar el ensayo.



Figura 46: Condición inicial aguas arriba

Mientras se observaron cambios significativos en la transformación de la fosa y mientras los sedimentos tuvieron una tasa de evacuación activa relativamente en cantidad, se realizó:

- Medición de caudales de ambos ríos (observación de los limnímetros calibrados).
- Medición de las cotas de los puntos más significativos de la fosa erosionada, mediante el nivel y la mira milimétrica.

A modo de ejemplo, se presenta en la (Figura 47) la referencia de los puntos donde se tomaron las mediciones.

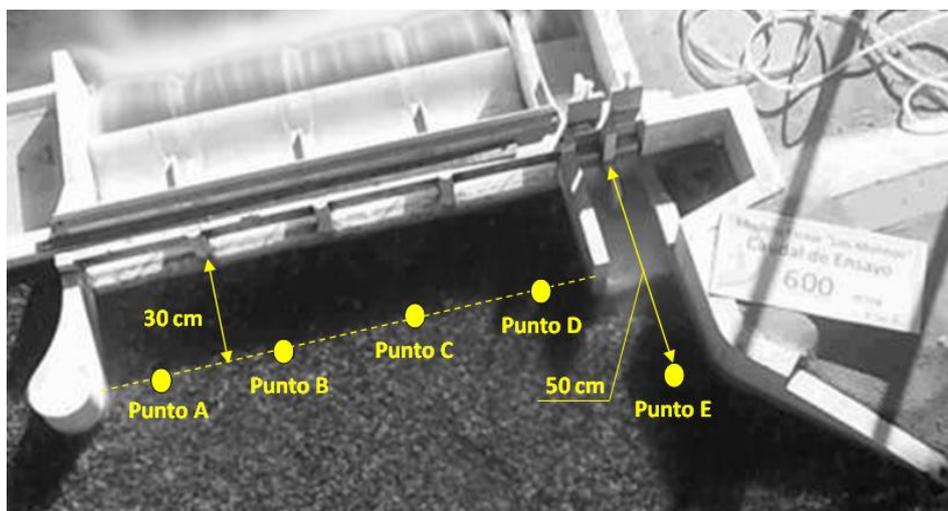


Figura 47. Puntos Relevados

- Toma fotográfica de la situación en cada instante, para poder analizar a posteriori la evolución de la fosa de erosión en planta (2D).
- Lectura del nivel de agua en 4 puntos característicos aguas arriba del dique:



Figura 48: Puntos característicos aguas arriba del dique

Una vez que se encontró la estabilidad del proceso erosivo, es decir, cuando la fosa dejó de crecer o variar sus dimensiones y el transporte de sedimentos es despreciable o nulo, se realizó la última medición con los pasos mencionados anteriormente.

Finalizadas las etapas anteriores, se procedió a un último relevamiento de puntos, más detallado y en mayor cantidad, con el nivel y la mira. Se tomaron varios puntos en la fosa y en zonas próximas, para obtener perfiles más exactos que permitan trazar curvas de nivel respecto a la erosión generada. Esto sirvió de sustento para luego comparar cualitativamente las fotografías con los perfiles y las curvas de nivel. A modo de ejemplo, en la (Figura 49) se ilustran los puntos relevados en uno de los ensayos realizados:

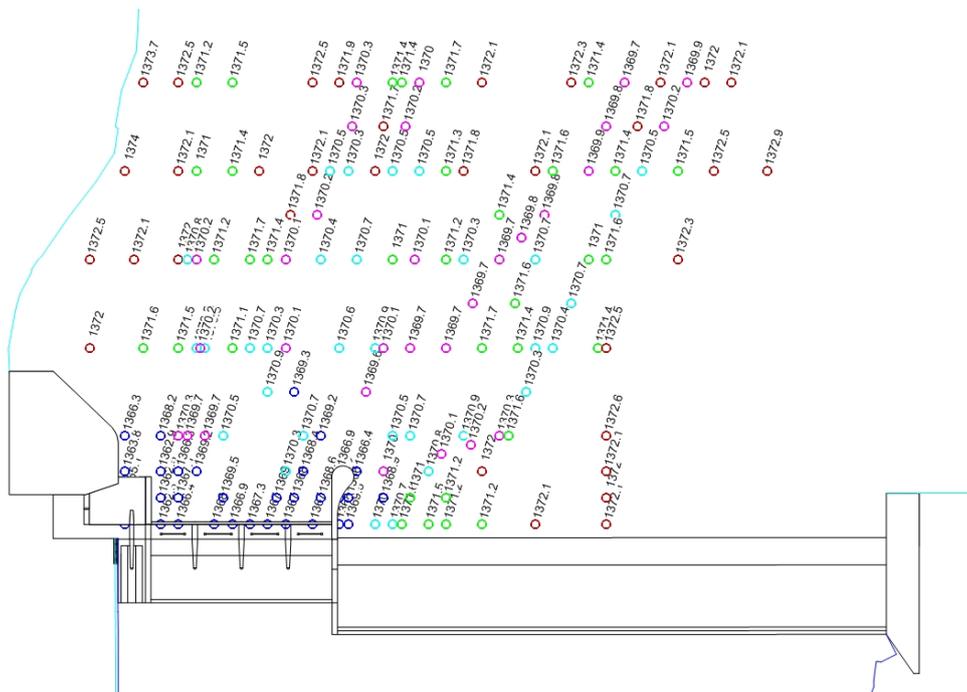


Figura 49: Puntos relevados

3.4 PROCEDIMIENTO POSTERIOR AL ENSAYO

Se realizó una evaluación cualitativa de la variación de la fosa de erosión en el tiempo mediante el análisis de las fotografías tomadas en cada instante de medición. A continuación se ilustra un ejemplo:

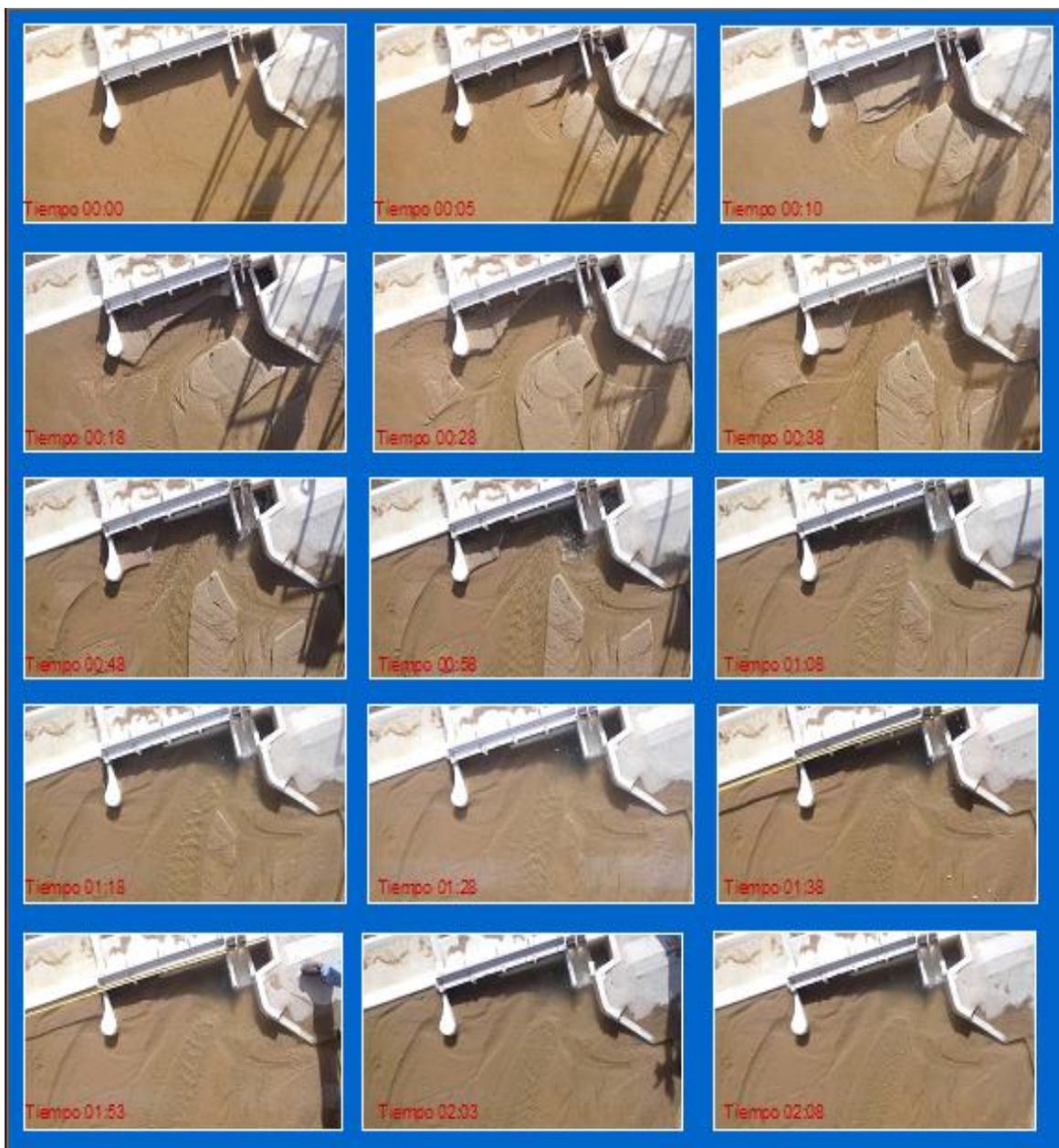


Figura 50. Variación de la fosa en el tiempo

Por un lado, se midió en la tolva la altura de sedimento; de este modo, es posible determinar el volumen que ocupa la arena en la misma, ya que son conocidas todas las dimensiones del recipiente almacenador.

Por otra parte, mediante los puntos relevados al final del ensayo se construyó una superficie con curvas de nivel y se evaluó la diferencia de volumen entre la situación

inicial (supuesta cota constante en 1373 en prototipo) con la situación final (puntos relevados).

Se comparó los resultados de los volúmenes obtenidos con la tolva y las curvas de nivel de los puntos relevados.

Luego de haber logrado la estabilización de la fosa de erosión, antes de finalizar del ensayo se relevaron más de 100 puntos (Figura 49) en esta zona para generar una superficie digital de la misma (Figura 53) y así poder evaluar el volumen de arena removido. Además se tomaron fotografías de la fosa final formada:



Figura 51: Fosa de erosión



Figura 52. Fosa de erosión

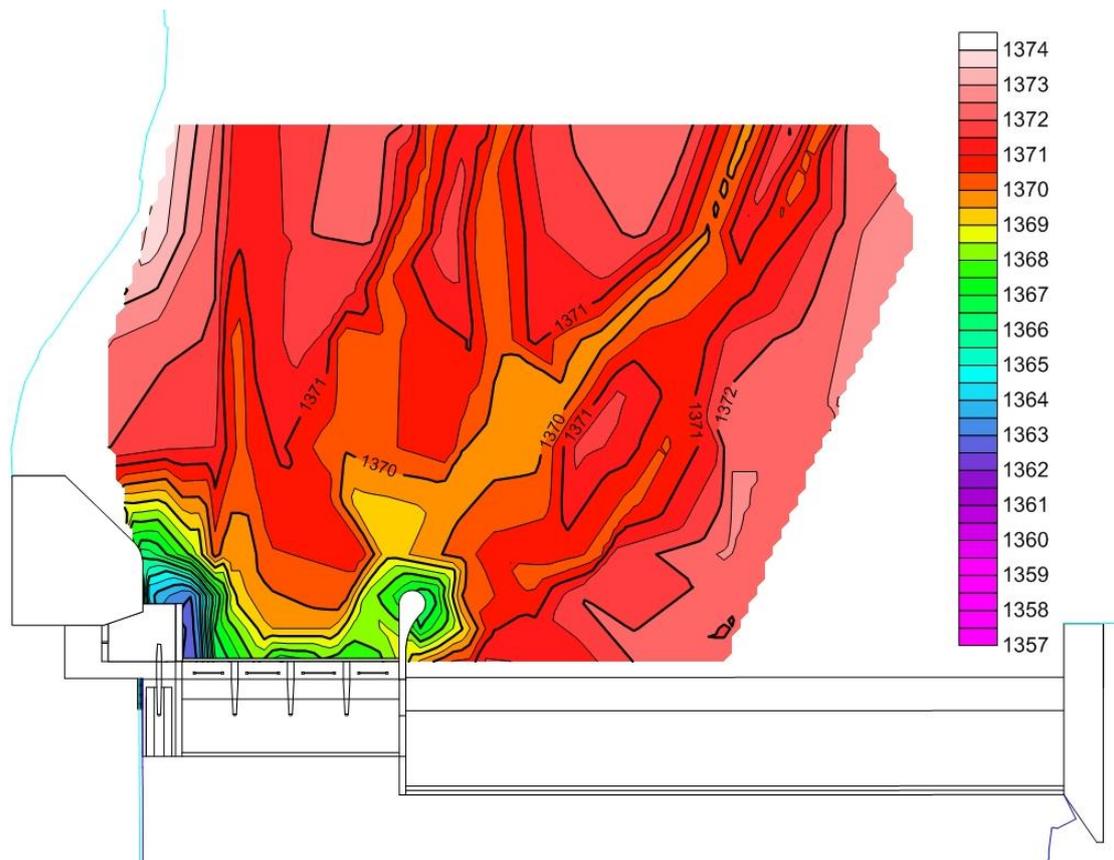


Figura 53. Fosa de erosión obtenida con el Surfer

Para evaluar la configuración resultante del cauce, comparamos las fotografías con el relevamiento y el resultado respectivo del Surfer. Se puede observar en la (Figura 52) y la (Figura 53) que las configuraciones resultantes son similares.

Luego de haber generado la superficie digital del terreno, es posible cuantificar a partir de ella el volumen de arena que se transportó hacia aguas abajo del dique utilizando una herramienta que nos brinda el software de cálculo, en este caso se utilizó el programa Surfer.

Por otro lado, para verificar este valor, se recurrió a la tolva existente aguas abajo del dique. Partiendo de la superficie de la misma (dato conocido) y de la altura de arena almacenada allí, se cuantificó el volumen de arena removida.

A modo de ejemplo se muestran los resultados de esta cuantificación de volumen del ensayo 29:

Cálculo del volumen de arena removido

1) Tolva

Superficie de la tolva [m ²]	0,90
Altura arena [m]	0,19
Volumen de arena [m ³]	0,17 (A)

2) Superficie Digital del Terreno

Volumen de arena removido	Prototipo [m ³]	48.117
	Modelo [m ³]	0,18 (B)

Diferencia [m³]	0,01	(A-B)
Error [%]	5%	(A-B)/max(A,B)

Tabla 8: Ejemplo de volumen de arena removido

CAPITULO 4: ENSAYOS REALIZADOS

4.1 INTRODUCCIÓN

A continuación se desarrollan los ensayos realizados a fondo móvil teniendo en cuenta primeramente un caudal permanente de 600 m³/s que corresponde a la crecida media anual, este caudal es considerado un evento de recurrencia ordinaria y compatible con las posibilidades reales de operación de los órganos de evacuación móviles (según los criterios de operación actuales). También se desarrollan ensayos a caudal variable para obtener las distintas variaciones de operación de compuertas y si estas estructuras trabajan a pelo libre o a presión.

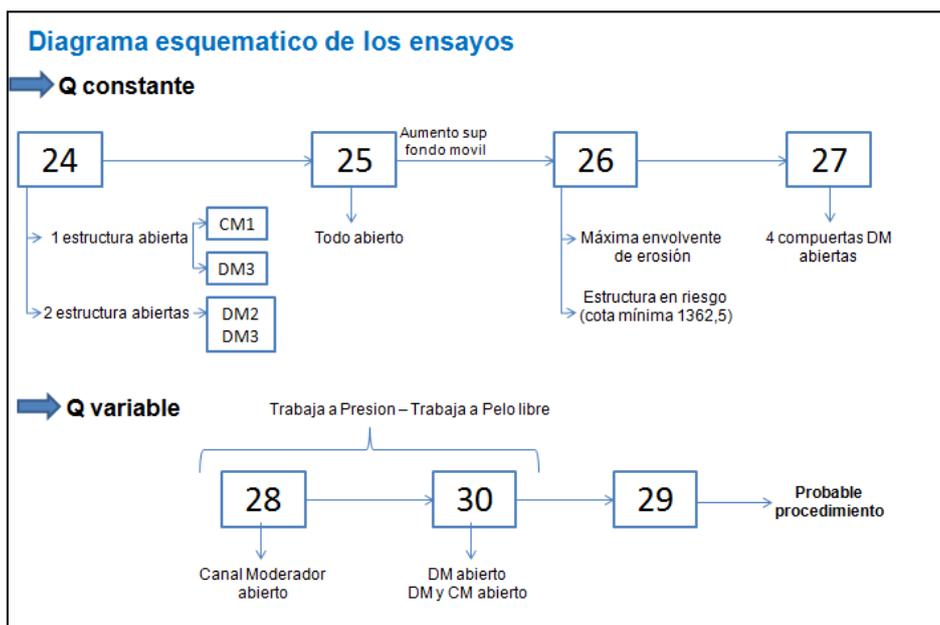


Figura 54. Diagrama de los ensayos

Para la nomenclatura de las compuertas se tomara de aquí en más lo expuesto en el siguiente esquema:

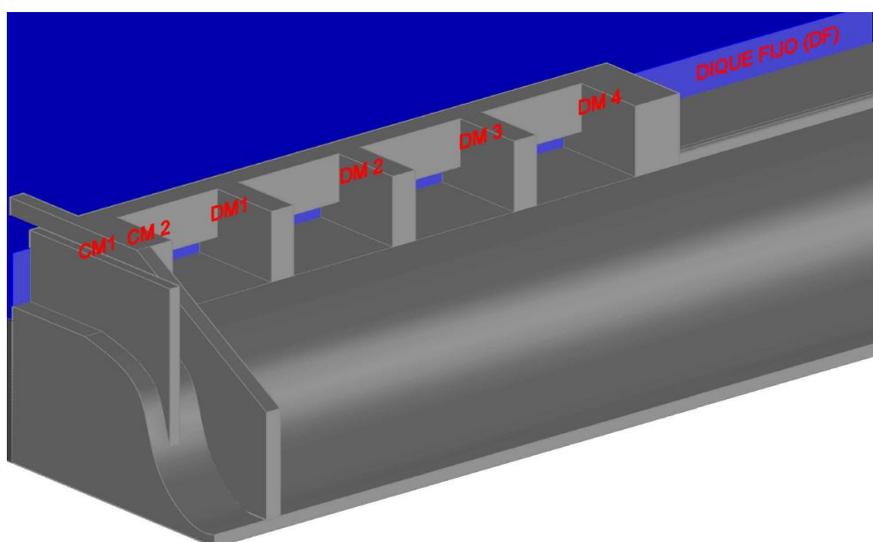


Figura 55. Nomenclatura de compuertas

4.2 ENSAYOS A CAUDAL CONSTANTE

Para una mejor comprensión de los estudios realizados analizaremos primeramente los ensayos a caudal constante de 600 m³/s y posteriormente se analizarán los ensayos a caudal variable.

A continuación se muestra un resumen de los ensayos realizados a caudal permanente, teniendo en cuenta si las estructuras trabajan a presión o a pelo libre:

Ensayo N°	Fecha del Ensayo	Río Grande		Río Reyes		Q Total prototipo (m ³ /s)	Estructuras de descarga						
		Q prototipo (m ³ /s)	%	Q prototipo (m ³ /s)	%		CM1	CM2	DM1	DM2	DM3	DM4	DF
24a	05/06/2013	390	65%	210	35%	600	/	/	/	/	P	/	Vierte agua
24b	05/06/2013	390	65%	210	35%	600	P	/	/	/	/	/	Vierte agua
24c	06/06/2013	390	65%	210	35%	600	/	/	/	P	P	/	Vierte agua
25	11/06/2013	390	65%	210	35%	600	P	P	L	L	L	L	No vierte agua
26	17/06/2013	390	65%	210	35%	600	P	P	L	L	L	L	No vierte agua
27	13/06/2013	390	65%	210	35%	600	/	/	L	L	P	L	No vierte agua

Tabla 9: Ensayos realizados a fondo móvil con caudal constante de 600 m³/s

Referencias:

/ = Estructura cerrada

L = la estructura trabaja con superficie libre

P = la estructura trabaja a presión.

4.2.1 Ensayo 24

Condiciones del ensayo

Se evaluó la metodología propuesta para los ensayos a fondo móvil en la zona aguas arriba del Dique Los Molinos.

El caudal ensayado fue 600 m³/s en prototipo y este fue ingresado tanto por el Río Grande como por el Río Reyes. El 65% del total del mismo ingresó por el Río Grande, mientras que el 35% restante lo hizo por el Río Reyes.

En los distintos ensayos realizados se evaluó la variación de la hoya de erosión en el tiempo y para ello se utilizaron las técnicas:

- Medición con nivel óptico: se midió la erosión en algunos puntos característicos hasta que se logro el equilibrio de la fosa formada en cada ensayo.
- Captura de fotografías: se midió la variación de la hoya de erosión en el tiempo.
- Tubo Pitot: para evaluar el caudal evacuado aproximado por cada estructura.

Todos los ensayos se hicieron estando cerrada la toma de agua lateral del dique.

Los ensayos realizados fueron:

- Ensayo 24-a

La única estructura que permaneció abierta fue la compuerta DM3. Todas las demás (tanto del DM como del CM) estuvieron cerradas.

- Ensayo 24-b

La única estructura que permaneció abierta fue el descargador CM1. Todas las demás (tanto del DM como del CM) estuvieron cerradas.

