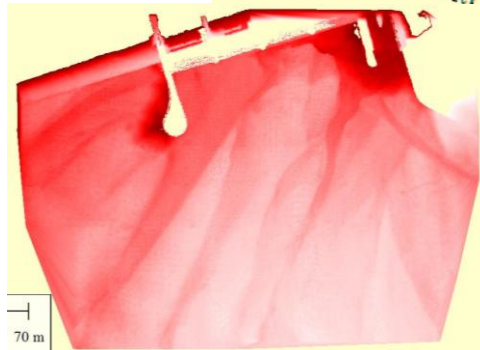
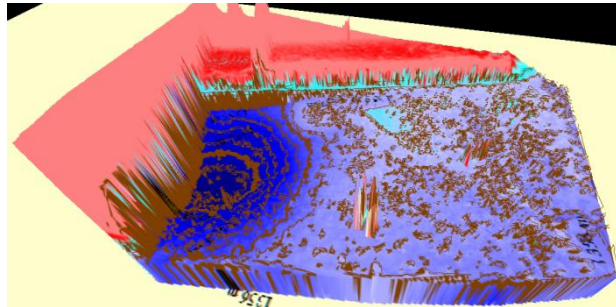


UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICA Y NATURALES
CENTRO DE ESTUDIOS Y TECNOLOGÍA DEL AGUA



PRÁCTICA SUPERVISADA

INGENIERÍA CIVIL

“Medición de erosión con técnica digital en el modelo físico del Dique Los Molinos, Jujuy”

Autor: VACA RASGIDO, José Pablo

Tutor: Mg Ing PAGOT, Mariana

Supervisor Externo: Mg Ing CORRAL, Mariano

Ing GUILLÉN, Nicolás

Año 2014

A mis viejos,

a mis abuelos que los tengo en vida y los que no pude conocer

pero los siento en el corazón.

A mi Virgen Del Valle que desde siempre me guio y cuido

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer antes que nada a mi tutora Mg. Ing. Mariana Pagot, por la buena predisposición y ese trato tan humano difícil de encontrar. A mi supervisor externo Ing. Nicolás Guillén por toda la colaboración para conmigo y así poder realizar esta práctica. Estuvieron ambos siempre presentes, me ayudaron y facilitaron en todo lo que estaba a su alcance.

También quiero agradecer al laboratorio de Hidráulica por haberme dado esta posibilidad de realizar mi trabajo final de la carrera Ingeniería Civil. Como olvidar el reconocimiento a todos los compañeros profesionales del queridísimo Laboratorio quienes me ayudaron para lograr los objetivos propuestos.

Gracias a mis padres, quienes año tras año de la carrera me apoyaron, contuvieron y festejaron mis logros tanto o más que yo. De más está decir que este título se los debo a ellos.

A mi hermano, primas/os, tías/os y amigos de mi barrio quienes siempre estuvieron pendientes de mi en todo momento. A mi queridísima Merce quien me apoyó día a día en este peregrinar y siempre con sus cariñosos abrazos y palabras me contuvo.

Gracias Nelly, muchísimas gracias por abrirme la puerta de su casa y aceptar a un desconocido que venía con el deseo de estudiar. Su casa se transformó en la mía y eso tanto mis padres como yo le vamos a estar agradecidos por el resto de nuestras vidas.

RESUMEN

En el presente Informe de Trabajo se presentan los avances y resultados alcanzados en la medición de erosiones en modelos físicos a escala reducida utilizando una nueva técnica digital. Esta técnica permitió generar en detalle mapeos tridimensionales de la superficie de interés, registrando las escenas resultantes de cada ensayo hidráulico.

En este trabajo se utilizó una cámara RGB-D, Kinect de Microsoft, la cual genera una imagen óptica y otra imagen de profundidades. Los datos de profundidades medidos y sus ubicaciones, permitieron reconstruir digitalmente la superficie erosionada con mayor resolución espacial respecto de la técnica utilizada tradicionalmente (que consiste en un relevamiento manual de puntos, utilizando un nivel óptico y una mira milimétrica).

Las mediciones de erosiones se realizaron en modelos físicos del Dique Los Molinos, de la Provincia de Jujuy. El mismo se construyó en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la UNC. Es un modelo físico tridimensional a escala 1:65 con fondo móvil. El motivo de su construcción fue la problemática que se registraba debido a la colmatación del mismo aguas arriba, favoreciendo el acarreo del material de arrastre desde ríos Grande y Reyes hacia aguas abajo produciendo erosiones locales al pie de las obras de descarga, particularmente aguas abajo del canal moderador que comprometen la estabilidad de la misma.

A raíz de esta problemática y en el marco de una licitación, la empresa Benito Roggio e Hijos S.A. tiene como tareas la reparación del dique y tomar medidas para evitar que los procesos de tarquinamiento continúen. Para realizar este proyecto ha trabajado desde el año 2012, en forma conjunta con el Laboratorio de Hidráulica de la FCEfYN de la UNC.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I- MARCO DE REFERENCIA	8
1.1 INTRODUCCIÓN.....	8
1.2 LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL DIQUE LOS MOLINOS	8
1.3 PROBLEMÁTICA DE LA OBRA	10
1.4 JUSTIFICACIÓN DEL PRESENTE TRABAJO DE PRÁCTICA SUPERVISADA	13
1.5 OBJETIVOS PARTICULARES PLANTEADOS PARA EL PRESENTE TRABAJO	13
1.6 MODELO FÍSICO “LOS MOLINOS”	14
1.7 METODOLOGÍA DE ENSAYO.	20
1.7.1 Actividades a realizar el día anterior al ensayo	20
1.7.2 Actividades a realizar durante el ensayo.....	21
1.7.3 Actividades a realizar durante el proceso de apagado del modelo.....	21
CAPÍTULO II: ANÁLISIS DE LOS DATOS DE PROFUNDIDAD DEL SENSOR KINECT	23
2 METODOLOGÍA DE TRABAJO CON EL USO DE LA CÁMARA RGB-D	23
2.1 CÁMARA RGB-D.....	23
2.2 PROCEDIMIENTO IMPLEMENTADO	23
2.3 ANÁLISIS DE LA PRECISIÓN DE LAS MEDICIONES DE EROSIÓN CON LA CÁMARA RGB-D	25
2.4 ENFOQUE TEÓRICO	25
2.5 MODELO MATEMÁTICO	26
2.6 CALIBRACIÓN	28
2.7 PRECISIÓN DE PROFUNDIDAD Y DENSIDAD DE PUNTOS.....	29
2.8 FUENTES DE ERROR	29
2.9 IMAGEN CON FALLA DE ILUMINACIÓN.....	30
2.10 DENSIDAD DE PUNTOS.....	30
2.11 LINEALIDAD	31
2.12 EXACTITUD Y PRECISIÓN.....	34
2.13 RESOLUCIÓN ESPACIAL	34
2.14 IRREGULARIDAD DE LOS BORDES.....	36
2.15 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS ALCANZADOS	36
CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE LAS EROSIONES AGUAS ABAJO DEL CANAL MODERADOR	39
3 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	39
3.1 CURVAS CARACTERÍSTICAS DEL CANAL MODERADOR: RELACIÓN H-Q.....	39
3.1.1 Definición de las Curvas H – Q.....	40
3.1.2 Definición de las Curvas de despegue (D – Q).....	42
3.1.3 Comparación de perfiles del salto esquí	43
3.1.4 Definición de la velocidad en el salto esquí.....	44
3.2 ANÁLISIS DE EROSIÓN.....	45

3.2.1	Caudal de 15 m ³ /s	46
3.2.2	Caudal de 30 m ³ /s	49
3.3	CAUDAL DE 50 M ³ /S	52
3.3.1	Caudal de 75 m ³ /s	55
3.3.2	Caudal de 100 m ³ /s	58
3.3.3	Caudal de 150 m ³ /s	61
3.4	PERFILES DE LAS FOSAS DE EROSIÓN	64
3.5	RESUMEN DE LOS PRINCIPALES RESULTADOS OBTENIDOS	67
 CAPITULO IV: CONTROL DE ESTRUCTURAS DEL DIQUE Y MEDICIÓN DE FORMAS DE FONDO.....		71
4	INTRODUCCIÓN	71
4.1	CONTROL DE ESTRUCTURAS DEL DIQUE	71
4.2	MEDICIÓN DE FORMAS DE FONDO	72
5	CONCLUSIONES.....	77
6	BIBLIOGRAFÍA	78