- Ensayo 24-c

Las únicas estructuras que permanecieron abiertas fueron las compuertas DM2 y DM3. Todas las demás (tanto del DM como del CM) estuvieron cerradas.

En todos los casos, la cota de la superficie de agua estuvo por encima de los 1373 m en prototipo (cota del labio del DF), por lo que el flujo pasó a través de esta estructura.

Resultados

Ensayo 24-a

Se tomaron 2 puntos de referencia aguas arriba del DM3 (sobre el centro de la compuerta) y en ellos se evaluó la variación de cota para ver la evolución de la erosión en el tiempo. Para ello se utilizó el nivel óptico y la mira milimétrica.

Los puntos donde se midieron las cotas a lo largo del ensayo fueron los siguientes:

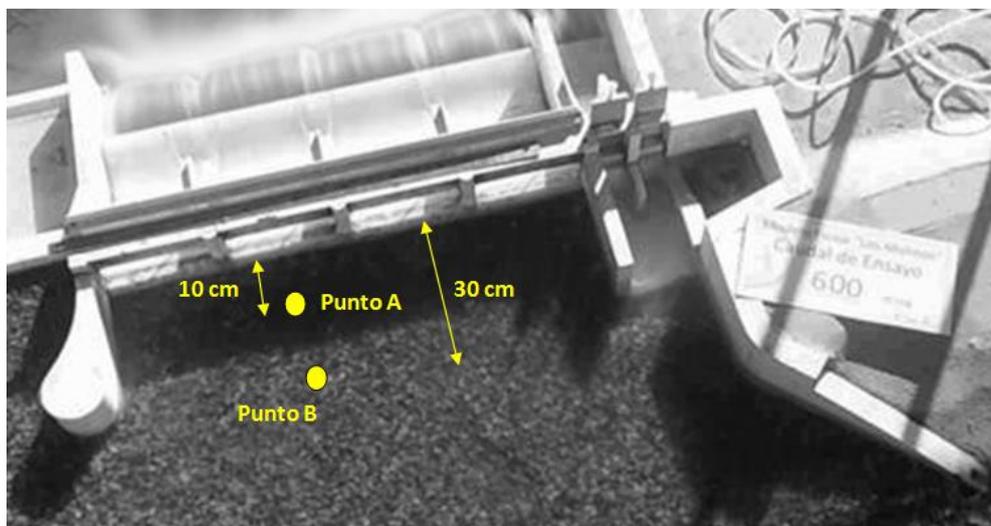


Figura 56. Puntos relevados

Las cotas relevadas se pueden observar a continuación:

Hora	Tiempo ensayo	Erosión					
		Punto A			Punto B		
		Medición nivel [mm]	Cota modelo	Cota prototipo	Medición nivel [mm]	Cota modelo	Cota prototipo
10:26	00:00	2951	670	1372,0	2944	677	1372,4
10:31	00:05	2981	640	1370,0	2960	661	1371,4
10:36	00:10	2975	646	1370,4	2958	663	1371,5
10:46	00:20	2984	637	1369,8	2959	662	1371,4
11:00	00:34	2985	636	1369,7	2961	660	1371,3
11:30	01:04	2985	636	1369,7	2965	656	1371,0
12:00	01:34	2995	626	1369,1	2965	656	1371,0
13:00	02:34	2995	626	1369,1	2964	657	1371,1

Tabla 10 Cotas relevadas

A continuación, se muestran los resultados en los dos puntos relevados en forma de gráfico:

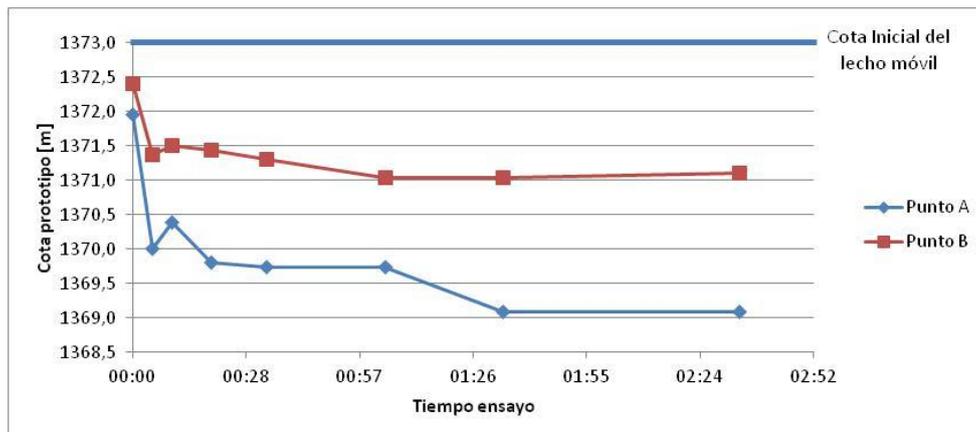


Figura 57: Variación de la erosión en el tiempo

Se puede observar claramente que después de las 2 horas de ensayo la fosa de erosión formada ya se ha estabilizado.

Complementariamente a las mediciones realizadas, se midió con Tubo Pitot la velocidad en el centro del vano para comparar con las velocidades medidas en ensayos anteriores y ver si el caudal evacuado por DM3 es similar a lo obtenido previamente.

En este caso el Δh medido con el instrumento fue 4,5 cm.

La velocidad en el modelo se obtuvo de la siguiente forma:

$$v_{modelo} = C_V \sqrt{2 \times g \times \Delta h},$$

Con Δh medida con el Tubo Pitot y $C_V = 0,94$

$$v_{modelo} = 0.883 \text{ m/s}$$

A partir de la semejanza de Froude, podemos calcular la velocidad en el prototipo:

$$v_{prototipo} = v_{modelo} \times \sqrt{65} = 7.12 \text{ m/s}$$

Para calcular la velocidad afectamos el valor anterior calculado por un respectivo coeficiente k que nos permite estimar este parámetro y que es diferente para cada compuerta y descargador de fondo. El parámetro k fue calculado en un ensayo anterior.

$$v_{media} = v_{prototipo} \times k = 7.12 \frac{m}{s} \times 0.64 = 4.56 \text{ m/s}$$

Con la velocidad media y la sección de cada estructura (A), calculamos el caudal que pasa a través de la compuerta:

$$Q = v_{media} \times A = 4.56 \frac{m}{s} \times 43.7 \text{ m}^2 \approx 200 \text{ m}^3/\text{s}$$

Aproximadamente, la compuerta DM3 evacuo durante el ensayo 200 m³/s, un valor dentro de los parámetros medidos anteriormente.

Ensayo 24-b

Los puntos donde se midieron las cotas a lo largo del ensayo fueron los siguientes:

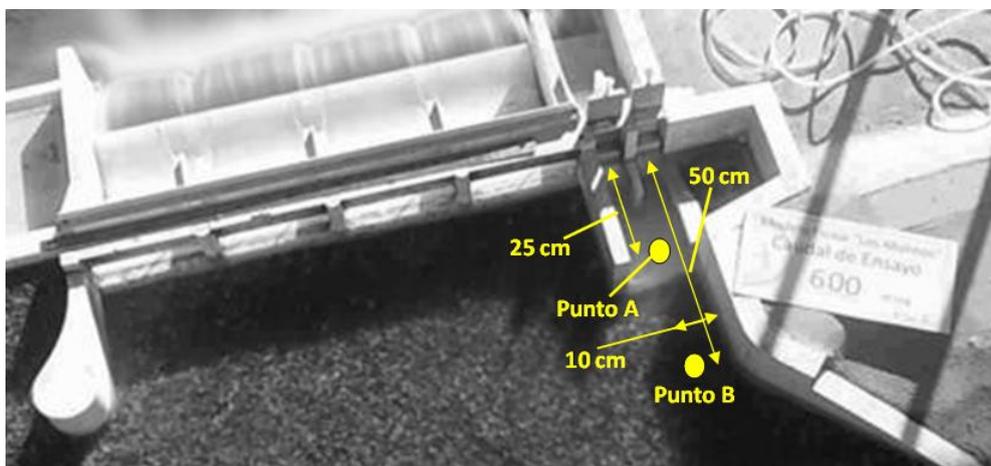


Figura 58. Puntos relevados

Las cotas relevadas en el transcurso del tiempo se pueden observar en la siguiente tabla:

Hora	Tiempo ensayo	Erosión					
		Punto A			Punto B		
		Medición nivel [mm]	Cota modelo	Cota prototipo	Medición nivel [mm]	Cota modelo	Cota prototipo
13:20	00:00	2948	673	1372,1	2939	682	1372,7
13:25	00:05	3039	582	1366,2	2948	673	1372,1
13:30	00:10	3050	571	1365,5	2955	666	1371,7
13:35	00:15	3053	568	1365,3	2955	666	1371,7
13:45	00:25	3055	566	1365,2	2970	651	1370,7
13:55	00:35	3055	566	1365,2	2968	653	1370,8
14:15	00:55	3055	566	1365,2	2965	656	1371,0
14:45	01:25	3055	566	1365,2	2964	657	1371,1

Tabla 11: Cotas relevadas

Se muestran los resultados en los dos puntos relevados en forma de gráfico:

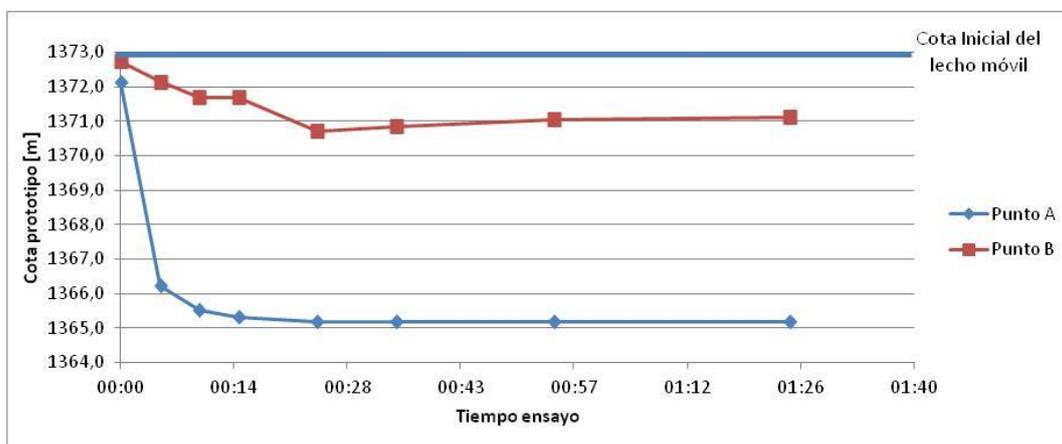


Figura 59. Variación de la erosión en el tiempo

Se observa claramente que después de las 1,5 horas de ensayo la fosa de erosión formada ya se ha estabilizado. La cota en el punto A después de los 25 minutos de ensayo ya permanece constante ya que luego de ese momento, se llegó a la cota donde está el lecho del CM (cota 1365,2 m en prototipo).

Se midió con Tubo Pitot la velocidad en el centro del vano para comparar con las velocidades medidas en ensayos anteriores y ver si el caudal evacuado por CM1 es similar a lo obtenido previamente.

En este caso el Δh medido con el instrumento fue 10,3 cm.

La velocidad en el modelo se obtuvo de la siguiente forma:

$$v_{modelo} = C_v \sqrt{2 \times g \times \Delta h},$$

Con Δh medida con el Tubo Pitot y $C_v = 0,94$

$$v_{modelo} = 1.36 \text{ m/s}$$

A partir de la semejanza de Froude, podemos calcular la velocidad en el prototipo:

$$v_{prototipo} = v_{modelo} \times \sqrt{65} = 10.77 \text{ m/s}$$

Para calcular la velocidad afectamos el valor anterior calculado por un respectivo coeficiente k :

$$v_{media} = v_{prototipo} \times k = 7.12 \frac{m}{s} \times 0.85 = 9.15 \text{ m/s}$$

Con la velocidad media y la sección de cada estructura (A), calculamos el caudal que pasa a través de la compuerta:

$$Q = v_{media} \times A = 9.15 \frac{m}{s} \times 16.3 \text{ m}^2 \approx 150 \text{ m}^3/\text{s}$$

Aproximadamente, el descargador CM1 evacuo durante el ensayo 150 m³/s, un valor dentro de los parámetros medidos anteriormente.

Ensayo 24-c

Los puntos donde se midieron las cotas a lo largo del ensayo fueron los siguientes:

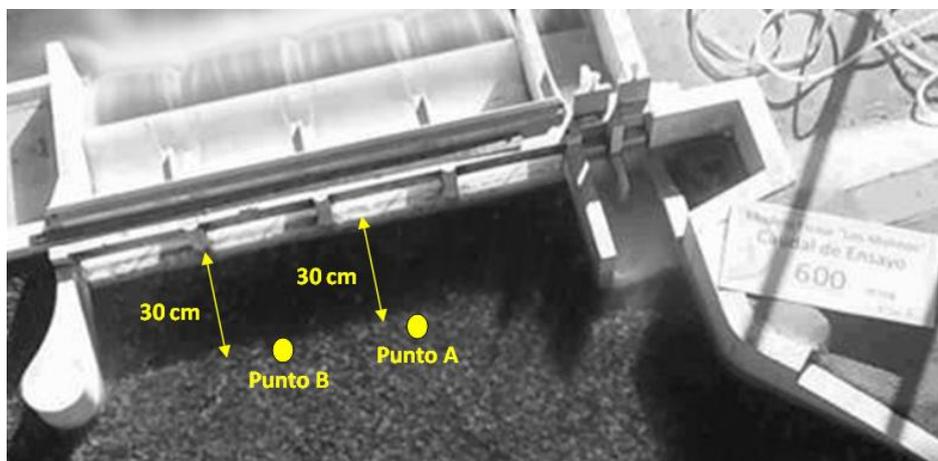


Figura 60. Puntos relevados

Las cotas relevadas en el transcurso del tiempo se pueden observar en la siguiente tabla:

Hora	Tiempo ensayo	Erosión					
		Punto A			Punto B		
		Medición nivel [mm]	Cota modelo	Cota prototipo	Medición nivel [mm]	Cota modelo	Cota prototipo
14:49	00:00	2931	686	1373,0	2929	688	1373,1
14:54	00:05	2937	680	1372,6	2954	663	1371,5
15:00	00:11	2939	678	1372,5	2983	634	1369,6
15:10	00:21	2971	646	1370,4	2984	633	1369,5
15:20	00:31	2969	648	1370,5	2990	627	1369,2
15:34	00:45	2973	644	1370,3	3007	610	1368,1
15:54	01:05	2976	641	1370,1	3025	592	1366,9
16:10	01:21	2976	641	1370,1	3030	587	1366,6

Tabla 12. Variación de la erosión en el tiempo

Resultados en los dos puntos relevados en forma de gráfico:

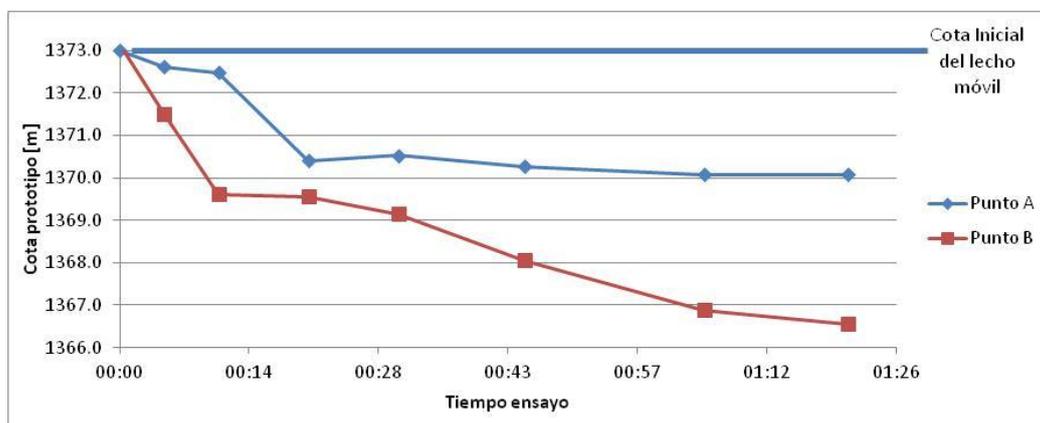


Figura 61. Variación de la erosión en el tiempo

Se observa claramente que después de las 1,5 horas de ensayo la fosa de erosión formada ya se ha estabilizado.

Conclusiones

Podemos concluir que la metodología propuesta fue llevada a cabo de manera satisfactoria, representando las condiciones y características que se desean estudiar.

Al abrir solamente una estructura de descarga se puede observar claramente que la fosa formada es reducida, tanto cuando se abrió la compuerta número tres del dique móvil, como así también cuando se abrió la compuerta número uno del canal moderador. Podemos observar lo dicho anteriormente en los siguientes esquemas y fotografías tomadas a lo largo del ensayo:

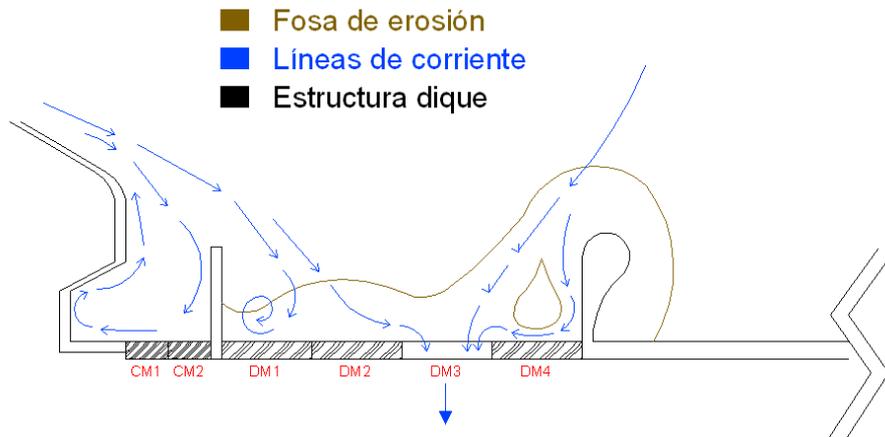


Figura 62. Fosa de erosión DM3

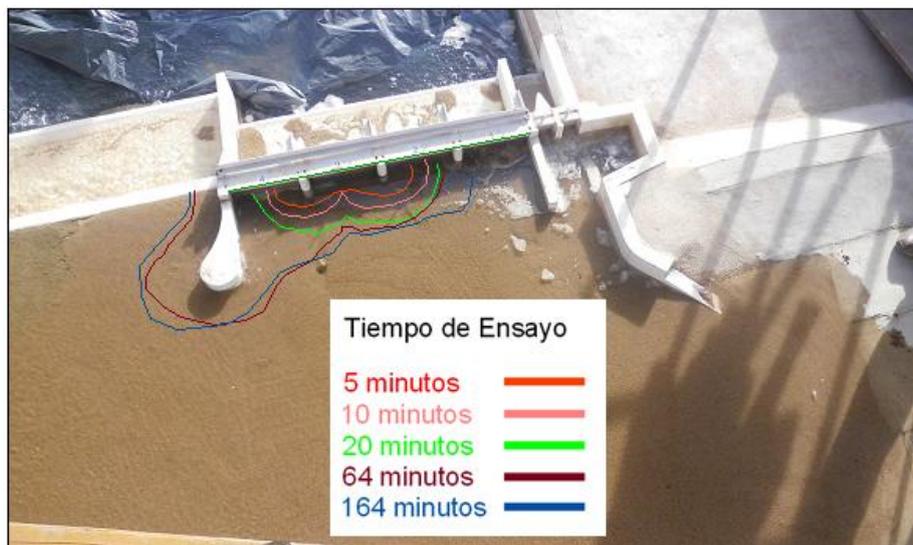


Figura 63. Fosa de erosión DM3

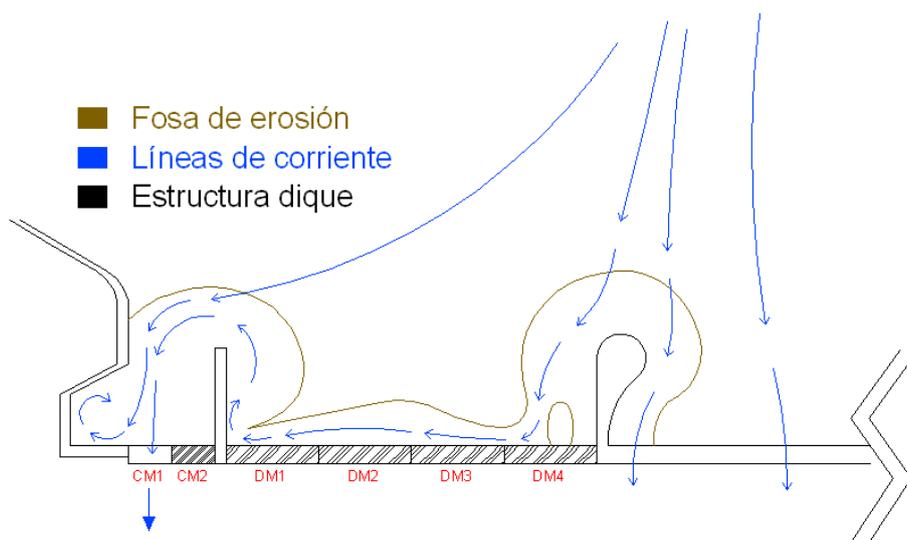


Figura 64. Fosa de erosión CM1

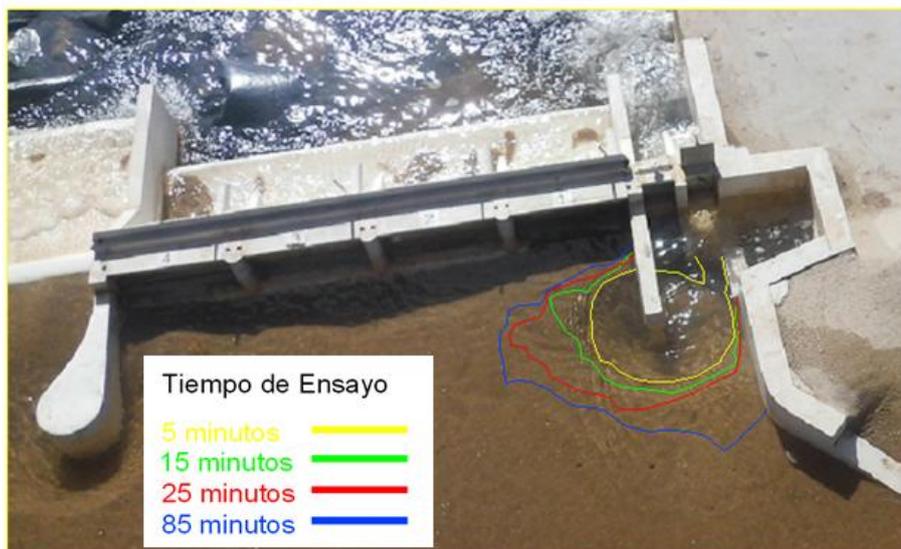


Figura 65. Fosa de erosión CM1

Las líneas graficadas anteriormente del ensayo determinan la variación espacial de la fosa de erosión a medida que transcurre el tiempo.