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1. Localización del Dique Los Molinos. Imagen de base Google earth.*
- Figura 2. Esquema en planta de la construcción (Halcrow, 2010).*
- Figura 3. Fotografía de la presa con sus elementos componentes.*
- Figura 4. Tarquinamiento Dique Fijo*
- Figura 5. Erosión en el perfil del vertedero del Dique Fijo*
- Figura 6. Erosión en el perfil del vertedero del Canal Moderador (CM)*
- Figura 7. Falta de mantenimiento. Problema en las juntas del Dique Móvil (DM).*
- Figura 8: Modelo Físico “Los Molinos” construido en el Laboratorio de Hidráulica de la FCEfyN-UNC.*
- Figura 9: Modelo Físico “Los Molinos”. Obras de regulación.*
- Figura 10. Guía soporte para la cámara RGB-D (LH, 2012 y Bellino, 2013).*
- Figura 11: Cámara de aforo del modelo físico.*
- Figura 12: Cámara de carga del río Reyes.*
- Figura 13. Cámara de ingreso del río Grande*
- Figura 14: Compuerta rebatible.*
- Figura 15: Tanque Volumétrico.*
- Figura 16: Desarenador.*
- Figura 17: Esquema en planta del recorrido del agua en el modelo.*
- Figura 18: Cámara RGB-D Kinect Microsoft. (Adaptado de Wikipedia, 2012).*
- Figura 19: Etapas en la generación del mapeo 3D con cámara RGB-D. (Sanchez Aimar, 2013)*
- Figura 20. Objeto patrón capturado con Kinect. Izquierda: imagen infrarroja y patrón de puntos proyectados sobre el objeto. Derecha: imagen de la profundidad resultante.*
- Figura 21. Representación esquemática de la relación entre la profundidad y la disparidad.*
- Figura 22. Grilla para calibración y detalle del cuadrante tipo.*
- Figura 23. Disposición de los elementos en el ensayo.*
- Figura 24. Esquema de estimación de profundidad con Kinect.*
- Figura 25. Imagen capturada con Kinect de una superficie plana ubicada a 500 mm del sensor.*
- Figura 26. Detalle de la grilla ubicada a 500 mm del sensor Kinect.*
- Figura 27. Análisis de la linealidad de las mediciones. Profundidad del sensor medido digitalmente a distancias definidas.*
- Figura 28. Proyección de puntos sobre cuadrante*
- Figura 29. Resolución espacial en función de la distancia*
- Figura 30. Análisis de objetos con forma conocida. Superficie cuadrada en color azul.*
- Figura 31: Ubicación de las escalas milimétricas para medir H en DM y CM.*
- Figura 32: Corte esquemático del canal moderador.*
- Figura 33: Curva $H - Q$ del CM. H = altura del nivel de agua medida sobre la margen derecha de DM y CM.*
- Figura 34: Curva $H - Q$ de CM1. H = altura del nivel de agua medida sobre la margen derecha de DM y CM.*
- Figura 35: Curva $H - Q$ de CM2. H = altura del nivel de agua medida sobre la margen derecha de DM y CM.*
- Figura 36: Curva $D - Q$ del CM.*
- Figura 37: Curva $D - Q$ de CM1.*
- Figura 38: Curva $D - Q$ de CM2.*
- Figura 39: Comparación de alternativas de perfil del salto esquí. Curvas $D - Q$ de CM1.*
- Figura 40: Comparación de alternativas de perfil del salto esquí. Curvas $D - Q$ de CM2.*

- Figura 41: Velocidad de despegue en el salto esquí del CM para distintos caudales.
- Figura 42: Punto crítico donde se produce la mayor erosión aguas arriba del CM.
- Figura 43: Funcionamiento del Canal Moderador con $Q=15 \text{ m}^3/\text{s}$
- Figura 44: Detalle de zona aguas arriba de la obra con $Q=15 \text{ m}^3/\text{s}$
- Figura 45: Detalle de zona aguas abajo de la obra con $Q=15 \text{ m}^3/\text{s}$
- Figura 46: Variación de la cota mínima durante el ensayo – $Q=15 \text{ m}^3/\text{s}$
- Figura 47: Fosa de erosión relevada con técnica tradicional - $Q=15 \text{ m}^3/\text{s}$
- Figura 48: Fosa de erosión relevada con la técnica digital - $Q=15 \text{ m}^3/\text{s}$
- Figura 49: Funcionamiento del Canal Moderador con $Q=30 \text{ m}^3/\text{s}$
- Figura 50: Detalle de zona aguas arriba de la obra con $Q=30 \text{ m}^3/\text{s}$
- Figura 51: Variación de la cota mínima durante el ensayo – $Q=30 \text{ m}^3/\text{s}$
- Figura 52: Detalle de zona aguas abajo de la obra con $Q=30 \text{ m}^3/\text{s}$
- Figura 53: Fosa de erosión aguas abajo de CM con $Q=30 \text{ m}^3/\text{s}$
- Figura 54: Fosa de erosión construida a partir de puntos relevados con nivel óptico - $Q=30 \text{ m}^3/\text{s}$
- Figura 55: Fosa de erosión construida a partir de puntos relevados con cámara Kinect - $Q=30 \text{ m}^3/\text{s}$
- Figura 56: Funcionamiento del Canal Moderador con $Q=50 \text{ m}^3/\text{s}$
- Figura 57: Detalle de zona aguas arriba de la obra con $Q=50 \text{ m}^3/\text{s}$
- Figura 58: Variación de la cota mínima durante el ensayo – $Q=50 \text{ m}^3/\text{s}$
- Figura 59: Fosa de erosión aguas abajo de CM con $Q=50 \text{ m}^3/\text{s}$
- Figura 60: Fosa de erosión construida a partir de puntos relevados con técnica tradicional - $Q=50 \text{ m}^3/\text{s}$
- Figura 61: Fosa de erosión construida a partir de puntos relevados con técnica digital - $Q=50 \text{ m}^3/\text{s}$
- Figura 62: Funcionamiento del Canal Moderador con $Q=75 \text{ m}^3/\text{s}$
- Figura 63: Detalle de zona aguas arriba de la obra con $Q=75 \text{ m}^3/\text{s}$
- Figura 64: Variación de la cota mínima durante el ensayo – $Q=75 \text{ m}^3/\text{s}$
- Figura 65: Fosa de erosión aguas abajo de CM con $Q=75 \text{ m}^3/\text{s}$
- Figura 66: Fosa de erosión construida a partir de puntos relevados con técnica tradicional - $Q=75 \text{ m}^3/\text{s}$
- Figura 67: Fosa de erosión construida a partir de puntos relevados con técnica digital - $Q=75 \text{ m}^3/\text{s}$
- Figura 68: Funcionamiento del Canal Moderador con $Q=100 \text{ m}^3/\text{s}$
- Figura 69: Detalle de zona aguas arriba de la obra con $Q=100 \text{ m}^3/\text{s}$
- Figura 70: Variación de la cota mínima durante el ensayo – $Q=100 \text{ m}^3/\text{s}$
- Figura 71: Fosa de erosión aguas abajo de CM con $Q=100 \text{ m}^3/\text{s}$
- Figura 72: Fosa de erosión construida a partir de puntos relevados con técnica tradicional - $Q=100 \text{ m}^3/\text{s}$
- Figura 73: Fosa de erosión construida a partir de puntos relevados con técnica digital - $Q=100 \text{ m}^3/\text{s}$
- Figura 74: Funcionamiento del Canal Moderador con $Q=150 \text{ m}^3/\text{s}$
- Figura 75: Detalle de zona aguas arriba de la obra con $Q=150 \text{ m}^3/\text{s}$
- Figura 76: Variación de la cota mínima durante el ensayo – $Q=150 \text{ m}^3/\text{s}$
- Figura 77: Fosa de erosión aguas debajo de CM con $Q=150 \text{ m}^3/\text{s}$
- Figura 78: Fosa de erosión construida a partir de puntos relevados con técnica tradicional - $Q=150 \text{ m}^3/\text{s}$
- Figura 79: Fosa de erosión construida a partir de puntos relevados con técnica digital - $Q=150 \text{ m}^3/\text{s}$
- Figura 80: Ubicación de los perfiles de la fosa de erosión relevados para los distintos ensayos.
- Figura 81: Perfil 1 de los diferentes ensayos realizados.
- Figura 82: Perfil 2 de los diferentes ensayos realizados con técnica tradicional.
- Figura 83: Perfil 2 de los diferentes ensayos realizados con técnica digital.
- Figura 84: Perfil 4 de los diferentes ensayos realizados con técnica tradicional
- Figura 85: Perfil 4 de los diferentes ensayos realizados con técnica digital
- Figura 86: Ubicación de las cotas mínimas relevadas en los diferentes ensayos

Figura 87. Área aguas arriba del dique móvil. Modelo digital de elevaciones

Figura 88. Corte A-A

Figura 89. Corte B-B

Figura 90. Corte C-C

Figura 91. Área aguas arriba del dique móvil. Imagen RGB

Figura 92. DEM generado por sensor KINECT

Figura 93. DEM generado utilizando interpolación a partir de los puntos medidos con nivel óptico

Figura 94. Superposición de DEM

Figura 95. Perfil transversal A-A

Figura 96. Perfil transversal B-B

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Parámetros de calibración de la cámara infrarroja

Tabla 2. Calibración sensor Kinect. Distancia medida manual y digitalmente.