Al abrir las dos compuertas centrales DM3 y DM2 (las que evacuan mayor caudal según lo medido en ensayos anteriores) la fosa formada es más importante y representativa como se puede ver en la Figura 66. Fosa de erosión DM3 y DM2. A partir de este ensayo se determinó que los próximos ensayos a realizarse serán con todas las estructuras abiertas (las 4 compuertas del dique móvil DM y los dos descargadores del canal moderador CM) para así poder visualizar la envolvente máxima de erosiones formas aguas arriba del dique.

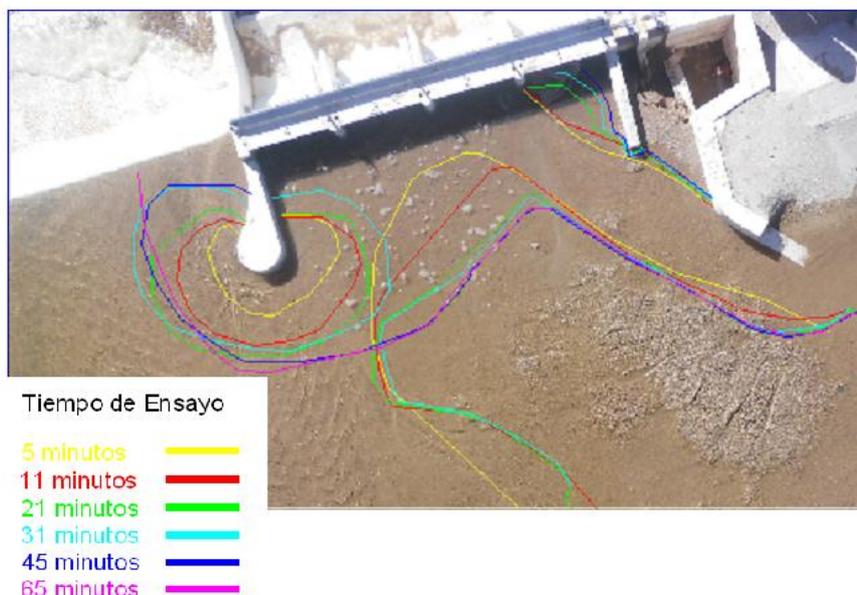


Figura 66. Fosa de erosión DM3 y DM2

Finalmente se pudo determinar que la eficiencia de las compuertas ya sea abriendo una sola únicamente o abriendo las que erogan mayor caudal está directamente relacionada con la hoya de erosión formada.

4.2.2 Ensayo 25

Condiciones del ensayo

En el ensayo realizado se quiso evaluar la envolvente máxima de erosión al abrir las estructuras móviles del dique. Para ello se fueron abriendo sucesivamente las 6 estructuras existentes: las 4 compuertas del dique móvil -DM- y los 2 descargadores de fondo del canal moderador -CM-.

El caudal ensayado fue 600 m³/s en prototipo y este fue ingresado tanto por el Río Grande como por el Río Reyes. El 65% del total del mismo ingresó por el Río Grande, mientras que el 35% restante lo hizo por el Río Reyes.

Q prototipo (m ³ /s)	Q Río Grande (m ³ /s)	Q Río Reyes (m ³ /s)	% de apertura					
			CM1	CM2	DM1	DM2	DM3	DM4
597	389	208	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Tabla 13. Apertura de compuertas

En los distintos ensayos realizados se evaluó la variación de la hoya de erosión en el tiempo y para ello se utilizaron las técnicas:

- Medición con nivel óptico: se midió la erosión en algunos puntos característicos hasta que se logro el equilibrio de la fosa formada en cada ensayo.
- Captura de fotografías: se midió la variación de la hoya de erosión en el tiempo.

Vale aclarar que todos los ensayos se hicieron estando cerrada la toma de agua lateral del dique.

Para que la apertura de las diferentes estructuras móviles no fuese toda en el mismo instante, sino que la llamada de erosión se fuese formando en forma escalonada, se decidió ir abriendo cada una en un intervalo de tiempo de 5 minutos. El orden de apertura de dichas estructuras fue el mismo que el utilizado por los operadores del sistema en la actualidad. Es decir:

Tiempo ensayo	Estructura abierta
00:00	DM3
00:05	DM2
00:10	DM4
00:15	DM1
00:20	CM2
00:25	CM1

Tabla 14. Apertura de compuertas

Luego de esos primeros 25 minutos se prosiguió con el ensayo pero ya con todas las estructuras abiertas hasta el final del mismo.

Resultados

Los puntos donde se midieron las cotas a lo largo del ensayo fueron los siguientes:

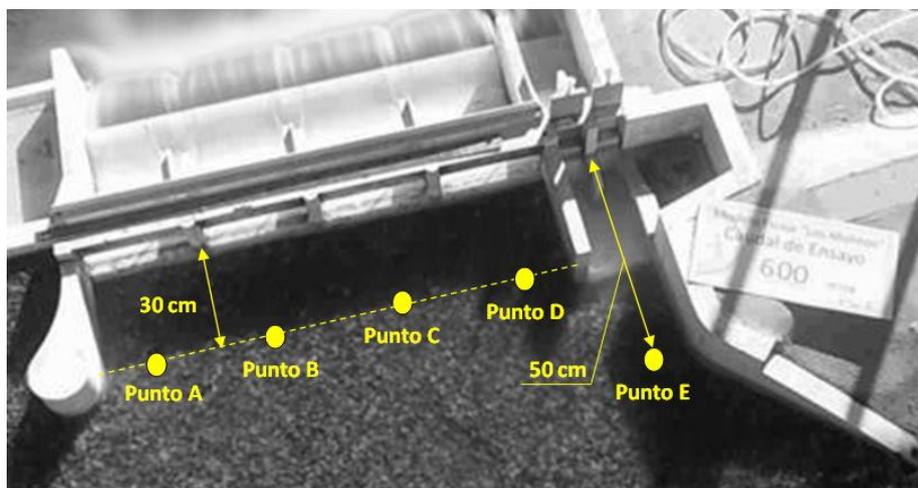


Figura 67. Puntos relevados

Las cotas relevadas en el transcurso del tiempo se pueden observar en las siguientes tablas:

Tiempo ensayo	Punto A			Punto B			Punto C		
	Medición nivel [mm]	Cota modelo	Cota prototipo	Medición nivel [mm]	Cota modelo	Cota prototipo	Medición nivel [mm]	Cota modelo	Cota prototipo
00:00	2955	681	1372,7	2953	683	1372,8	2961	675	1372,3
00:05	2959	677	1372,4	2961	675	1372,3	2965	671	1372,0
00:10	2990	646	1370,4	2983	653	1370,8	2980	656	1371,0
00:15	3028	608	1367,9	2998	638	1369,9	2995	641	1370,1
00:20	3035	601	1367,5	3017	619	1368,6	2996	640	1370,0
00:25	3022	614	1368,3	3025	611	1368,1	3010	626	1369,1
00:30	3023	613	1368,2	3009	627	1369,2	3032	604	1367,7
00:40	3057	579	1366,0	3004	632	1369,5	3025	611	1368,1
00:53	3040	596	1367,1	3008	628	1369,2	3008	628	1369,2
01:13	3040	596	1367,1	3021	615	1368,4	3000	636	1369,7
01:43	3042	594	1367,0	3028	608	1367,9	3031	605	1367,7
02:13	3028	608	1367,9	3029	607	1367,9	3045	591	1366,8
02:43	3055	581	1366,2	3035	601	1367,5	3038	598	1367,3

Tabla 15: Cotas relevadas

Tiempo ensayo	Punto D			Punto E		
	Medición nivel [mm]	Cota modelo	Cota prototipo	Medición nivel [mm]	Cota modelo	Cota prototipo
00:00	2954	682	1372,7	2960	676	1372,3
00:00	2961	675	1372,3	2958	678	1372,5
00:00	2969	667	1371,8	2968	668	1371,8
00:00	2974	662	1371,4	2974	662	1371,4
00:00	2991	645	1370,3	2975	661	1371,4
00:00	3010	626	1369,1	2970	666	1371,7
00:00	3070	566	1365,2	2985	651	1370,7
00:00	2987	649	1370,6	3001	635	1369,7
00:00	3072	564	1365,1	3008	628	1369,2
00:00	2975	661	1371,4	3009	627	1369,2
00:00	3086	550	1364,2	3018	618	1368,6
00:00	3089	547	1364,0	3022	614	1368,3
00:00	3082	554	1364,4	3035	601	1367,5

Tabla 16: Cotas relevadas

A continuación, se muestran los resultados en los cinco puntos relevados en forma de gráfico:

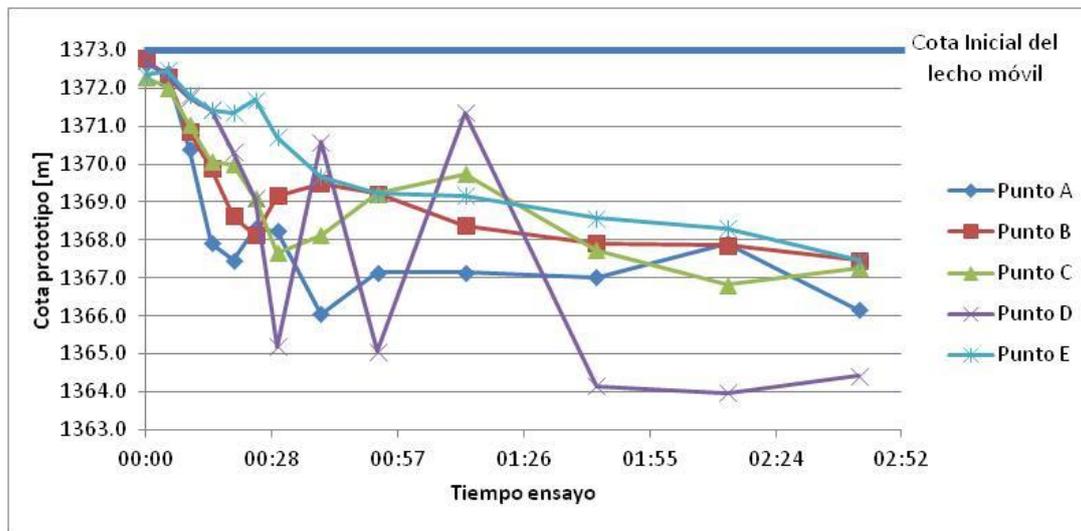


Figura 68. Variación de la erosión en el tiempo

Se observa claramente que después de las 2 horas de ensayo la fosa de erosión formada ya se ha estabilizado.

También, mediante la captura de fotografías en los mismos instantes de tiempo durante el ensayo, evaluamos la evolución espacial de la fosa (Figura 70).

Finalmente, luego de haber logrado la estabilización de la fosa de erosión, antes de finalizar del ensayo se relevaron más de 100 puntos en esta zona para generar una superficie digital de la misma y así poder evaluar el volumen de arena removido. Además se tomaron fotografías de la fosa final formada.

A continuación se muestran las fotos capturadas, la secuencia de fotos que muestra la evolución de las fosas y los canales erosionados, y la superficie digital obtenida:



Figura 69. Fosa de erosión

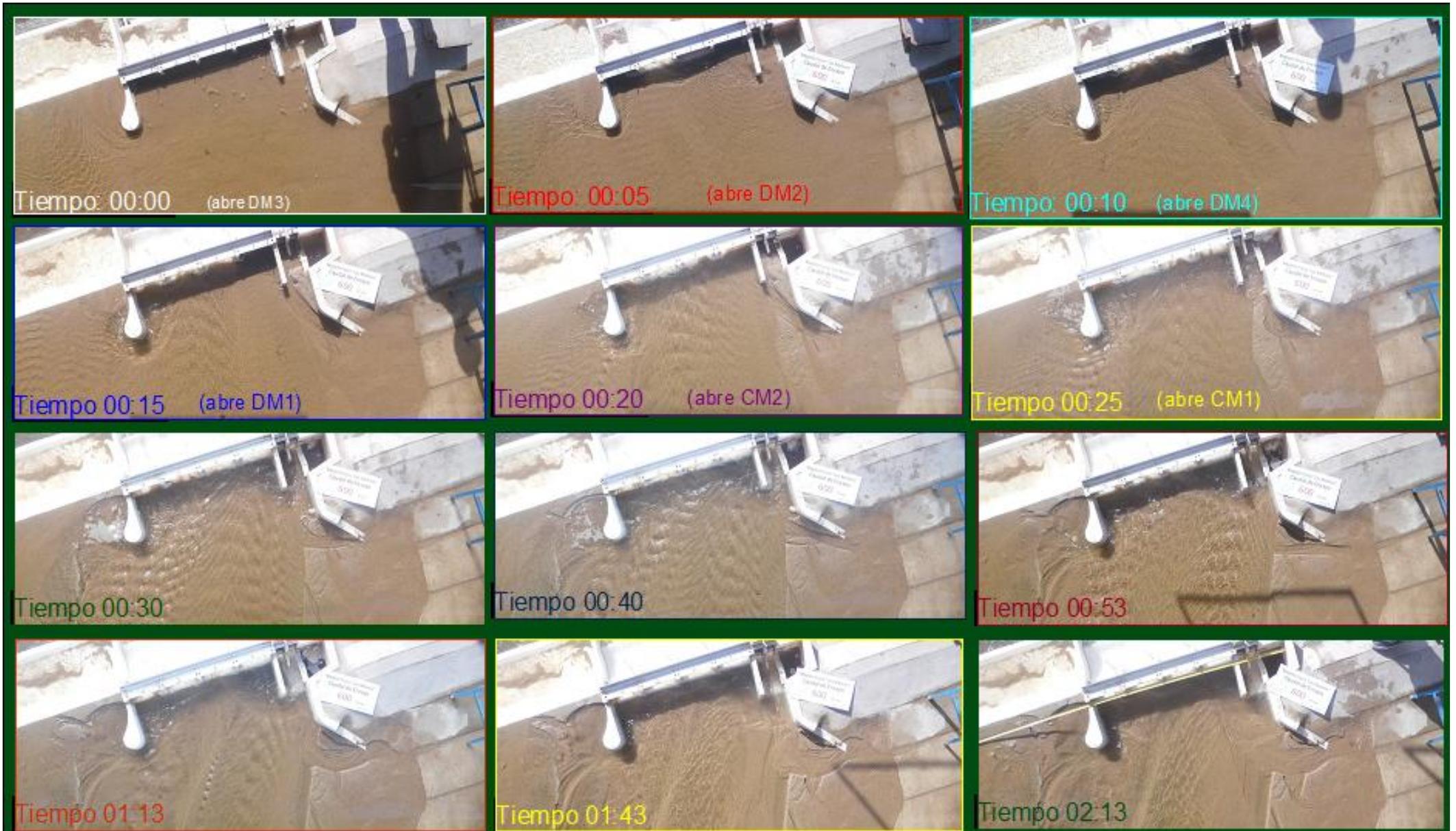


Figura 70. Variación de la erosión en el tiempo

Se realiza una comparación de la fosa final con las fotografías tomadas y con lo obtenido en el software de cálculo (Surfer):

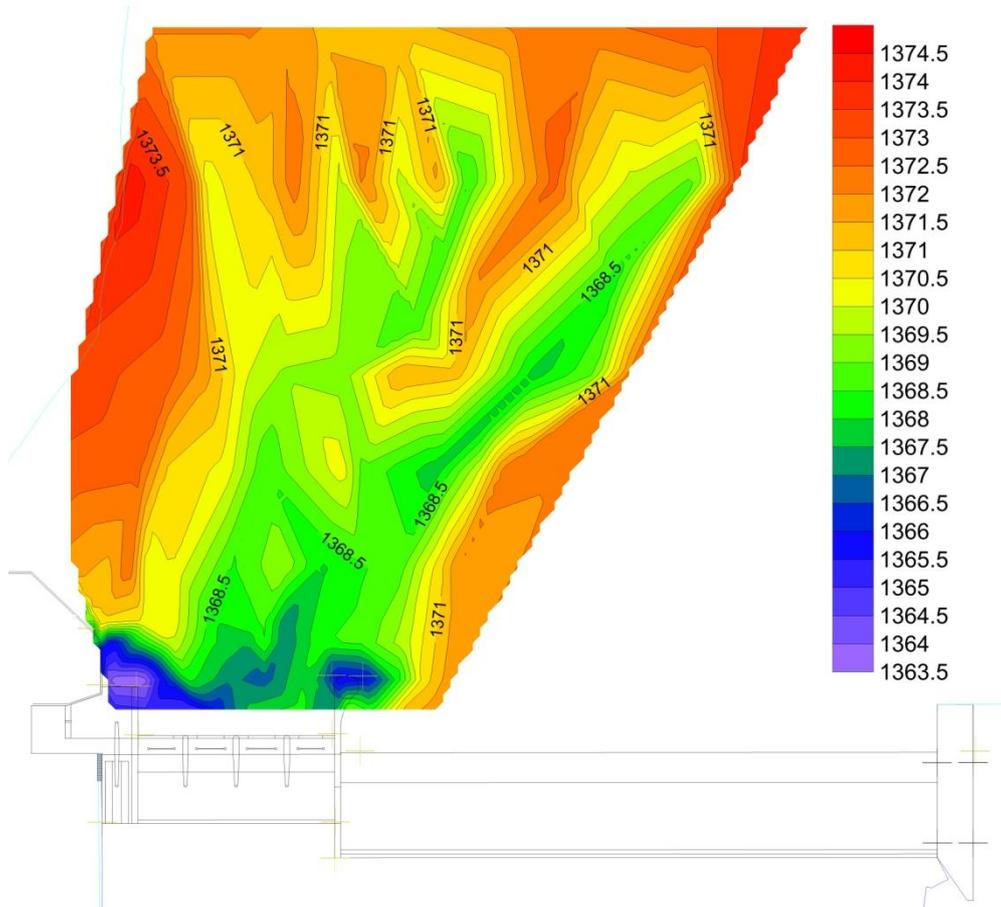


Figura 71. Fosa final. Surfer

Si comparamos las fotografías con la superficie, vemos que lo obtenido a partir de los puntos relevados en el terreno con nivel óptico es aceptable.

Utilizando esta última superficie, pudimos cuantificar el volumen de arena removido durante el ensayo. El mismo fue entre **0.3** y **0.4 m³** de arena.

Conclusiones

Se produjeron distintos inconvenientes, que no pudieron subsanarse durante el mismo.

La tolva utilizada para relevar el volumen de arena removido durante el ensayo fue demasiado pequeña para poder ser utilizada en este ensayo. La función de dicha tolva estaba pensada para contrastar el valor de volumen de arena removido obtenido del modelado de la superficie de la fosa final formada.

Es por ello, que se diseñó un nuevo receptáculo para poder evaluar la arena removida durante el ensayo. El mismo será evaluado en el próximo ensayo (Ensayo 26).

Además al desarrollar este ensayo, se ha visto la necesidad de remover el lecho fijo existente aguas arriba del DF y por debajo de la cama de arena (que tiene 10 cm de profundidad aproximadamente) en la zona más cercana al dique.

Ambas zonas, al no tener el mismo lecho móvil que el que se evaluó en este ensayo, han alterado los resultados que se obtienen aquí.

Es por ello, que se ha removido dichas zonas fijas y se reevalúa el comportamiento del modelo para este mismo ensayo próximamente en el ensayo 26.

4.2.3 Ensayo 26

Condiciones del ensayo

Se repitió el ensayo 25 luego de que se corrigieran algunos inconvenientes que se produjeron en dicho ensayo. Se quiso evaluar la envolvente máxima de erosión al abrir las estructuras móviles del dique. Para ello se fueron abriendo sucesivamente las 6 estructuras existentes: las 4 compuertas del dique móvil -DM- y los 2 descargadores de fondo del canal moderador -CM-.

El caudal ensayado fue 600 m³/s en prototipo y este fue ingresado tanto por el Río Grande como por el Río Reyes. El 65% del total del mismo ingresó por el Río Grande, mientras que el 35% restante lo hizo por el Río Reyes.