Tabla 3. Análisis de la exactitud de la mediciones con con Kinect.

Tabla 4. Análisis de la resolución del sensor Kinect con respecto a la distancia.

Tabla 5: Resumen de los ensayos realizados con técnica tradicional.

Tabla 6. : Resumen de los ensayos realizados con técnica digital.

Tabla 7. Cota mínima de erosión aguas abajo de CM [m]

Tabla 8 Distancia donde ocurre la cota mínima desde el pie del CM [m]

CAPÍTULO I:

MARCO DE REFERENCIA

CAPÍTULO I- MARCO DE REFERENCIA

1.1 INTRODUCCIÓN

En el presente Informe de Trabajo se presentan los avances y resultados alcanzados en la medición de erosiones en modelos físicos a escala reducida utilizando una nueva técnica digital. Esta técnica permite generar en detalle mapeos tridimensionales de la superficie de interés, registrando las escenas resultantes de cada ensayo hidráulico.

En este trabajo se utilizó una cámara RGB-D, Kinect de Microsoft, la cual genera una imagen óptica y otra imagen de profundidades. Los datos de profundidades medidos y sus ubicaciones, permiten reconstruir digitalmente la superficie erosionada con mayor precisión respecto de la técnica utilizada tradicionalmente (que consiste en un relevamiento manual de puntos, utilizando un nivel óptico y una mira milimétrica).

Se realizarán ensayos hidráulicos para evaluar dos aspectos. El primero se relevará en detalle las formas de fondo generadas aguas arriba de las obras de control, frente a las condiciones propuestas de políticas de operación de las mismas. En segundo lugar, se evaluarán las cotas de máximas erosiones bajo caudales frecuentes analizando una nueva alternativa de perfil de salida del Canal Moderador, del Dique los Molinos. Ambos ensayos se realizarán sin aportes de sedimentos.

Para ello se utilizó el modelo físico “Los Molinos” construido, durante el año 2012, en las instalaciones del Laboratorio de Hidráulica (LH) de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales (FCEFyN) de la Universidad Nacional de Córdoba (UNC).

1.2 Localización y descripción del dique Los Molinos

(Adaptado de Marassa, 2013)

El dique Los Molinos está ubicado en la provincia de Jujuy a pocos kilómetros de su Capital, San Salvador de Jujuy. Se encuentra sobre el Río Grande aproximadamente a 3 Km aguas abajo de la confluencia con el Río Reyes. En la imagen satelital (**Figura 1**), se puede observar la ubicación del mismo.