Q prototipo (m ³ /s)	Q Río Grande (m ³ /s)	Q Río Reyes (m ³ /s)	% de apertura					
			CM1	CM2	DM1	DM2	DM3	DM4
597	389	208	100%	100%	100%	100%	100%	100%

Tabla 17: Apertura de compuertas

En los distintos ensayos realizados se evaluó la variación de la hoya de erosión en el tiempo y para ello se utilizaron las técnicas:

- Medición con nivel óptico: se midió la erosión en algunos puntos característicos hasta que se logro el equilibrio de la fosa formada en cada ensayo.
- Captura de fotografías: se midió la variación de la hoya de erosión en el tiempo.

Todos los ensayos se hicieron estando cerrada la toma de agua lateral del dique. Para que la apertura de las diferentes estructuras móviles no fuese toda en el mismo instante, sino que la llamada de erosión se fuese formando en forma escalonada, se decidió ir abriendo cada una en un intervalo de tiempo de 5 minutos. El orden de apertura de dichas estructuras fue el mismo que el utilizado por los operadores del sistema en la actualidad. Es decir:

Tiempo ensayo	Estructura abierta
00:00	DM3
00:05	DM2
00:10	DM4
00:15	DM1
00:20	CM2
00:25	CM1

Tabla 18: Apertura de compuertas

Luego de esos primeros 25 minutos se prosiguió con el ensayo pero ya con todas las estructuras abiertas hasta el final del mismo.

Resultados

Se tomaron 5 puntos de referencia aguas arriba del dique. Cuatro de ellos (los que estaban sobre el DM) se tomaron sobre el centro de la compuerta y el quinto se relevó en la zona del CM. En todos ellos se evaluó la variación de cota para ver la evolución de la erosión en el tiempo.

Los puntos donde se midieron las cotas a lo largo del ensayo fueron los siguientes:

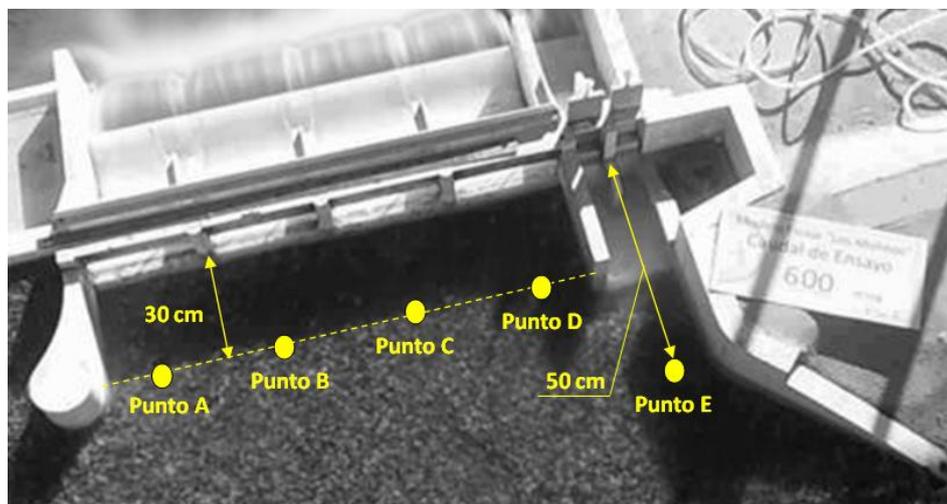


Figura 72. Puntos relevados

Las cotas relevadas en el transcurso del tiempo se pueden observar en las siguientes tablas:

Tiempo ensayo	Punto A			Punto B			Punto C		
	Medición nivel [mm]	Cota modelo	Cota prototipo	Medición nivel [mm]	Cota modelo	Cota prototipo	Medición nivel [mm]	Cota modelo	Cota prototipo
00:00	2956	680	1372,6	2959	677	1372,4	2959	677	1372,4
00:05	2965	671	1372,0	2971	665	1371,6	2961	675	1372,3
00:10	2995	641	1370,1	2985	651	1370,7	2979	657	1371,1
00:15	3030	606	1367,8	3000	636	1369,7	2986	650	1370,7
00:20	3039	597	1367,2	3010	626	1369,1	2997	639	1369,9
00:25	3037	599	1367,3	3017	619	1368,6	3014	622	1368,8
00:30	3037	599	1367,3	3020	616	1368,4	3018	618	1368,6
00:40	3038	598	1367,3	3018	618	1368,6	3015	621	1368,8
00:52	3038	598	1367,3	3011	625	1369,0	3012	624	1369,0
01:07	3036	600	1367,4	3017	619	1368,6	3007	629	1369,3
01:19	3029	607	1367,9	3008	628	1369,2	3005	631	1369,4
01:42	3028	608	1367,9	3017	619	1368,6	3006	630	1369,4
02:12	3028	608	1367,9	3024	612	1368,2	3000	636	1369,7
02:42	3028	608	1367,9	3027	609	1368,0	3005	631	1369,4
03:07	3026	610	1368,1	3026	610	1368,1	3007	629	1369,3

Tabla 19: Cotas relevadas

Tiempo ensayo	Punto D			Punto E		
	Medición nivel [mm]	Cota modelo	Cota prototipo	Medición nivel [mm]	Cota modelo	Cota prototipo
00:00	2956	680	1372,6	2965	671	1372,0
00:00	2960	676	1372,3	2962	674	1372,2
00:00	2977	659	1371,2	2968	668	1371,8
00:00	2986	650	1370,7	2979	657	1371,1
00:00	2997	639	1369,9	2982	654	1370,9
00:00	3010	626	1369,1	3000	636	1369,7
00:00	3039	597	1367,2	3006	630	1369,4
00:00	3079	557	1364,6	3008	628	1369,2
00:00	3069	567	1365,3	3007	629	1369,3
00:00	3061	575	1365,8	3001	635	1369,7
00:00	3068	568	1365,3	3011	625	1369,0
00:00	3081	555	1364,5	3008	628	1369,2
00:00	3066	570	1365,5	3071	565	1365,1
00:00	3030	606	1367,8	3091	545	1363,8
00:00	3030	606	1367,8	3092	544	1363,8

Tabla 20: Cotas relevadas

A continuación, se muestran los resultados en los cinco puntos relevados en forma de gráfico:

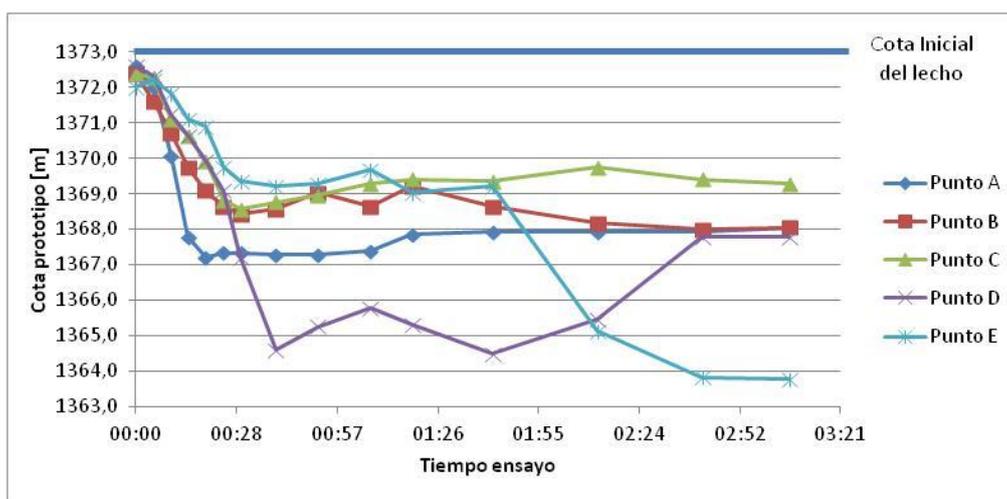


Figura 73. Variación de la erosión en el tiempo

Se observa claramente que después de la primera media hora de ensayo, los puntos más alejados del canal moderador -CM- (puntos A, B y C) se han estabilizado. Lo que ocurre con los puntos D (el correspondiente a la compuerta DM1) y E (el punto relevado aguas arriba del CM) es algo muy particular. Mientras que inicialmente la fosa más profunda se forma en la zona del DM, luego esta va migrando hacia la zona del CM. Esto puede visualizarse más claramente en las imágenes tomadas durante el ensayo que se presentan posteriormente. De todas maneras, luego de las 3 horas de ensayo, la fosa de erosión se estabiliza por completo.

Tal como se viene realizando en los últimos ensayos con el lecho móvil, aquí también mediante la captura de fotografías desde un punto fijo, evaluamos la evolución espacial de la fosa (Figura 74).

A continuación se muestran la secuencia de fotos capturadas en los distintos intervalos de tiempo.

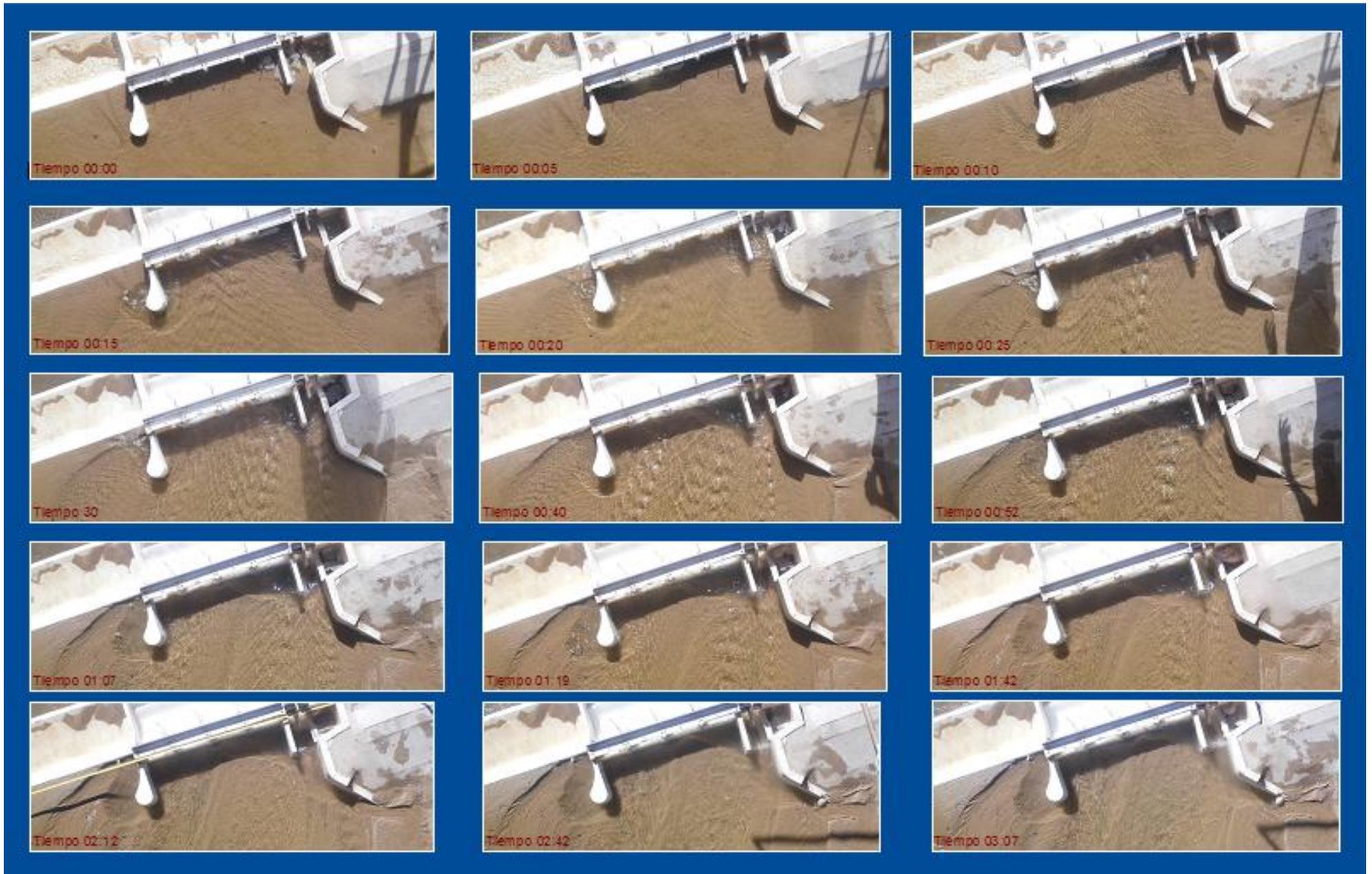


Figura 74. Variación de la erosión en el tiempo

Por último, se relevaron más de 100 puntos en esta zona para generar una superficie digital de la misma y así poder evaluar el volumen de arena removido. Además se tomaron fotografías de la fosa final formada:

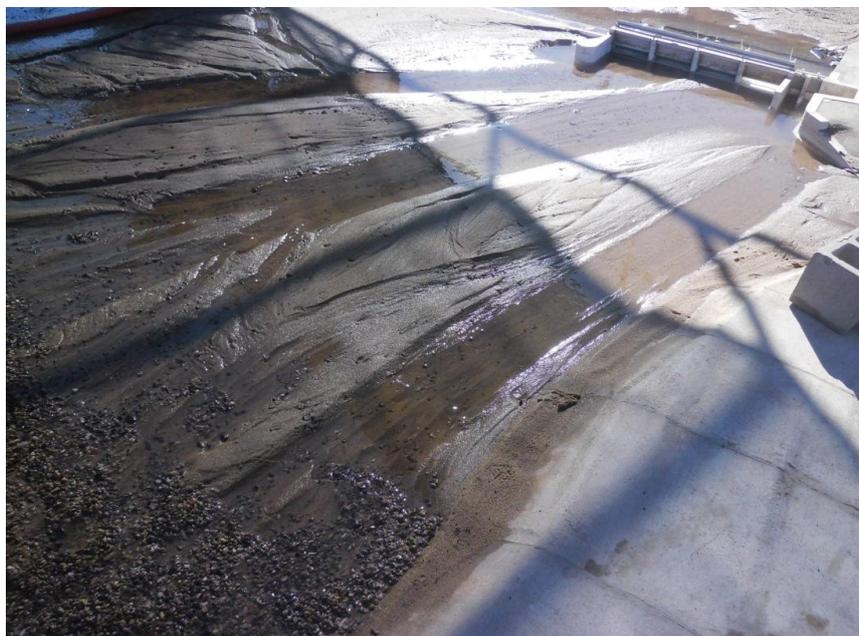


Figura 75. Fosa final

Se muestra a continuación una imagen donde se observan los cauces formados durante el ensayo en la zona aguas arriba del dique:

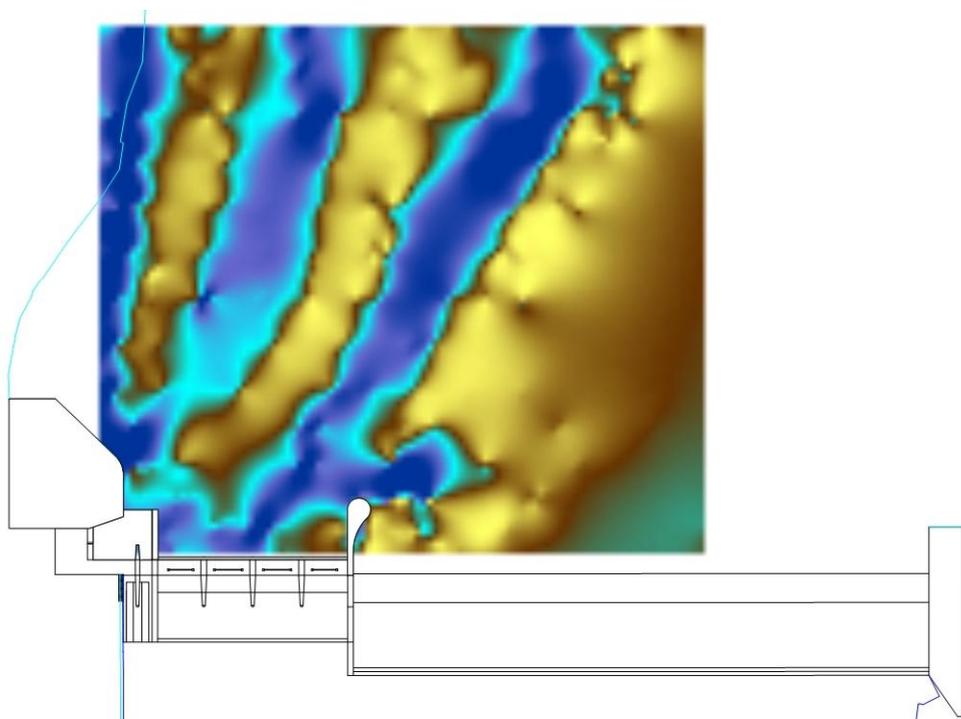


Figura 76. Superficie generada

Para cuantificar el volumen de arena removido durante el ensayo se siguió la siguiente metodología:

Luego de haber generado la superficie digital, es posible cuantificar a partir de ella el volumen de arena que se transportó hacia aguas abajo del dique utilizando una herramienta que nos brinda el software de cálculo.

Por otro lado, para verificar este valor, se recurrió a la tolva existente aguas abajo del dique. Partiendo de la superficie de la misma (dato conocido) y de la altura de arena almacenada allí, se cuantificó el volumen de arena removida.

Conclusiones

Analizando los resultados obtenidos se puede observar que la fosa de erosión formada es de magnitud importante, con este ensayo se determina la condición límite de erosión, esto nos da una situación de comparación con los próximos ensayos a realizar y ya nos va introduciendo una idea de la operación de compuertas al venir la crecida, que es lo se quiere llegar a obtener.

A continuación se observa la fosa final formada y además las curvas de nivel obtenidas con el software de cálculo:



Figura 77. Fosa final

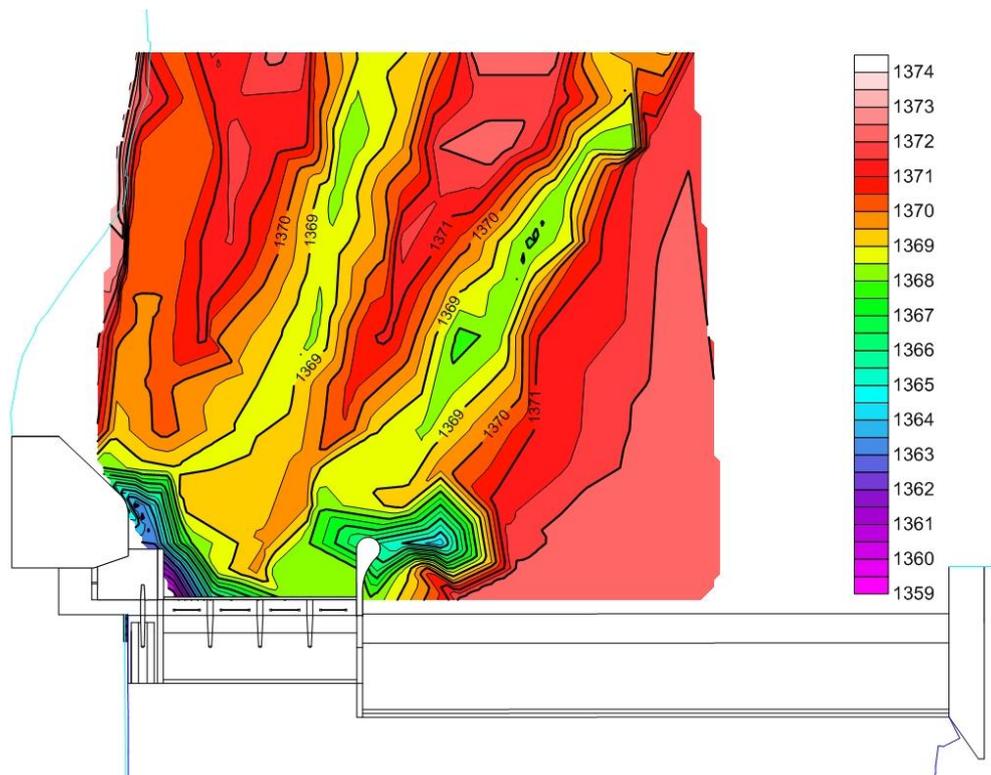


Figura 78. Curvas de nivel

Se puede observar la coincidencia de lo obtenido con el programa y la fotografía digital, además observamos que en el margen derecho del dique móvil se forma una fosa importante de aproximadamente 12 metros en prototipo. Dicha fosa es una situación desfavorable para la estructura, es por eso que se determino que no es conveniente cuando venga la crecida abrir todas las estructuras del dique móvil y el canal moderador.

Se evaluó también el funcionamiento de la nueva tolva, el cual fue satisfactorio y es de aquí en más una herramienta útil para medir el volumen erogado de sedimentos y comparar con el obtenido en el software de cálculo. Se puede observar que el volumen removido es de 0,39 m3 en el modelo, el cual es un volumen importante.

Cálculo del volumen de arena removido

1) Tolva

Superficie de la tolva [m2]	0,90
Altura arena [m]	0,42
Volumen de arena [m3]	0,37 (A)

2) Superficie Digital del Terreno

Volumen de arena removido	Prototipo [m3]	107777
	Modelo [m3]	0,39 (B)

Diferencia [m3]	0,02 (A-B)
Error [%]	5% (A-B)/max(A,B)

Tabla 21: Volumen de arena removido

4.2.4 Ensayo 27

Condiciones del ensayo

A diferencia del ensayo 25 y 26, lo que se quiso evaluar aquí es la fosa de erosión formada al abrir las 4 compuertas del CM. Para ello se fueron abriendo sucesivamente las 4 compuertas del dique móvil -DM-.

El caudal ensayado fue 600 m³/s en prototipo y este fue ingresado tanto por el Río Grande como por el Río Reyes. El 65% del total del mismo ingresó por el Río Grande, mientras que el 35% restante lo hizo por el Río Reyes.

Q prototipo (m ³ /s)	Q Río Grande (m ³ /s)	Q Río Reyes (m ³ /s)	% de apertura					
			CM1	CM2	DM1	DM2	DM3	DM4
581	366	215	0%	0%	100%	100%	100%	100%

Tabla 22: Apertura de compuertas

En los distintos ensayos realizados se evaluó la variación de la hoya de erosión en el tiempo y para ello se utilizaron las técnicas:

- Medición con nivel óptico: se midió la erosión en algunos puntos característicos hasta que se logro el equilibrio y la fosa formada al final del ensayo.
- Captura de fotografías: se midió la variación de la hoya de erosión en el tiempo.

Todos los ensayos se realizaron estando cerrada la toma de agua lateral del dique.

Para que la apertura de las diferentes estructuras móviles no fuese toda en el mismo instante, sino que la llamada de erosión se fuese formando en forma escalonada, se decidió ir abriendo cada una en un intervalo de tiempo de 5 minutos. El orden de apertura de dichas estructuras fue el mismo que el utilizado por los operadores del sistema en la actualidad. Es decir:

Tiempo ensayo	Estructura abierta
00:00	DM3
00:05	DM2
00:10	DM4
00:15	DM1

Tabla 23: Apertura de compuertas

Luego de esos primeros 15 minutos se prosiguió con el ensayo hasta el final del mismo.

Resultados

Los puntos donde se midieron las cotas a lo largo del ensayo fueron los siguientes:

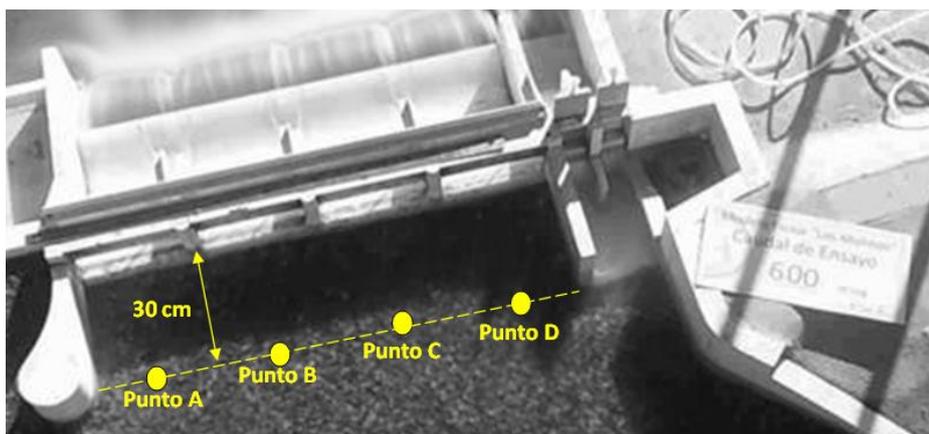


Figura 79. Puntos relevados

Las cotas relevadas en el transcurso del tiempo se pueden observar en las siguientes tablas:

Tiempo ensayo	Punto A			Punto B		
	Medición nivel [mm]	Cota modelo	Cota prototipo	Medición nivel [mm]	Cota modelo	Cota prototipo
00:00	2962	678	1372,5	2960	680	1372,6
00:05	2971	669	1371,9	2968	672	1372,1
00:10	3000	640	1370,0	2995	645	1370,3
00:15	3018	622	1368,8	2998	642	1370,1
00:20	3028	612	1368,2	3005	635	1369,7
00:25	3030	610	1368,1	3012	628	1369,2
00:37	3024	616	1368,4	3024	616	1368,4
00:52	3022	618	1368,6	3021	619	1368,6
01:12	3025	615	1368,4	3025	615	1368,4
01:42	3029	611	1368,1	3032	608	1367,9
02:12	3024	616	1368,4	3035	605	1367,7

Tabla 24: Cotas relevadas

Tiempo ensayo	Punto C			Punto D		
	Medición nivel [mm]	Cota modelo	Cota prototipo	Medición nivel [mm]	Cota modelo	Cota prototipo
00:00	2960	680	1372,6	2957	683	1372,8
00:00	2968	672	1372,1	2959	681	1372,7
00:00	2985	655	1371,0	2990	650	1370,7
00:00	2992	648	1370,5	2995	645	1370,3
00:00	3001	639	1369,9	3012	628	1369,2
00:00	3004	636	1369,7	3012	628	1369,2
00:00	3004	636	1369,7	3031	609	1368,0
00:00	3003	637	1369,8	3029	611	1368,1
00:00	3004	636	1369,7	3029	611	1368,1
00:00	3003	637	1369,8	3030	610	1368,1
00:00	3009	631	1369,4	3025	615	1368,4

Tabla 25: Cotas relevadas

A continuación, se muestran los resultados en los cinco puntos relevados en forma de gráfico:

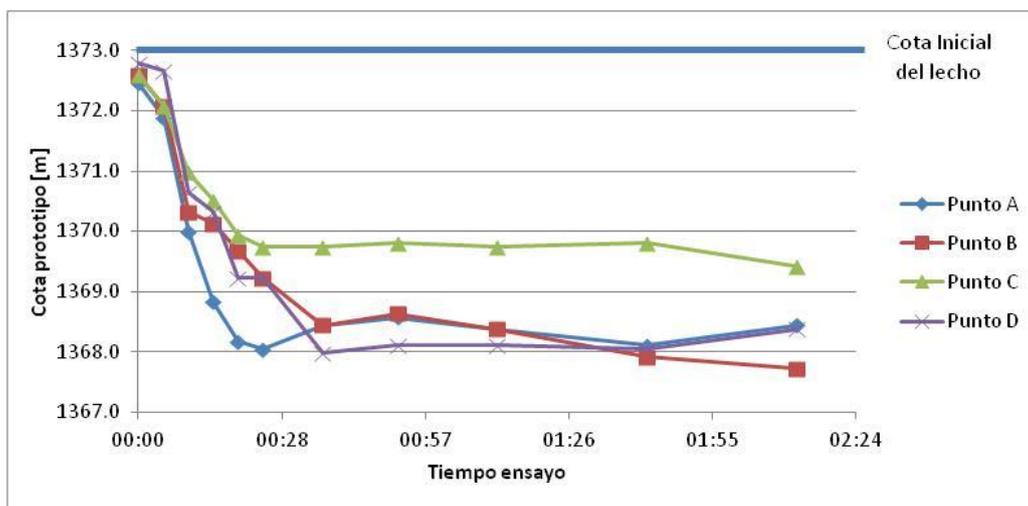


Figura 80. Variación de la erosión en el tiempo

Se observa claramente que después de la primera media hora de ensayo, los puntos se han estabilizado.

Tal como se viene realizando en los últimos ensayos con el lecho móvil, aquí también mediante la captura de fotografías desde un punto fijo, evaluamos la evolución espacial de la fosa (Figura 81).

A continuación se muestran la secuencia de fotos capturadas:



Figura 81. Variación de la erosión en el tiempo

Finalmente, luego de haber logrado la estabilización de la fosa de erosión, antes de finalizar del ensayo se relevaron más de 100 puntos en esta zona para generar una superficie digital de la misma y así poder evaluar el volumen de arena removido. Además se tomaron fotografías de la fosa final formada.

Ahora se muestra una imagen donde se observan los cauces formados durante el ensayo en la zona aguas arriba del dique:

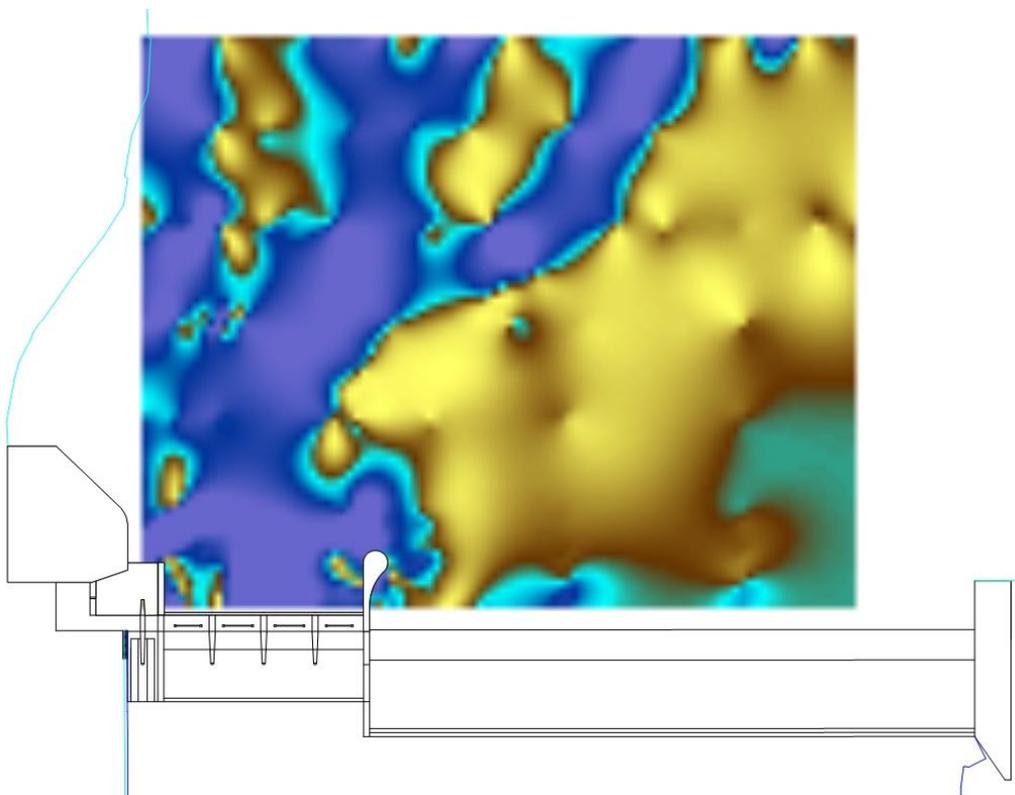


Figura 82. Superficie generada

Luego de haber generado la superficie digital, es posible cuantificar a partir de ella el volumen de arena que se transportó hacia aguas abajo del dique utilizando una herramienta que nos brinda el software de cálculo.

Por otro lado, para verificar este valor, se recurrió a la tolva existente aguas abajo del dique. Partiendo de la superficie de la misma (dato conocido) y de la altura de arena almacenada allí, se cuantificó el volumen de arena removida.

Conclusiones

Analizando los resultados obtenidos podemos observar que la fosa formada al abrir las compuertas del dique móvil, es de magnitud aceptable y no se producen fosas de erosión importantes que puedan poner en riesgo la estructura del dique.

Podemos concluir que abriendo las estructuras del dique móvil en el orden estipulado cuando ocurra la crecida, se obtiene una condición favorable de erogación de sedimentos sin tener inconvenientes con la fosa final formada. Esto nos aproxima más a la operación de compuertas a realizar cuando ocurre la crecida.

A continuación se observa la fosa final formada y además las curvas de nivel obtenidas con el software de cálculo:



Figura 83. Fosa final

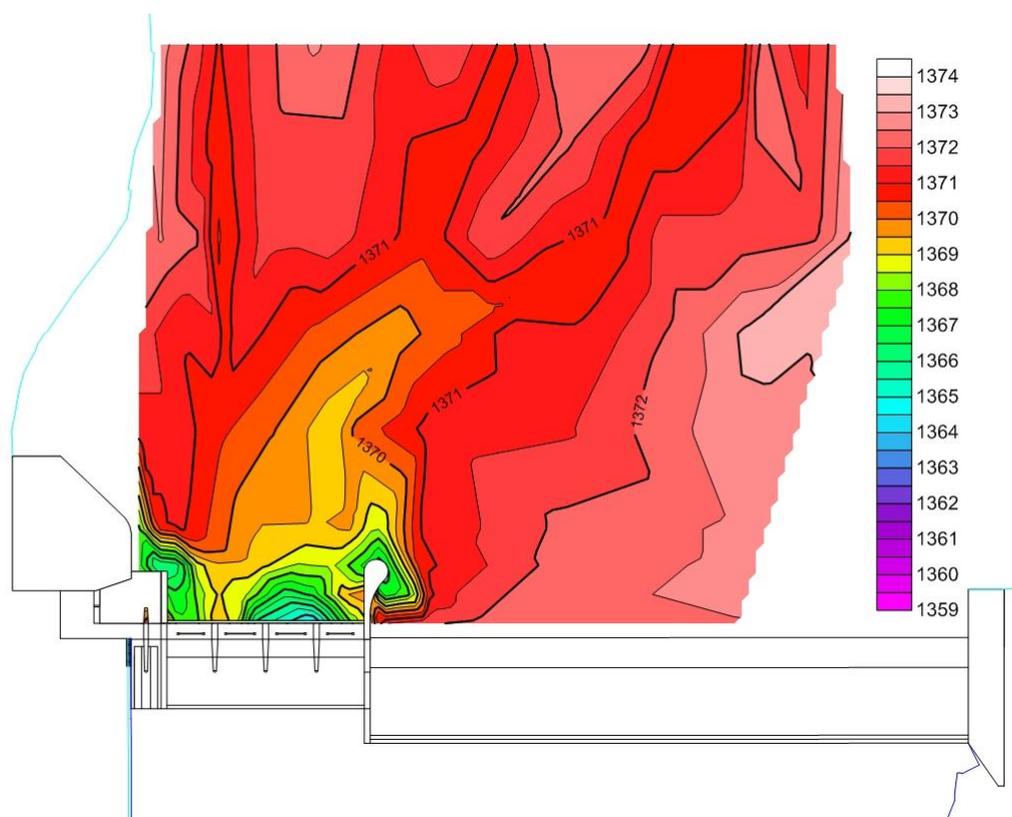


Figura 84. Curvas de nivel

Se puede apreciar que la hoya de erosión formada es aceptable y no se tienen problemas de fosas importantes.

A continuación se muestra el volumen removido durante el ensayo:

Cálculo del volumen de arena removido

1) Tolva

Superficie de la tolva [m ²]	0,90
Altura arena [m]	0,28
Volumen de arena [m ³]	0,25 (A)

2) Superficie Digital del Terreno

Volumen de	Prototipo [m ³]	74610
arena removido	Modelo [m ³]	0,27 (B)

Diferencia [m³]	0,02	(A-B)
Error [%]	9%	(A-B)/max(A,B)

Tabla 26. Volumen de arena removido

El volumen obtenido es de 0,27 m³ en el modelo, comparando con el ensayo 26 con todas las estructuras abiertas incluidas las del canal moderador vemos que en este ensayo se eroga un volumen mucho menor, lo cual es conveniente, ya que la intención es liberar la zona de la toma cuando venga la crecida y se puede decir que el volumen erogado en este ensayo es aceptable para lo antes dicho.

4.3 ENSAYOS A CAUDAL VARIABLE

En esta etapa, se caracterizó el comportamiento hidráulico de las estructuras de descarga, bajo diferentes condiciones de caudal y operación.

En los ensayos 28 y 30 particularmente, se identificó durante la realización de dichos ensayos, dos condiciones hidráulicas bien definidas:

- Estructuras de descarga trabajando a PELO LIBRE
- Estructuras de descarga trabajando a PRESIÓN

En el ensayo 29 se desarrolla una probable metodología de operación de compuertas cuando ocurra la crecida.

4.3.1 Ensayo 28

Condiciones del ensayo

Lo que se quiso evaluar en este ensayo es la fosa de erosión máxima que se forma al abrir los 2 descargadores de fondo del CM cuando pasa el máximo caudal posible.

Q prototipo (m ³ /s)	Q Río Grande (m ³ /s)	Q Río Reyes (m ³ /s)	% de apertura					
			CM1	CM2	DM1	DM2	DM3	DM4
Variable para que no pase agua por DF. Se fue aumentando progresivamente	100%	0%	100%	100%	0%	0%	0%	0%

Tabla 27: Apertura de compuertas

El caudal ensayado fue el máximo capaz de ser erogado por el canal moderador (tanto por CM1 como por CM2) con las compuertas del DM cerradas y sin que pase agua por el dique fijo. Este fue ingresado totalmente por el Río Grande.

En los distintos ensayos realizados se evaluó la variación de la hoya de erosión en el tiempo y para ello se utilizaron las técnicas:

- Medición con nivel óptico: se midió la erosión en algunos puntos característicos hasta que se logro el equilibrio y la fosa formada al final del ensayo.
- Captura de fotografías: se midió la variación de la hoya de erosión en el tiempo.

Todos los ensayos se hicieron estando cerrada la toma de agua lateral del dique.

Para que la apertura de las diferentes estructuras móviles no fuese toda en el mismo instante, sino que la llamada de erosión se fuese formando en forma escalonada, se decidió ir abriendo cada una en un intervalo de tiempo de 5 minutos. El orden de apertura de dichas estructuras fue el siguiente:

Tiempo ensayo	Estructura abierta
00:00	CM2
00:05	CM1

Tabla 28: Apertura de compuertas

Luego de esos primeros 5 minutos se prosiguió con el ensayo hasta el final del mismo.

Resultados

Se tomaron lecturas de los caudales a medida que transcurría el ensayo, en la siguiente tabla podemos observar la variación de dichos caudales:

Hora	Tiempo ensayo	Río Grande			Q Total en prototipo (m3/s)	Cota superficie agua en prototipo (m)			
		H vertedero (cm)	Q prototipo (m3/s)	Q modelo (lt/s)		DM		CM	
						Margen Izquierda	Margen Derecha	Margen Izquierda	Margen Derecha
10:07	00:00	24.5	94	2.75	94	1373.0	1373.0	1372.6	1372.6
10:12	00:05	24.4	91	2.67	91	1373.0	1370.0	1368.7	1368.7
10:17	00:10	24.8	101	2.96	101	1373.0	1369.9	1367.4	1368.7
10:25	00:18	25.1	110	3.24	110	1373.0	1370.0	1368.0	1368.7
10:35	00:28	25.0	107	3.15	107	1373.0	1370.0	1367.9	1369.9
10:45	00:38	26.5	159	4.66	159	1373.0	1370.0	1368.7	1370.0
10:55	00:48	27.2	188	5.53	188	1373.0	1371.0	1369.9	1370.7
11:05	00:58	27.6	207	6.08	207	1373.0	1371.3	1369.9	1371.3
11:15	01:08	28.4	243	7.12	243	1373.0	1372.6	1370.7	1372.0
11:25	01:18	28.5	250	7.33	250	1373.0	1372.6	1370.7	1372.4
11:35	01:28	28.9	271	7.95	271	1373.0	1373.0	1371.3	1372.6
11:45	01:38	28.8	264	7.75	264	1373.0	1372.7	1371.3	1372.6
12:00	01:53	29.1	282	8.28	282	1373.0	1372.8	1371.5	1373.0
12:10	02:03	29.2	284	8.33	284	1373.0	1373.0	1371.3	1373.0
12:15	02:08	29.5	303	8.90	303	1373.0	1373.0	1372.0	1373.0
Máximo		29.52	303.17	8.90	303.17	1373.00	1373.00	1372.60	1373.00
Mínimo		24.40	90.92	2.67	90.92	1373.00	1369.90	1367.40	1368.70
Media		27.16	196.92	5.78	196.92	1373.00	1371.66	1370.13	1371.28
Desvío		1.95	79.80	2.34	79.80	0.00	1.36	1.63	1.68

Tabla 29: Variación de caudales de ingreso

Graficando el caudal versus el tiempo, se observa como este se fue incrementando a medida que la fosa de erosión aguas arriba del CM crecía. Cuando se alcanzó la fosa final (estabilización del flujo de sedimentos); también se alcanzó el caudal máximo erogable por estos 2 descargadores de fondo.

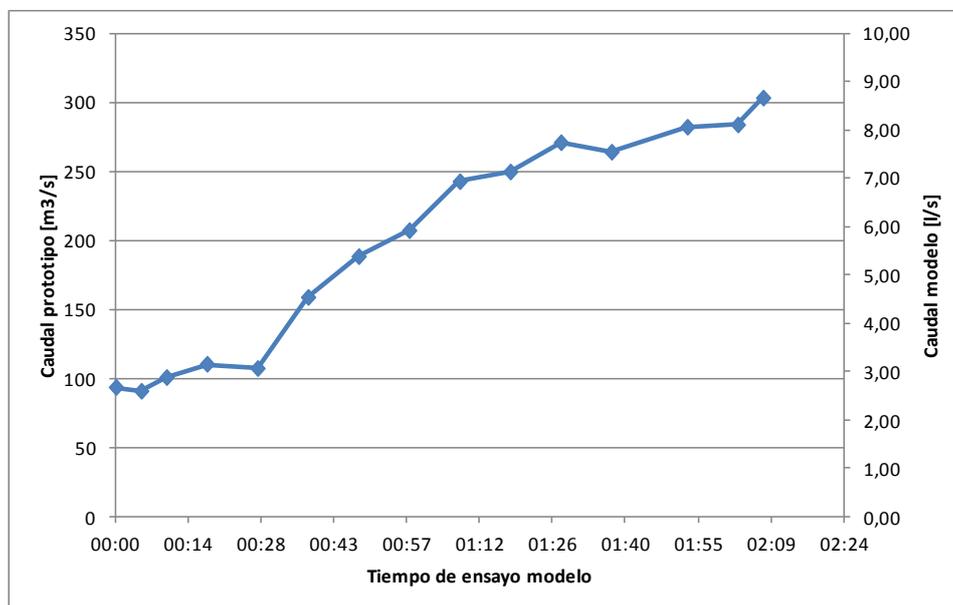


Figura 85. Variación de caudales de ingreso

Es importante aclarar que el caudal máximo erogado fue el mismo que se obtuvo en el ensayo 21. En dicho ensayo también se midió el mismo parámetro, solo que en este el lecho existente aguas arriba del dique era fijo.