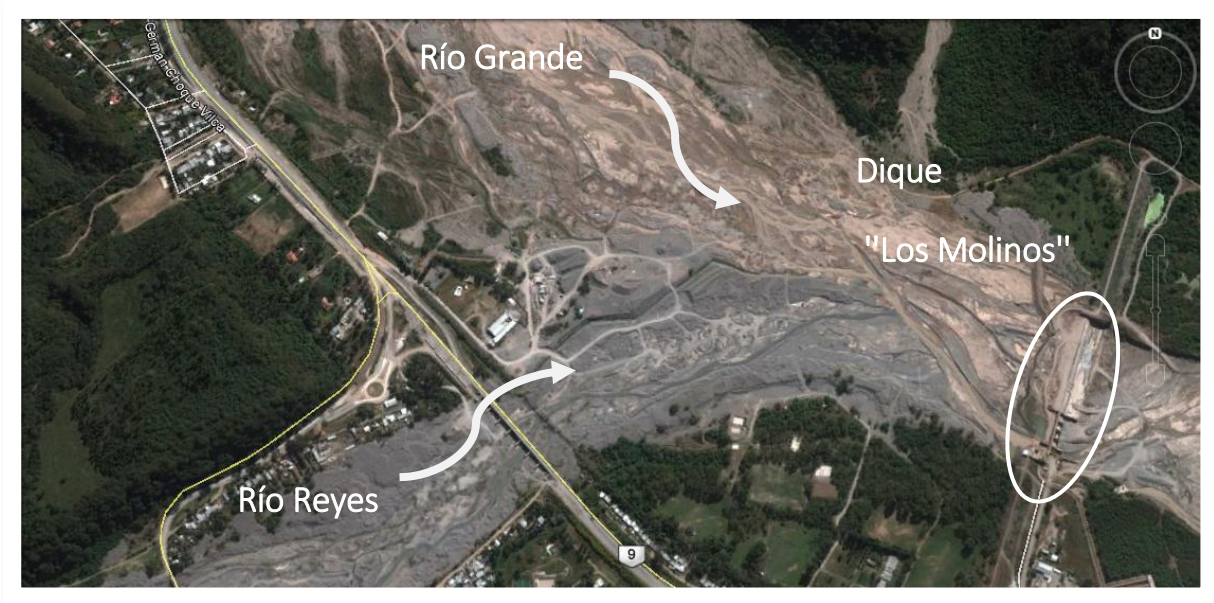


Figura 1. Localización del Dique Los Molinos. Imagen de base Google earth.

El objetivo del dique, principalmente, es proporcionar carga para derivar el agua hacia un canal de riego el cual alimenta al dique "Las Maderas" y "La Ciénaga". Para ello se puede derivar hasta un máximo de $25 \text{ m}^3/\text{s}$ a través de una toma de agua ubicada sobre la margen derecha del dique.

El conjunto de la obra de presa está constituido, desde margen izquierda hacia margen derecha (Figura 3), por:

- Terraplén de materiales sueltos sobre margen izquierda de 340 metros de longitud y 13 metros de altura (TMI).
- Una obra principal de 280 metros de longitud, formada por tres partes:
 - Un Dique Fijo (DF), de perfil a lámina adherente, de 200 metros de longitud, con una cota de umbral de 1373 msnm.
 - Un dique Móvil (DM) de 70 metros de longitud, integrado por cuatro vanos de 15 metros de longitud cada uno, con umbrales a cota 1369 msnm. Los vanos pueden ser cerrador por compuertas de sector de 3 metros de radio.
 - Un Canal Moderador (CM) de 10 metros de ancho, cuya cota de umbral es 1365,4 msnm.
- Una obra de toma, ubicada sobre la margen derecha de la presa, unos pocos metros antes de la entrada del Canal Moderador (CM).
- Un terraplén de materiales sueltos sobre margen derecha (TMD), de 440 metros de longitud y 12 metros de altura.

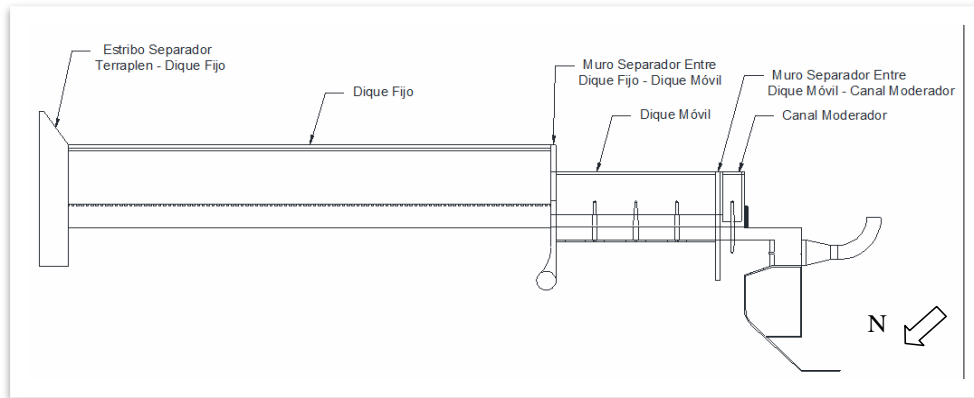


Figura 2. Esquema en planta de la construcción (Halcrow, 2010).