Se tomó 1 punto de referencia aguas arriba del dique. Dicho punto se tomó en el centro del CM y se evaluó la variación de cota para ver la evolución de la erosión en el tiempo. El punto donde se midieron las cotas a lo largo del ensayo fue el siguiente:

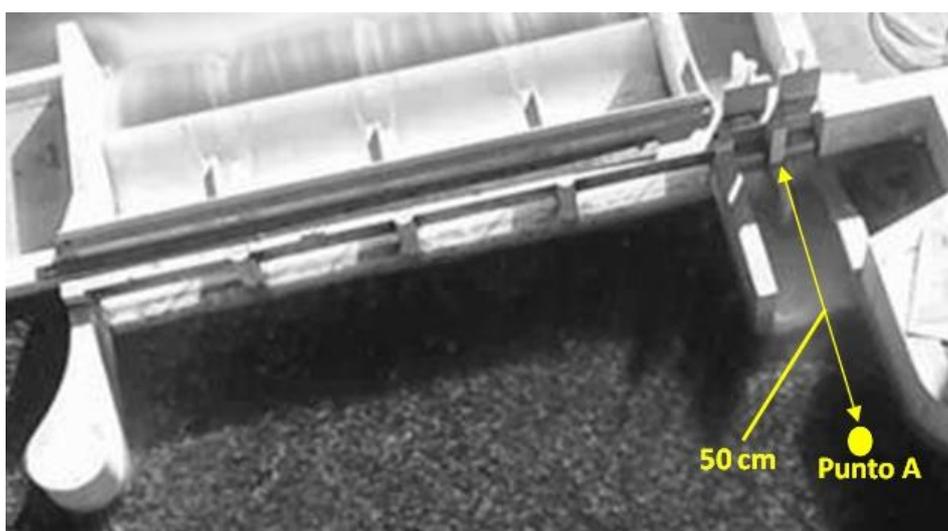


Figura 86. Punto relevado

Las cotas relevadas en el transcurso del tiempo se pueden observar en la siguiente tabla:

Hora	Tiempo ensayo	Erosión		
		Punto A		
		Medición nivel [mm]	Cota modelo [mm]	Cota prototipo [m]
10:07	00:00	2941	673	1372,1
10:12	00:05	2990	624	1369,0
10:17	00:10	3008	606	1367,8
10:25	00:18	3005	609	1368,0
10:35	00:28	2998	616	1368,4
10:45	00:38	3008	606	1367,8
10:55	00:48	3011	603	1367,6
11:05	00:58	3042	572	1365,6
11:15	01:08	3040	574	1365,7
11:25	01:18	3028	586	1366,5
11:35	01:28	3030	584	1366,4
11:45	01:38	3030	584	1366,4
12:00	01:53	3029	585	1366,4
12:10	02:03	3034	580	1366,1
12:15	02:08	3034	580	1366,1

Tabla 30: Cotas relevadas

Tal como se viene realizando en los últimos ensayos con el lecho móvil, aquí también mediante la captura de fotografías desde un punto fijo, evaluamos la evolución espacial de la fosa (Figura 87). A continuación se muestran la secuencia de fotos capturadas:

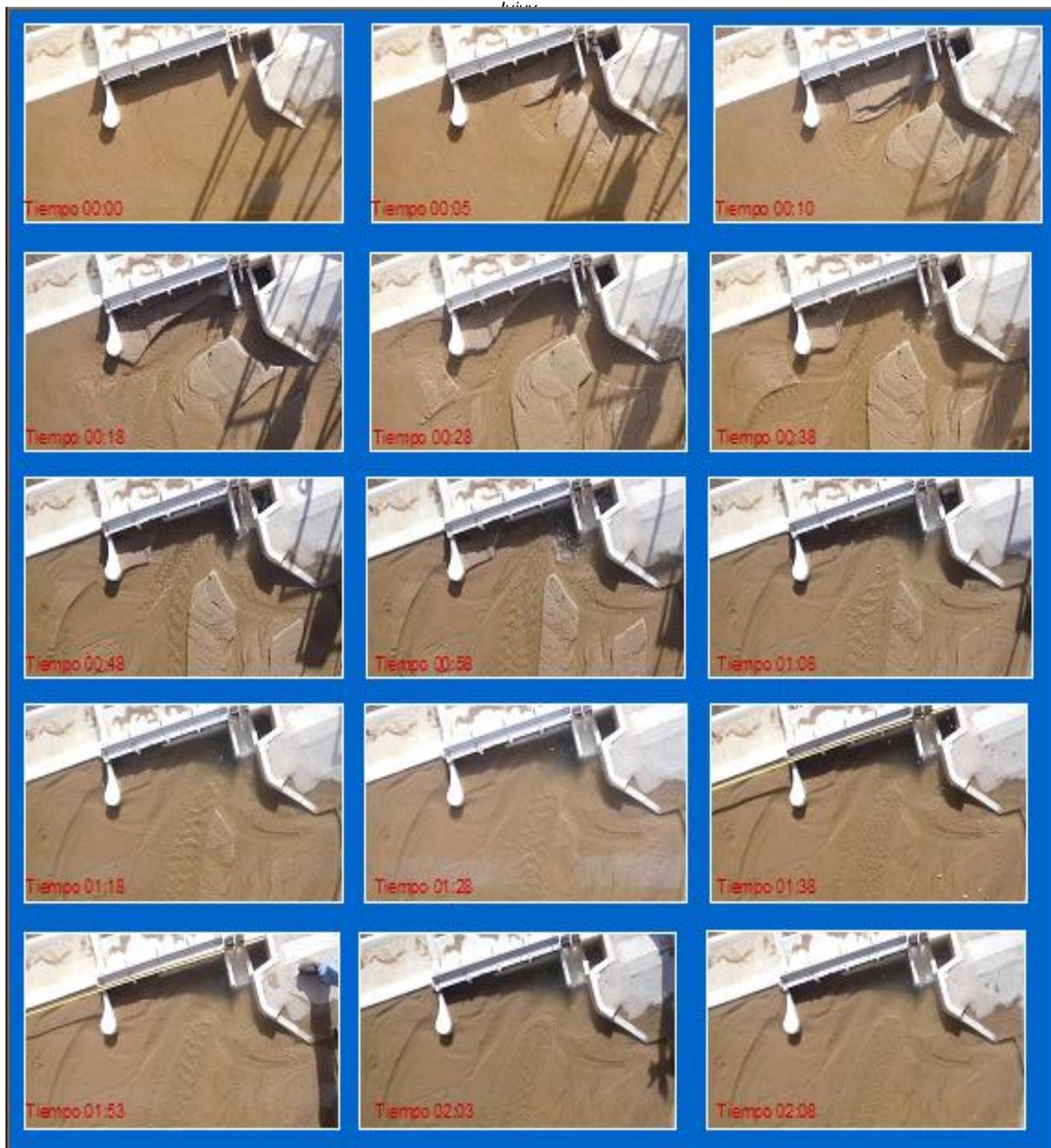


Figura 87. Variación de la erosión en el tiempo

Finalmente, luego de haber logrado la estabilización de la fosa de erosión, antes de finalizar del ensayo se relevaron más de 100 puntos en esta zona para generar una superficie digital de la misma y así poder evaluar el volumen de arena removido. Además se tomaron fotografías de la fosa final formada:

Luego de haber generado la superficie digital, es posible cuantificar a partir de ella el volumen de arena que se transportó hacia aguas abajo del dique utilizando una herramienta que nos brinda el software de cálculo.

Conclusiones

Haciendo un análisis de a variación del caudal a lo largo del ensayo:

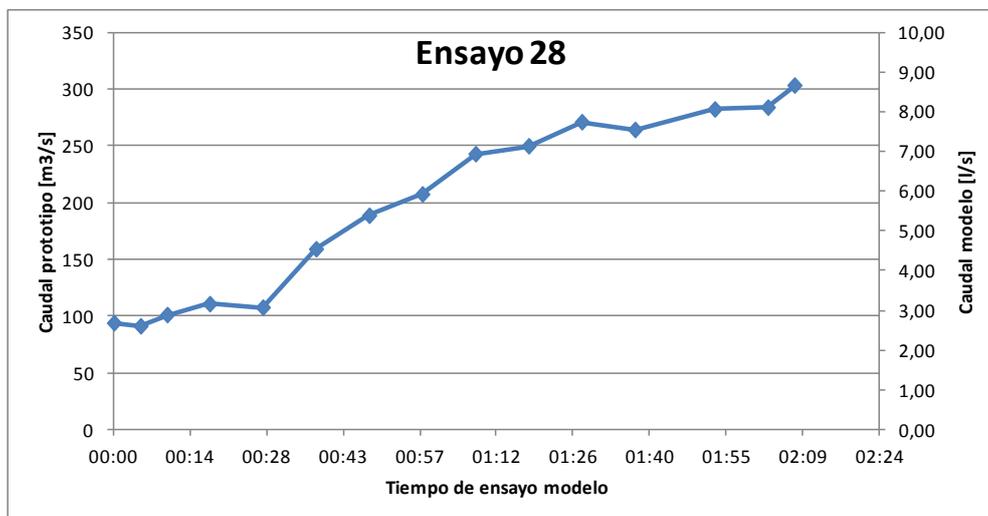


Figura 88. Variación del caudal en el tiempo

Podemos concluir que los umbrales de caudal para los cuales las estructuras de descarga poseen un comportamiento hidráulico diferente son los siguientes:

- **160 m³/s:** Máximo caudal con el que 2 descargadores de fondo CM1 y CM2 trabajan a pelo libre.
- **175 m³/s:** caudal con el que se ahoga la primera estructura, en este caso CM1.
- **190 m³/s:** Mínimo caudal con el que las los 2 descargadores de fondo CM1 y CM2 trabajan a presión:
- **300 m³/s:** Máximo caudal que pueden erogar CM1 y CM2 sin que pase agua por el DF (es decir cota en dique fijo 1373)

Se resume en la siguiente tabla lo antes expuesto:

Q prototipo (m ³ /s)	Q Río Grande (m ³ /s)	Q Río Reyes (m ³ /s)	Comportamiento Hidráulico						¿Vierte agua por DF?
			CM1	CM2	DM1	DM2	DM3	DM4	
159	159	0	L	L	/	/	/	/	NO
175	175	0	P	L	/	/	/	/	NO
190	190	0	P	P	/	/	/	/	NO
303	303	0	P	P	/	/	/	/	SI

Tabla 31. Comportamiento hidráulico

Referencias:

/ = Estructura cerrada

L = la estructura trabaja con superficie libre

P = la estructura trabaja a presión.

Esta condición nos ayuda a determinar la eficiencia de las compuertas del canal moderador cuando trabajan a pelo libre o a presión, esto debido a que si tenemos una situación de pelo libre en la compuerta analizada eroga una mayor cantidad de sedimentos que cuando trabaja a presión.

Además analizando la fosa de erosión formada, vemos que al abrir las compuertas del canal moderador se produce una importante hoya en la margen derecha del dique móvil, poniendo en riesgo la estructura.

Podemos concluir que no es conveniente abrir primeramente las compuertas del canal moderador cuando vienen las crecidas, ya que se forma una fosa de erosión desfavorable para la estructura del dique.

A continuación se observa la fosa final formada y además las curvas de nivel obtenidas con el software de cálculo:



Figura 89. Fosa final

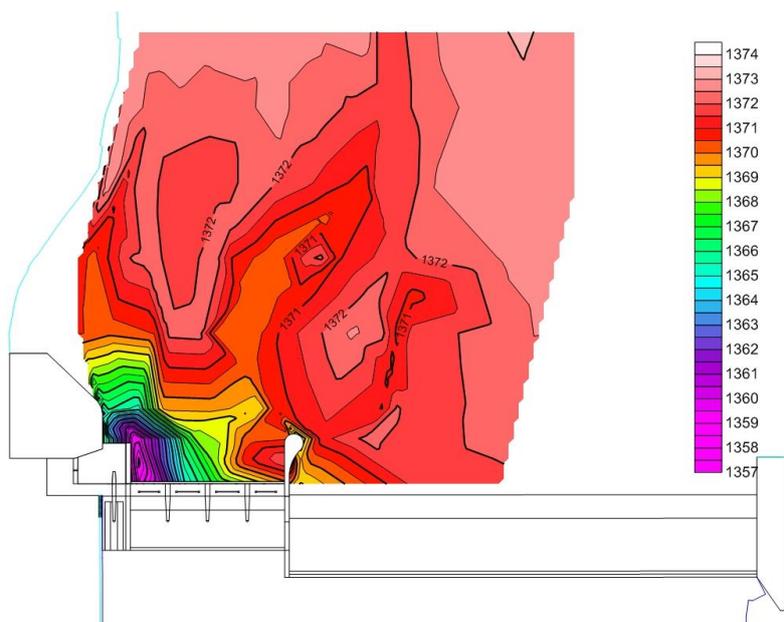


Figura 90. Curvas de nivel

Como ya dijimos, podemos observar en la margen derecha del dique móvil una fosa de aproximadamente 14 metros de profundidad.

El volumen obtenido es de 0,10 m³ en el modelo, el cual comparando con los anteriores ensayos, no es de magnitud importante.

Cálculo del volumen de arena removido

1) Tolva

Superficie de la tolva [m ²]	0,90
Altura arena [m]	0,12
Volumen de arena [m ³]	0,10 (A)

2) Superficie Digital del Terreno

Volumen de arena removido	Prototipo [m ³]	26.637
	Modelo [m ³]	0,10 (B)

Diferencia [m³]	0,01 (A-B)
Error [%]	6% (A-B)/max(A,B)

Tabla 32: Volumen de arena removido

4.3.2 Ensayo 30

Condiciones del ensayo

En el siguiente ensayo se quisieron evaluar los siguientes caudales:

- Máximo caudal con el que las 4 compuertas del DM trabajan todas a pelo libre.
- Mínimo caudal con el que las 4 compuertas del DM trabajan todas a presión.
- Máximo caudal que pueden erogar las 4 compuertas del DM sin que pase agua por el DF (es decir cota en dique fijo 1373).
- Máximo caudal que pueden erogar las 4 compuertas del DM y los 2 CM sin que pase agua por el DF (es decir cota en dique fijo 1373).

En los distintos ensayos realizados se evaluó la variación de la hoya de erosión en el tiempo y para ello se utilizaron las técnicas:

- Medición con nivel óptico: se midió la erosión en algunos puntos característicos hasta que se logro el equilibrio y la fosa formada al final del ensayo.
- Captura de fotografías: se midió la variación de la hoya de erosión en el tiempo.

Todos los ensayos se hicieron estando cerrada la toma de agua lateral del dique.

Para que la apertura de las diferentes estructuras móviles no fuese toda en el mismo instante, sino que la llamada de erosión se fuese formando en forma escalonada, se decidió ir abriendo cada una en un intervalo de tiempo de 5 minutos. En los primeros 15 minutos de ensayo se abrieron las 4 compuertas del DM en el siguiente orden:

Tiempo ensayo	Estructura abierta
00:00	DM3
00:05	DM2
00:10	DM4
00:15	DM1

Tabla 33: Apertura de compuertas

Luego de esos primeros minutos se prosiguió con el ensayo; y luego de medir el máximo caudal erogable por el DM sin que pase agua a través del DF se procedió a abrir los 2 CM (también en un intervalo de 5 minutos entre ellos) para posteriormente permitir la formación de la fosa de erosión final que fue la que busco medirse.

Resultados

Se tomaron lecturas de los caudales a medida que transcurría el ensayo, en la siguiente tabla podemos observar la variación de dichos caudales:

Hora	Tiempo ensayo	Río Grande			Río Reyes			Q Total en prototipo (m3/s)
		H vertedero (cm)	Q prototipo (m3/s)	Q modelo (lt/s)	H vertedero (cm)	Q prototipo (m3/s)	Q modelo (lt/s)	
10:30	00:00	24,6	97	2,83	19,45	0	0,00	97
10:35	00:05	27,5	201	5,91	19,45	0	0,00	201
10:40	00:10	27,8	215	6,31	19,45	0	0,00	215
10:45	00:15	28,6	254	7,45	19,45	0	0,00	254
10:50	00:20	29,7	313	9,20	19,45	0	0,00	313
10:55	00:25	28,8	264	7,75	28,9	131	3,84	395
11:00	00:30	29,9	325	9,55	30,2	180	5,28	505
11:05	00:35	30,7	375	11,00	30,9	210	6,18	585
11:12	00:42	31,8	450	13,20	32,1	269	7,90	719
11:20	00:50	32,7	517	15,18	32,2	275	8,06	792
11:27	00:57	33,0	541	15,88	32,8	308	9,03	849
11:35	01:05	33,4	574	16,84	33	319	9,37	893
11:48	01:18	33,5	582	17,09	33	319	9,37	901
11:52	01:22	33,5	582	17,09	32,9	313	9,20	896
12:00	01:30	34,3	652	19,13	33,6	356	10,44	1007
12:15	01:45	33,5	582	17,09	31,5	239	7,01	821

Tabla 34: Variación de caudales de ingreso

En la siguiente tabla se muestra como se fueron operando las compuertas a medida que transcurría el tiempo y variaba el caudal de acuerdo a las premisas del ensayo:

Hora	Tiempo ensayo	Q Total en prototipo (m3/s)	Observaciones
10:30	00:00	97	Se abre DM3.
10:35	00:05	201	Se abre DM2.
10:40	00:10	215	Se abre DM4.
10:45	00:15	254	Se abre DM1.
10:50	00:20	313	-
10:55	00:25	395	-
11:00	00:30	505	A las 11 se ahoga DM4
11:05	00:35	585	-
11:12	00:42	719	-
11:20	00:50	792	A las 11:20 se ahoga DM3 y empieza a verter por DF
11:27	00:57	849	-
11:35	01:05	893	-
11:48	01:18	901	Abro CM2.
11:52	01:22	896	Abro CM1. Se desahoga DM4. Empieza a verter por DF
12:00	01:30	1007	Vierte por DF
12:15	01:45	821	No vierte por DF. Se desahoga DM3

Tabla 35: Operación de compuertas

Al realizar el ensayo, se tomaron 5 puntos de referencia aguas arriba del dique. Dichos puntos se tomaron sobre el centro de cada compuerta y en el centro del CM y se evaluó la variación de cota para ver la evolución de la erosión en el tiempo.