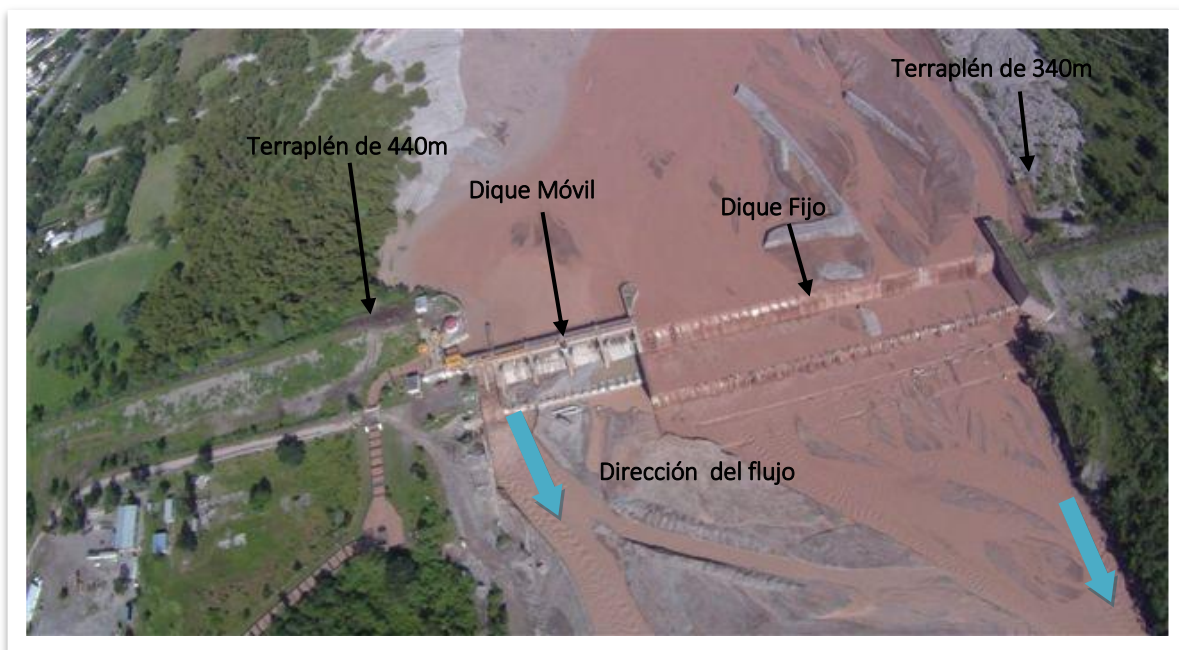


Figura 3. Fotografía de la presa con sus elementos componentes.

1.3 Problemática de la obra

El Dique Los Molinos actualmente presenta los siguientes problemas:

- Sedimentación y tarquinamiento aguas arriba de la presa, debido al gran acarreo de materiales transportados por el río (**Figura 4**).
- Erosión generalizada del lecho aguas abajo de la presa, lo cual hace que peligre su estabilidad (**Figura 5**).
- Debido a la colmatación de la presa comenzó a generarse aporte de materiales desde aguas arriba hacia aguas abajo, esto generó una gran abrasión en el perfil del vertedero y pileta de aquietamiento del dique fijo, cresta del vertedero del dique móvil y dientes disipadores.
- Erosiones locales importantes aguas abajo de las obras de descarga, particularmente aguas abajo del canal moderador. Estas erosiones a pie de presa comprometen la estabilidad de la misma (**Figura 6**).

- 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 (Figura 7)



Figura 4. Tarquinamiento Dique Fijo



Figura 5. Erosión en el perfil del vertedero del Dique Fijo



Figura 6. Erosión en el perfil del vertedero del Canal Moderador (CM)



Figura 7. Falta de mantenimiento. Problema en las juntas del Dique Móvil (DM).

En función de estas problemáticas se plantearon los siguientes objetivos generales sobre los que se solicitó la construcción del modelo fueron:

1. Verificar las capacidades hidráulicas de evacuación de las estructuras de control: conformadas por el Dique Fijo, el Dique Móvil y el Canal de limpieza o Canal Moderador, definiendo sus límites operativos de descarga. Esta evaluación se llevara a cabo en todo el rango operativo de las obras.

2. Verificar las condiciones de disipación de energía, de las estructuras de control dispuestas en los distintos sectores de la obra.
3. Analizar y cuantificar las erosiones, aguas abajo de las estructuras de descarga a los fines de constatar el funcionamiento de las obras proyectadas. Esta evaluación se llevara a cabo para diferentes escenarios hidrológicos de diseño.
4. Verificar y optimizar las consignas de operación de las estructuras de control (compuestas), a los fines de regular los procesos hidrosedimentológicos presentes en las proximidades de la presa para disminuir la sedimentación aguas arriba y permitir el paso de los sedimentos a través de las estructuras de control.
5. Determinar la distribución del flujo de aproximación a las obras de descarga a los fines de conocer el comportamiento del flujo frente a diferentes escenarios hidrológicos.