Los puntos donde se midieron las cotas a lo largo del ensayo fueron los siguientes:

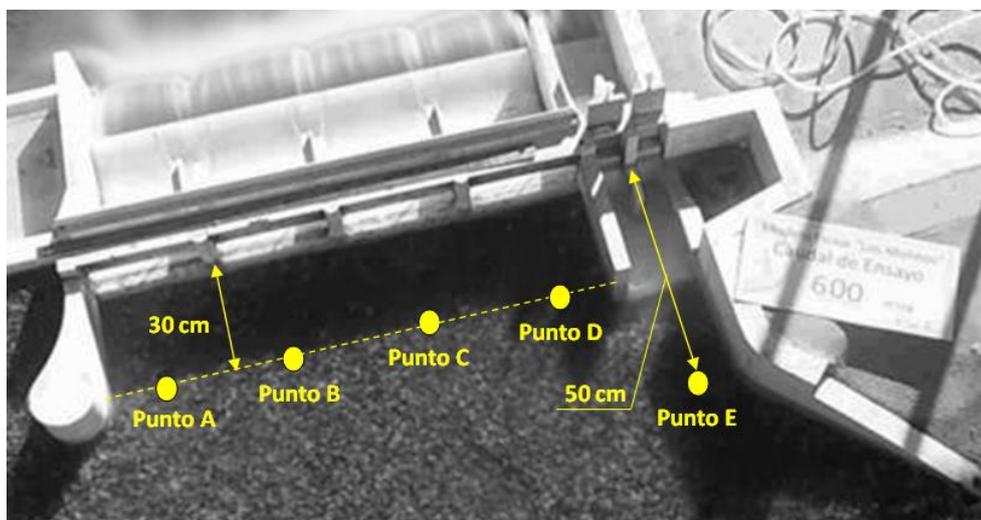


Figura 91. Puntos relevados

Las cotas relevadas en el transcurso del tiempo se pueden observar en las siguientes tablas:

Tiempo ensayo	Punto A			Punto B			Punto C		
	Medición nivel [mm]	Cota modelo [mm]	Cota prototipo [m]	Medición nivel [mm]	Cota modelo [mm]	Cota prototipo [m]	Medición nivel [mm]	Cota modelo [mm]	Cota prototipo [m]
00:00	2924	670	1372,0	2922	672	1372,1	2922	672	1372,1
00:05	2958	636	1369,7	2940	654	1370,9	2924	670	1372,0
00:10	2980	614	1368,3	2939	655	1371,0	2934	660	1371,3
00:15	2989	605	1367,7	2947	647	1370,5	2932	662	1371,4
00:20	2999	595	1367,1	2949	645	1370,3	2929	665	1371,6
00:25	3009	585	1366,4	2959	635	1369,7	2930	664	1371,6
00:30	3014	580	1366,1	2964	630	1369,4	2932	662	1371,4
00:35	3024	570	1365,5	2969	625	1369,0	2944	650	1370,7
00:42	3023	571	1365,5	2976	618	1368,6	2945	649	1370,6
00:50	3041	553	1364,3	2957	637	1369,8	2940	654	1370,9
00:57	3039	555	1364,5	2950	644	1370,3	2926	668	1371,8
01:05	3027	567	1365,3	2949	645	1370,3	2930	664	1371,6
01:18	3028	566	1365,2	2955	639	1369,9	2940	654	1370,9
01:22	3014	580	1366,1	2961	633	1369,5	2941	653	1370,8
01:30	3009	585	1366,4	2988	606	1367,8	2960	634	1369,6
01:45	3009	585	1366,4	2986	608	1367,9	2960	634	1369,6

Tabla 36. Cotas relevadas

Hora	Tiempo ensayo	Punto D			Punto E		
		Medición nivel [mm]	Cota modelo	Cota prototipo	Medición nivel [mm]	Cota modelo	Cota prototipo
10:30	00:00	2919	675	1372,3	2920	674	1372,2
10:35	00:05	2920	674	1372,2	2925	669	1371,9
10:40	00:10	2920	674	1372,2	2922	672	1372,1
10:45	00:15	2935	659	1371,2	2924	670	1372,0
10:50	00:20	2950	644	1370,3	2921	673	1372,1
10:55	00:25	2949	645	1370,3	2923	671	1372,0
11:00	00:30	2955	639	1369,9	2922	672	1372,1
11:05	00:35	2940	654	1370,9	2924	670	1372,0
11:12	00:42	2943	651	1370,7	2924	670	1372,0
11:20	00:50	2952	642	1370,1	2939	655	1371,0
11:27	00:57	2949	645	1370,3	2939	655	1371,0
11:35	01:05	2937	657	1371,1	2942	652	1370,8
11:48	01:18	2952	642	1370,1	2940	654	1370,9
11:52	01:22	2951	643	1370,2	2945	649	1370,6
12:00	01:30	3010	584	1366,4	2956	638	1369,9
12:15	01:45	3035	559	1364,7	2957	637	1369,8

Tabla 37. Cotas relevadas

A continuación, se muestran los resultados en forma de gráfico:

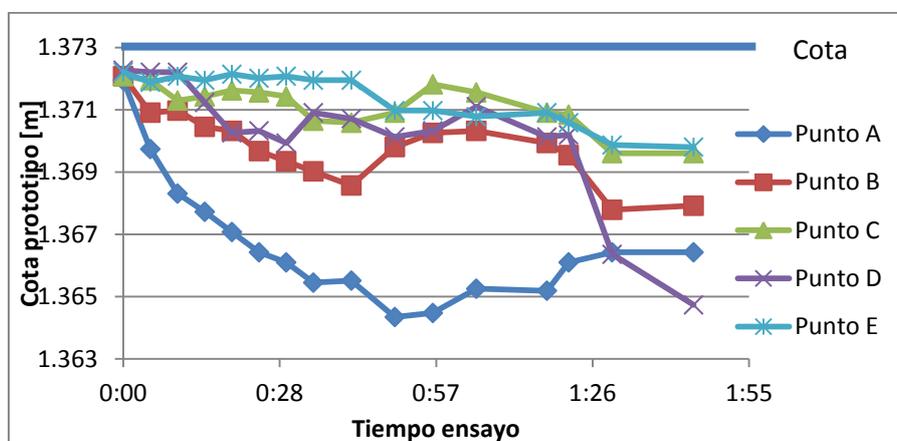


Figura 92. Variación de las cotas en el tiempo

Tal como se viene realizando en los últimos ensayos con el lecho móvil, aquí también mediante la captura de fotografías desde un punto fijo, evaluamos la evolución espacial de la fosa. A continuación se muestran la secuencia de fotos capturadas:

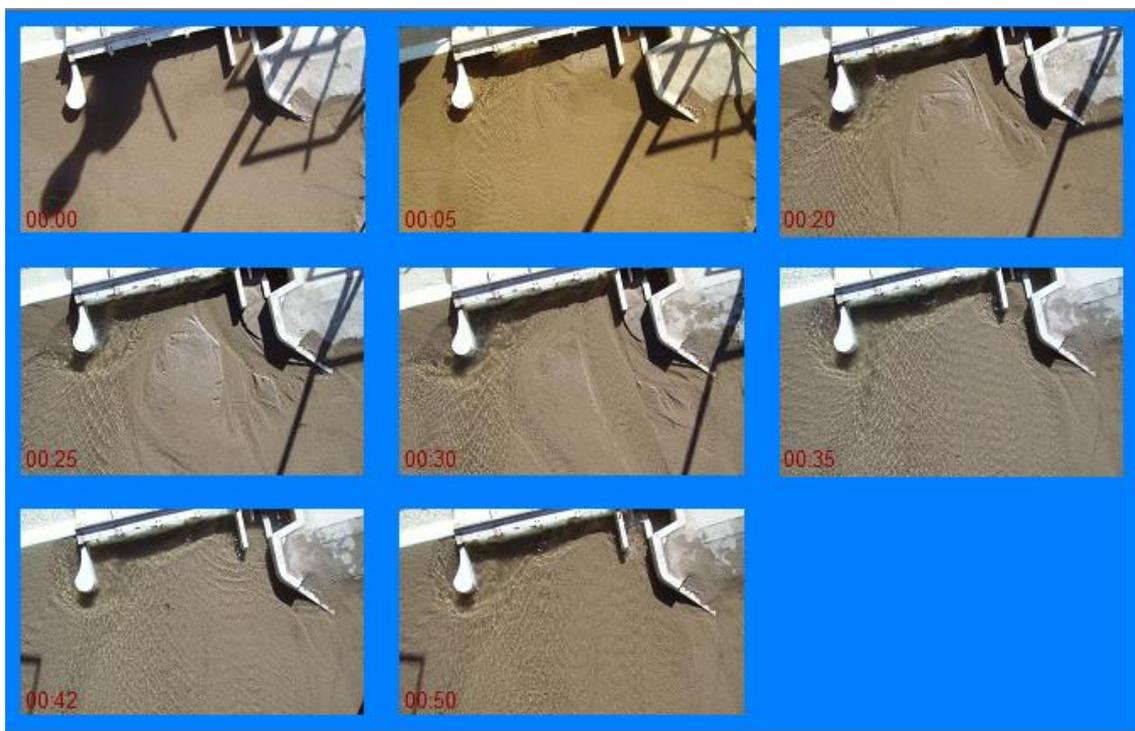


Figura 93. Variación de la erosión en el tiempo

Conclusiones

Haciendo un análisis de a variación del caudal a lo largo del ensayo:

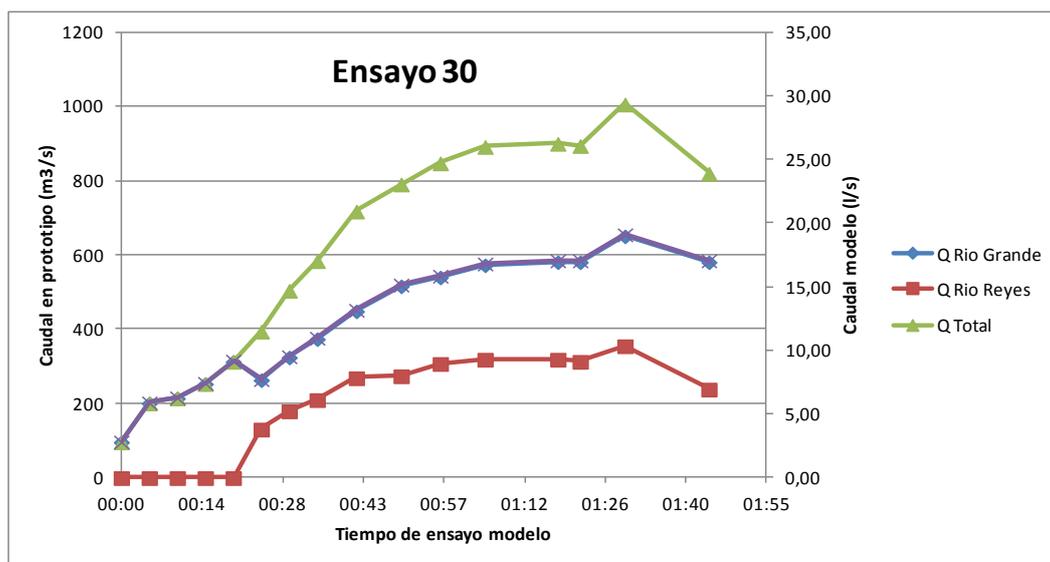


Figura 94. Variación de caudales en el tiempo

Podemos concluir que los umbrales de caudal para los cuales las estructuras de descarga poseen un comportamiento hidráulico diferente, son los siguientes:

- **500 m³/s:** Máximo caudal con el que las 4 compuertas del DM trabajan a pelo libre. Al alcanzar este último caudal, se ahoga la primera estructura, en este caso DM4.
- **800 m³/s:** se ahoga DM3 y empieza a verter agua por el DF.
- **820 m³/s:** Máximo caudal que pueden erogar las 4 compuertas del DM y los 2 CM sin que pase agua por el DF (es decir cota en dique fijo 1373).

* Luego se redujo el caudal a 600 m³/s, se cerraron CM1 y CM2 y en este caso las 4 compuertas del DM trabajaban a presión.

A continuación se resume lo antes expuesto en la siguiente tabla:

Q prototipo (m ³ /s)	Q Río Grande (m ³ /s)	Q Río Reyes (m ³ /s)	Comportamiento Hidráulico						¿Vierte agua por DF?
			CM1	CM2	DM1	DM2	DM3	DM4	
505	325	180	/	/	L	L	L	L	NO
585	375	210	/	/	L	L	L	P	NO
792	517	275	/	/	L	L	P	P	SI
901	582	319	/	P	L	L	P	P	NO
896	582	313	P	P	L	L	P	L	SI
821	582	239	P	P	L	L	L	L	NO
600	390	210	/	/	P	P	P	P	NO

Tabla 38. Comportamiento hidráulico

Referencias:

/ = Estructura cerrada

L = la estructura trabaja con superficie libre

P = la estructura trabaja a presión.

Se observa que el comportamiento hidráulico de las estructuras de descarga (trabajo a pelo libre o a presión) no solo depende del caudal que evacua sino también de la condición del fondo cercano a la misma (ver 2° y última fila del gráfico anterior)

Cuando el sistema funciona a pelo libre la erosión es generalizada y no se estabiliza con el tiempo, mientras que si trabajan a presión la erosión es local y se estabiliza en poco tiempo.

4.3.3 Ensayo 29

Condiciones del ensayo

Lo que se evaluará aquí es una probable metodología de apertura de compuertas cuando se alcanza la crecida anual cuyo pico es 600 m³/s.

El caudal ensayado fue variando desde los 600 m³/s en prototipo hasta los 200 m³/s. Este fue ingresado tanto por el Río Grande como por el Río Reyes (salvo en el caso de 200 m³/s en que todo ingreso por el Grande). El 65% del total del mismo ingresó por el Río Grande, mientras que el 35% restante lo hizo por el Río Reyes.

En los distintos ensayos realizados se evaluó la variación de la hoya de erosión en el tiempo y para ello se utilizaron las técnicas:

- Medición con nivel óptico: se midió la erosión en algunos puntos característicos hasta que se logro el equilibrio y la fosa formada al final del ensayo.
- Captura de fotografías: se midió la variación de la hoya de erosión en el tiempo.

Vale aclarar que todos los ensayos se hicieron estando cerrada la toma de agua lateral del dique.

El ensayo se dividió en una serie de etapas:

- Primera etapa (600 m³/s en prototipo - cota 1374 en Margen Izquierda Dique Móvil).

Se espera la crecida con las 4(cuatro) compuertas del Dique Móvil abiertas. Esto es DM1, DM2, DM3 y DM4. Se mantienen cerradas las del Canal Moderador. Esto genera un transporte adecuado de sedimentos, sin lograr ninguna fosa demasiado profunda que pueda llegar a descalzar ninguna parte de la estructura aguas arriba.

- Segunda etapa (400 m³/s - cota 1371,3 en Margen Izquierda Dique Móvil).

Una vez alcanzada esta cota, se cierra la compuerta DM1 del Dique Móvil, dejándose abiertas DM2, DM3 y DM4. Se abre durante un tiempo adecuado el Canal Moderador para evacuar sedimentos, y luego se la cierra para proteger a la estructura de la socavación extrema de la pila próxima. No se espera este caudal con las 4(cuatro) compuertas abiertas del Dique Móvil, pues las velocidades de evacuación serían muy bajas, disminuyendo el tirante de agua, y sedimentándose las partículas transportadas por el flujo.

- Tercera etapa (200 m³/s - cota 1371 en Margen Izquierda Dique Móvil)

Similar al procedimiento para 400 m³/s. En este caso, se cierra, además de DM1, también DM2, dejando abiertas DM3 Y DM4 solamente. Para evacuar sedimentos, se abre el Canal Moderador durante un tiempo adecuado, luego se lo cierra para evitar el descalce de la estructura. Es necesario para este caudal mantener solamente dos compuertas abiertas (DM3 y DM4), pues así las velocidades no son tan bajas como para sedimentar y el tirante de agua no disminuye en exceso.

En síntesis, lo ensayado fue lo siguiente:

Q prototipo (m3/s)	Q Río Grande (m3/s)	Q Río Reyes (m3/s)	% de apertura					
			CM1	CM2	DM1	DM2	DM3	DM4
595	388	208	0%	0%	100%	100%	100%	100%
570	368	202	0%	100%	0%	100%	100%	100%
544	350	194	100%	100%	0%	0%	100%	100%

Tabla 39: Apertura de compuertas

A continuación se grafica la variación del caudal en función del tiempo transcurrido:

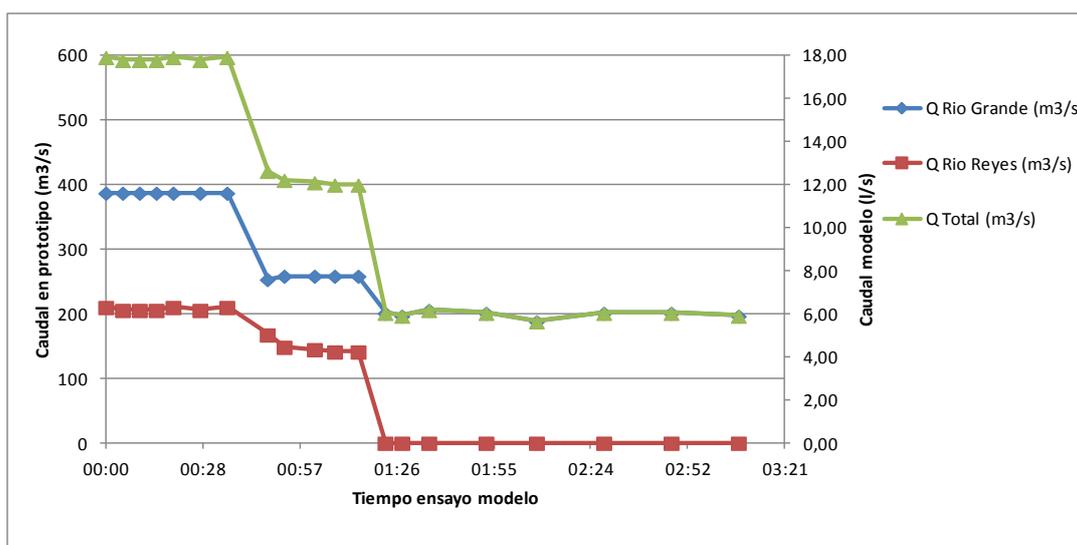


Figura 95. Variación del caudal de ingreso

Resultados

Se tomaron lecturas de los caudales a medida que transcurría el ensayo, en la siguiente tabla podemos observar la variación de dichos caudales:

Hora	Tiempo ensayo	Río Grande			Río Reyes			Q Total en prototipo (m³/s)
		H vertedero (cm)	Q prototipo (m³/s)	Q modelo (lt/s)	H vertedero (cm)	Q prototipo (m³/s)	Q modelo (lt/s)	
11:22	00:00	30,9	388	11,38	30,9	210	6,18	598
11:27	00:05	30,9	388	11,38	30,8	206	6,04	593
11:32	00:10	30,9	388	11,38	30,8	206	6,04	593
11:37	00:15	30,9	388	11,38	30,8	206	6,04	593
11:42	00:20	30,9	388	11,38	30,9	210	6,18	598
11:50	00:28	30,9	388	11,38	30,8	206	6,04	593
11:58	00:36	30,9	388	11,38	30,9	210	6,18	598
12:10	00:48	28,6	254	7,45	29,9	168	4,93	422
12:15	00:53	28,7	259	7,60	29,4	149	4,37	408
12:24	01:02	28,7	259	7,60	29,3	145	4,26	404
12:30	01:08	28,7	259	7,60	29,2	141	4,15	400
12:37	01:15	28,7	259	7,60	29,2	141	4,15	400
12:45	01:23	27,5	201	5,91	19,45	0	0,00	201
12:50	01:28	27,4	197	5,78	19,45	0	0,00	197
12:58	01:36	27,6	206	6,04	19,45	0	0,00	206
13:15	01:53	27,5	201	5,91	19,45	0	0,00	201
13:30	02:08	27,2	188	5,53	19,45	0	0,00	188
13:50	02:28	27,5	201	5,91	19,45	0	0,00	201
14:10	02:48	27,5	201	5,91	19,45	0	0,00	201
14:30	03:08	27,4	197	5,78	19,45	0	0,00	197

Tabla 40. Variación de caudales de ingreso

Se tomaron 5 puntos de referencia aguas arriba del dique. Dichos puntos se tomaron sobre el centro de cada compuerta y en el centro del CM y se evaluó la variación de cota para ver la evolución de la erosión en el tiempo.

Los puntos donde se midieron las cotas a lo largo del ensayo fueron los siguientes:

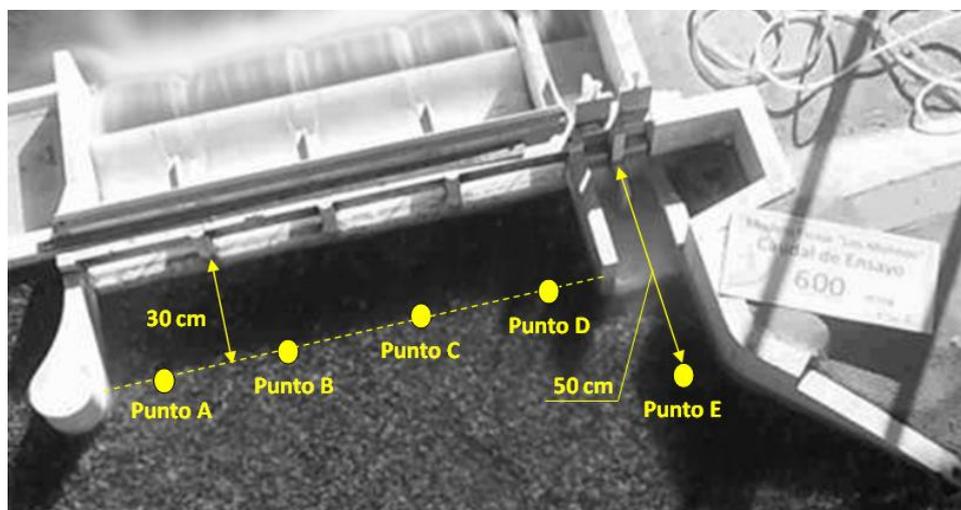


Figura 96. Puntos relevados

Las cotas relevadas en el transcurso del tiempo se pueden observar en las siguientes tablas:

Hora	Tiempo ensayo	Punto A			Punto B			Punto C		
		Medición nivel [mm]	Cota modelo [mm]	Cota prototipo [m]	Medición nivel [mm]	Cota modelo [mm]	Cota prototipo [m]	Medición nivel [mm]	Cota modelo [mm]	Cota prototipo [m]
11:22	00:00	2961	676	1372,3	2961	676	1372,3	2961	676	1372,3
11:27	00:05	2971	666	1371,7	2966	671	1372,0	2966	671	1372,0
11:32	00:10	2995	642	1370,1	2986	651	1370,7	2986	651	1370,7
11:37	00:15	3036	601	1367,5	3000	637	1369,8	2992	645	1370,3
11:42	00:20	3030	607	1367,9	3012	625	1369,0	3006	631	1369,4
11:50	00:28	3034	603	1367,6	3013	624	1369,0	3003	634	1369,6
11:58	00:36	3032	605	1367,7	3015	622	1368,8	3003	634	1369,6
12:10	00:48	3035	602	1367,5	3014	623	1368,9	2997	640	1370,0
12:15	00:53	3036	601	1367,5	3014	623	1368,9	2990	647	1370,5
12:24	01:02	3044	593	1366,9	3011	626	1369,1	2994	643	1370,2
12:30	01:08	3040	597	1367,2	3012	625	1369,0	2995	642	1370,1
12:37	01:15	3043	594	1367,0	3015	622	1368,8	2996	641	1370,1
12:45	01:23	3031	606	1367,8	3007	630	1369,4	2992	645	1370,3
12:50	01:28	3034	603	1367,6	3008	629	1369,3	3009	628	1369,2
12:58	01:36	3033	604	1367,7	3010	627	1369,2	3010	627	1369,2
13:15	01:53	3025	612	1368,2	3011	626	1369,1	3011	626	1369,1
13:30	02:08	3022	615	1368,4	3004	633	1369,5	3008	629	1369,3
13:50	02:28	3020	617	1368,5	3000	637	1369,8	3005	632	1369,5
14:10	02:48	3024	613	1368,2	2994	643	1370,2	2995	642	1370,1
14:30	03:08	3025	612	1368,2	2996	641	1370,1	2994	643	1370,2

Tabla 41: Cotas relevadas

Hora	Tiempo ensayo	Punto D			Punto E		
		Medición nivel [mm]	Cota modelo	Cota prototipo	Medición nivel [mm]	Cota modelo	Cota prototipo
11:22	00:00	2961	676	1372,3	2961	676	1372,3
11:27	00:05	2961	676	1372,3	2961	676	1372,3
11:32	00:10	2980	657	1371,1	2968	669	1371,9
11:37	00:15	2989	648	1370,5	2979	658	1371,2
11:42	00:20	2992	645	1370,3	2986	651	1370,7
11:50	00:28	2990	647	1370,5	2981	656	1371,0
11:58	00:36	2996	641	1370,1	2980	657	1371,1
12:10	00:48	2994	643	1370,2	2976	661	1371,4
12:15	00:53	3026	611	1368,1	2994	643	1370,2
12:24	01:02	3031	606	1367,8	3009	628	1369,2
12:30	01:08	3036	601	1367,5	3018	619	1368,6
12:37	01:15	3029	608	1367,9	3010	627	1369,2
12:45	01:23	3030	607	1367,9	3004	633	1369,5
12:50	01:28	3050	587	1366,6	3020	617	1368,5
12:58	01:36	3038	599	1367,3	3012	625	1369,0
13:15	01:53	3035	602	1367,5	3013	624	1369,0
13:30	02:08	3026	611	1368,1	3005	632	1369,5
13:50	02:28	3029	608	1367,9	3012	625	1369,0
14:10	02:48	3038	599	1367,3	3015	622	1368,8
14:30	03:08	3039	598	1367,3	3013	624	1369,0

Tabla 42: Cotas relevadas

A continuación, se muestran los resultados en los cinco puntos relevados en forma de gráfico:

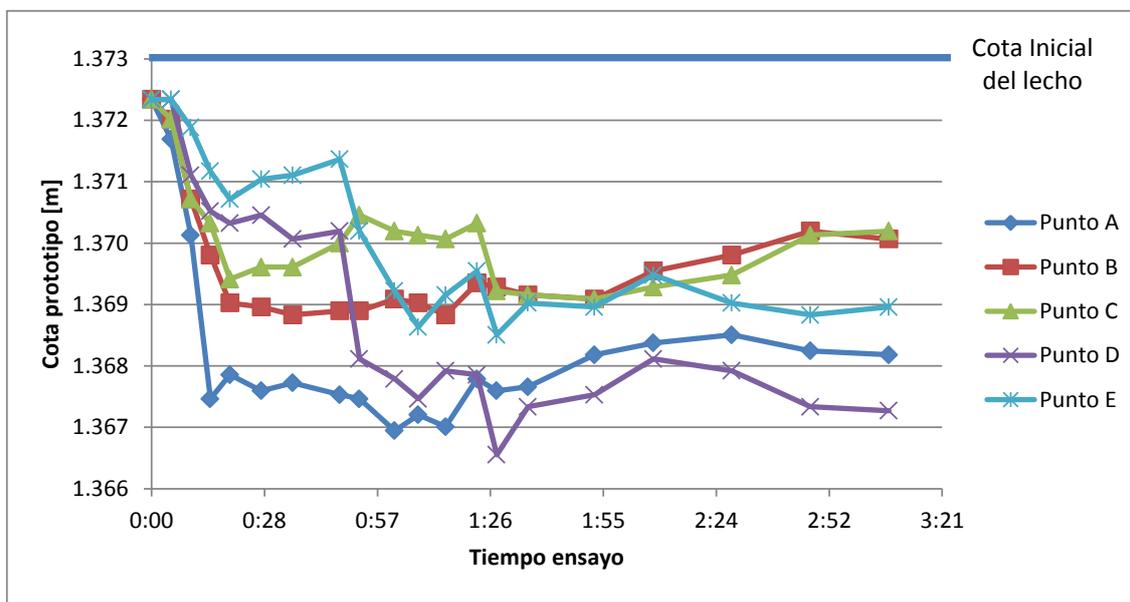


Figura 97. Variación de las cotas en el tiempo

Se observa claramente que después de la primera media hora de ensayo, los puntos se han estabilizado cuando el caudal fue de 600 m³/s y fue por ello que se prosiguió luego de este tiempo disminuyendo el caudal para ensayar con 400 m³/s.

Luego de este tiempo se observa una importante variación en los puntos D Y E al cerrar DM1 y abrir CM2; y después de 1:15 hs de ensayo se observa nuevamente que

los puntos se estabilizan. Fue por ello que se decidió a disminuir el caudal a 200 m³/s para continuar el ensayo.

Finalmente, entre las horas 1:15 y 1:30 de ensayo, vuelve a observarse una importante variación de los puntos D y E (debido al cierre de DM2 y la apertura de CM). Luego de las 3 hs de ensayo se volvieron a estabilizar los puntos por lo que se terminó el ensayo.

Si ahora, tomando los mismos 5 puntos graficamos la variación de la fosa en el tiempo se obtiene:

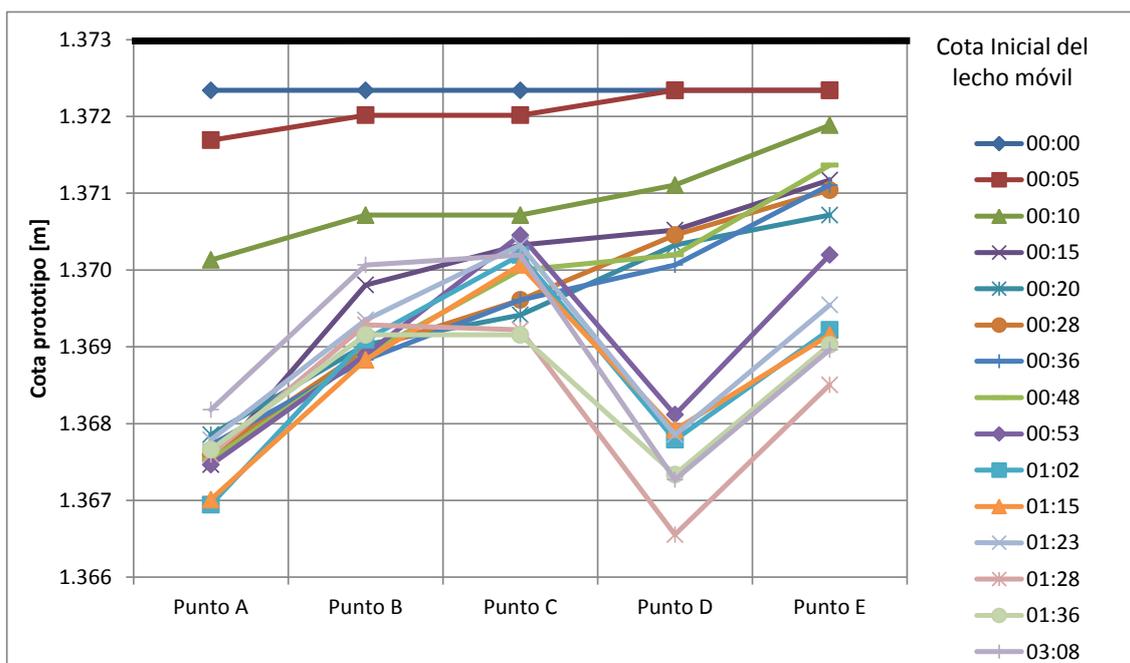


Figura 98. Variación de las cotas en el tiempo

Tal como se viene realizando en los últimos ensayos con el lecho móvil, aquí también mediante la captura de fotografías desde un punto fijo, evaluamos la evolución espacial de la fosa (Figura 99).

A continuación se muestran la secuencia de fotos capturadas:

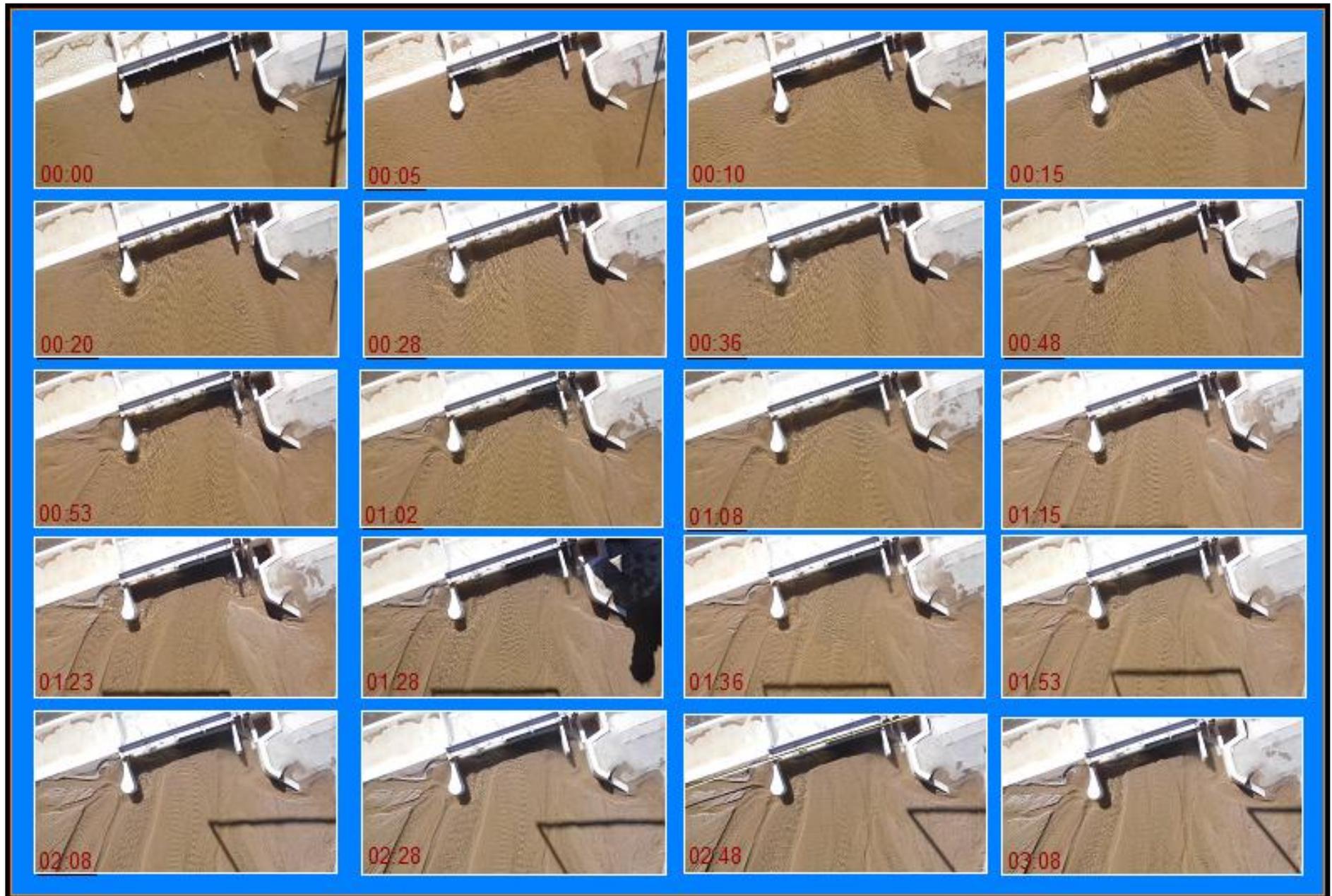


Figura 99. Variación de la erosión en el tiempo

Finalmente, luego de haber logrado la estabilización de la fosa de erosión, antes de finalizar del ensayo se relevaron más de 100 puntos en esta zona para generar una superficie digital de la misma y así poder evaluar el volumen de arena removido. Además se tomaron fotografías de la fosa final formada.

Luego de haber generado la superficie digital, es posible cuantificar a partir de ella el volumen de arena que se transportó hacia aguas abajo del dique utilizando una herramienta que nos brinda el software de cálculo.

Por otro lado, para verificar este valor, se recurrió a la tolva existente aguas abajo del dique. Partiendo de la superficie de la misma (dato conocido) y de la altura de arena almacenada allí, se cuantificó el volumen de arena removida.

Cálculo del volumen de arena removido

1) Tolva

Superficie de la tolva [m ²]	0,90
Altura arena [m]	0,19
Volumen de arena [m ³]	0,17 (A)

2) Superficie Digital del Terreno

Volumen de arena removido	Prototipo [m ³]	48.117
	Modelo [m ³]	0,18 (B)

Diferencia [m³]	0,01 (A-B)
Error [%]	5% (A-B)/max(A,B)

Tabla 43. Volumen removido

Conclusiones

Esta metodología propuesta nos proporciono importantes resultados a tener en cuenta en el análisis. Primeramente se pensaba que al abrir el canal moderador y cerrar una compuerta se podía estabilizar la fosa, pero pudimos observar que se fue formando una importante fosa en la margen derecha del dique móvil, para lo cual se deicidio cerrar la compuerta del canal moderador.

Entonces una importante conclusión en este ensayo es que el canal moderador debe ser utilizado únicamente para la limpieza de la zona de la toma, abriendo el tiempo necesario para evacuar los sedimentos de dicha zona. Así evitar la socavación en la zona de la margen derecha del dique móvil que pone en riesgo la estructura.

A continuación se puede observar la fosa final obtenida y las curvas de nivel:



Figura 100: Fosa final

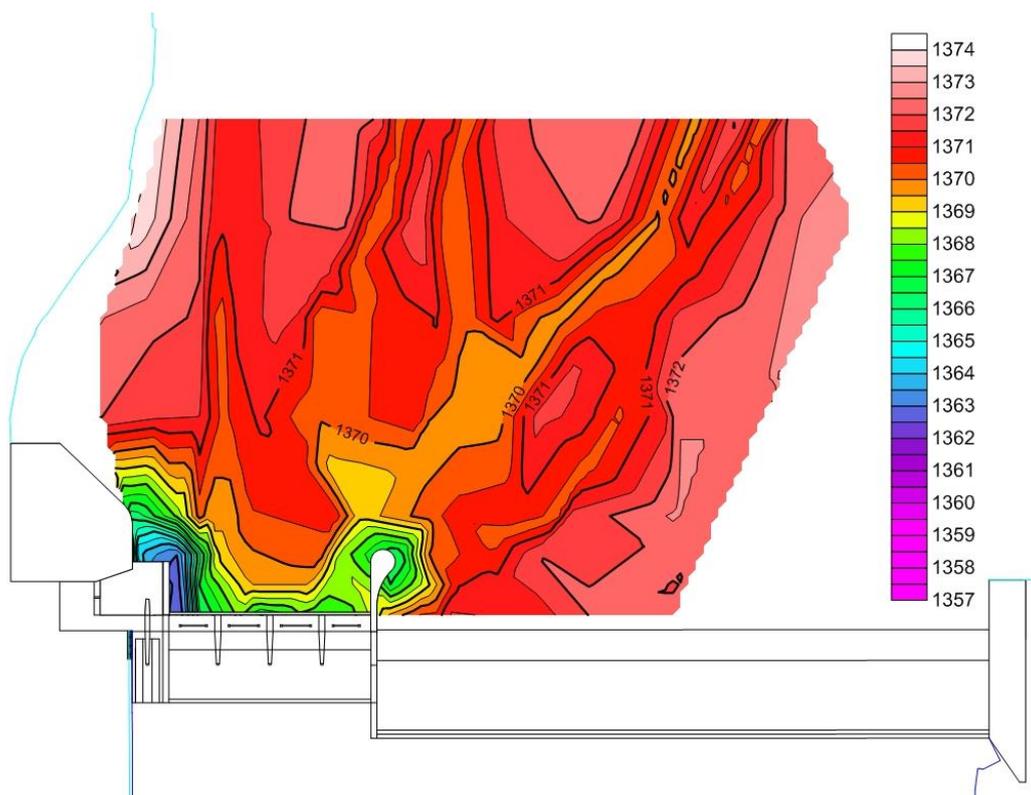


Figura 101: Curvas de nivel

Podemos apreciar la fosa formada en la margen derecha del dique móvil de aproximadamente 10 m lo cual no es aceptable para el resguardo de la estructura.

El volumen erogado fue de 0,18 m³ el cual es un volumen aceptable para lo que se desea obtener.

Cálculo del volumen de arena removido

1) Tolva

Superficie de la tolva [m ²]	0,90
Altura arena [m]	0,19
Volumen de arena [m ³]	0,17 (A)

2) Superficie Digital del Terreno

Volumen de arena removido	Prototipo [m ³]	48.117
	Modelo [m ³]	0,18 (B)

Diferencia [m³]	0,01 (A-B)
Error [%]	5% (A-B)/max(A,B)

Tabla 44: Volumen de arena removido

CAPITULO 5: CONCLUSIONES

5.1 CONCLUSIONES TÉCNICAS

- En virtud del objetivo general se contrastaron tres políticas de operación de compuertas: la propuesta por la U.N.L.P, la propuesta por el Ing. Quintana y la propuesta por la U.N.C. Resaltando que la propuesta de la U.N.C toma de las otras dos lo mas favorable optimizando así el resultado final.
- Evaluando la política de operación del Ing. Quintana, concluimos que no es recomendable esperar la crecida con todas las compuertas abiertas tanto las del canal moderador como las del dique móvil, ya que se tiene una erosión importante aguas arriba del canal moderador. En el procedimiento con compuertas cerradas concluimos que la apertura parcial de los órganos de evacuación del dique móvil deteriora los sellos inferiores y los labios metálicos de las compuertas debido al choque de las rocas en la estructura.
- De acuerdo a los estudios realizados se pudo arribar a una política de operación propuesta óptima.
- Se realizaron las distintas distribuciones de caudales aportados por los dos tributarios (Río Reyes y Rio Grande) manteniendo constante el caudal total, concluyendo que el modelo tiene una escasa sensibilidad a la capacidad de evacuación de las estructuras ante distintas configuraciones.
- Se observa que el comportamiento hidráulico de las estructuras de descarga (trabajo a pelo libre o a presión) no solo depende del caudal que evacua sino también de la condición del fondo cercano a la misma.
- Cuando el sistema funciona a pelo libre la erosión es generalizada. Se observan procesos de transporte de sedimento desde distancias lejanas aguas arriba (más de 200 m en prototipo). Mientras que si los órganos de evacuación trabajan a presión la erosión es local (solo en la zona cercana al dique) y se estabiliza en poco tiempo.
- En virtud de los resultados obtenidos resulta conveniente esperar la crecida con las compuertas abiertas para favorecer el transporte en las inmediaciones de la obra y una vez que se alcanza el pico del hidrograma, resulta recomendable, favorecer que todas las estructuras de descarga trabajen a presión, combinando las aperturas de compuertas de manera de asegurar este efecto.
- En el arribo del evento hidrológico, las compuertas trabajan a pelo libre produciendo la evacuación del sedimento del lecho desde distancias mas considerables; una vez observado el máximo caudal y en coincidencia con el receso del hidrograma, resultaría recomendable favorecer la sedimentación lo más lejos de la obra de toma posible; para lograr este efecto, es fundamental, que la estructuras de evacuación trabajen a presión conformando nuevamente un embalse hacia aguas arriba.

- Los descargadores de fondo del CM no pueden ser utilizados como estructura de descarga de caudal en forma permanente por que se han observado erosiones aguas arriba del dique. Estas estructuras (CM1 y CM2) deben abrirse durante el tiempo necesario para liberar la zona de toma de los sedimentos depositados. Posteriormente, deben cerrarse, con el objeto de resguardar la estructura de la presa, ante potenciales socavaciones extremas en la pila próxima (la que separa CM y DM).

5.2 CONCLUSIONES DE LA PRÁCTICA SUPERVISADA

El desarrollo de la practica supervisada resultó ser una gran experiencia para mi persona, ya que pude introducirme al sistema laboral satisfactoriamente y desarrollar no solamente objetivos académicos aprendidos a lo largo de la carrera, sino también formar parte de un equipo de trabajo que estuvo disponible a ayudar en todo momento, tener un trato adecuado y respetuoso sin importar el nivel académico o social ya sean doctores, ingenieros o técnicos siempre estuvieron dispuestos a colaborar ante cada situación.

Además tuve la oportunidad de aprender mucho acerca de las distintas técnicas experimentales utilizadas en el modelo, que abarcan desde la utilización de instrumentos de medición de caudales o velocidades, hasta técnicas de movimiento de arena o de nivelación del terreno que antes desconocía.

REFERENCIAS

- Díaz Lozada, José Manuel. “Descripción experimental, utilizando un modelo físico, del flujo de aproximación a la Presa Los Molinos.” - Práctica Supervisada de Carrera de Ingeniería Civil- Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – Universidad Nacional de Córdoba- Febrero 2013.
- HALCROW (2009). Informe de Avance N° 1. Dique Los Molinos, Jujuy. La Plata, Argentina.
- HALCROW (2009). Informe de Avance N° 2. Dique Los Molinos, Jujuy. La Plata, Argentina.
- Segundo Informe de Avance. “Proyecto y construcción del modelo físico tridimensional del dique derivador Los Molinos, Provincia de Jujuy” - Laboratorio de Hidráulica - Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales - Universidad Nacional de Córdoba – Noviembre 2012.
- Tercer Informe de Avance. “Proyecto y construcción del modelo físico tridimensional del dique derivador Los Molinos, Provincia de Jujuy” - Laboratorio de Hidráulica - Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales - Universidad Nacional de Córdoba – Agosto 2013.
- Universidad Nacional de La Plata (1971) – Modelo Físico Río Grande – La Plata, Argentina.
- Vaschalde, Tomás Santiago. “Caracterización hidrodinámica del flujo de ingreso a las obras de evacuación de excedentes de la Presa Los Molinos, Jujuy”. - Práctica Supervisada de Carrera de Ingeniería Civil- Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – Universidad Nacional de Córdoba- Julio 2013.