1.4 Justificación del presente trabajo de Práctica Supervisada

La medición de las erosiones en modelos físicos a fondo móvil y escala reducida se realiza tradicionalmente utilizando un nivel óptico y una mira milimétrica. Esta técnica consiste en el relevamiento manual de puntos, generalmente distribuidos sobre una grilla equidistante. Los aspectos negativos de esta metodología son: la forma de medición, en la cual es necesario apoyarse sobre la superficie a relevar para medir el dato de interés y el tiempo que demanda relevar en detalle el área en estudio, incrementándose cuando dicha superficie es extensa, cuando la cantidad de ensayos hidrosedimentológicos son numerosos y cuando se requiere de una alta resolución espacial. La metodología tradicional, además de tener un carácter intrusivo, presenta errores intrínsecos generados por la intervención humana y restricciones relativas a los instrumentos de medición, estos errores pueden alcanzar el centímetro. Otras fuentes de error están relacionadas con la incorrecta verticalidad de la mira, el apoyo de la mira sobre el modelo (lo que puede alterar la superficie a medir), errores en las lecturas y/o transcripción de las mismas, entre otros.

Por otro lado, la precisión de los productos derivados (curvas de nivel, modelos tridimensionales (3D), perfiles transversales, etc.) y el análisis de dichos productos, se verán afectados por la densidad espacial de puntos relevados y la elección de los mismos.

Para salvar estos problemas, se propone aplicar la nueva técnica digital, con la cual el registro de datos se mide en forma remota. Esta técnica brinda un mayor detalle del área en estudio e involucra menor tiempo de medición, respecto de la técnica tradicional.

1.5 Objetivos particulares planteados para el presente trabajo

En el presente trabajo se plantearon los siguientes objetivos particulares:

1. Determinar las formas de fondo conformadas aguas arriba de las obras de descarga con el fin de conocer el comportamiento del flujo frente a un escenario hidrológico de $600 \text{ m}^3/\text{s}$ de caudal en prototipo.
2. Analizar y cuantificar las erosiones, aguas abajo de la estructura de descarga del Canal Moderador a los fines de constatar el funcionamiento del perfil de salida proyectado. Esta evaluación se llevara a cabo para 5 escenarios hidrológicos de diseño correspondiente a caudales entre 15 y $150 \text{ m}^3/\text{s}$ en prototipo.
3. Analizar las mediciones de erosiones resultantes utilizando la técnica tradicional y técnica digital empleada.

1.6 Modelo Físico “Los Molinos”

Las mediciones de erosiones se realizaron sobre el modelo físico tridimensional del Dique Los Molinos emplazado sobre el río Grande, en la provincia de Jujuy. Este modelo fue construido con similitud de Froude, a escala 1:65 con fondo mixto no distorsionado, en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, de la Universidad Nacional de Córdoba. (Laboratorio de Hidráulica, 2012 y Eder, 2012)

En el modelo construido, las fuerzas que gobiernan el flujo a pelo libre son las gravitacionales.

Este modelo físico ocupa una superficie de 258 m^2 , que en prototipo representa un área total de $1,10 \text{ km}^2$. En la **Figura 8** se presenta una vista general del mismo.

El modelo físico representa todas las estructuras presentes en el cuerpo del dique, incluyendo entre otras, los cierres y las tres estructuras de control (dique móvil, dique fijo, y canal moderador), conjuntamente con sus respectivos órganos de regulación (compuerta radial, 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.

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.



Figura 8: Modelo Físico “Los Molinos” construido en el Laboratorio de Hidráulica de la FCEyN-UNC.

Como se mencionó, se modelaron las obras de regulación, con todos sus componentes y elementos auxiliares de relevancia hidrosedimentológica presentados con detalle en la **Figura 9**. Estas características permiten analizar adecuadamente la morfodinámica del flujo en cercanías de las obras.

Sobre la zona de interés del modelo físico, se construyó una plataforma deslizante (**Figura 10**) que posibilita realizar las mediciones de erosión, entre otras variables. Sus componentes principales fueron:

- Una plataforma que puede ser trasladada para observar distintas áreas del modelo.
- Una guía-riel y un carro-soporte para trasladar, específicamente la cámara Kinect. (Bellino, 2013). En la Figura 10, las flechas indican el sentido de desplazamiento posible de la plataforma y de la cámara RGB-D sobre la guía soporte.

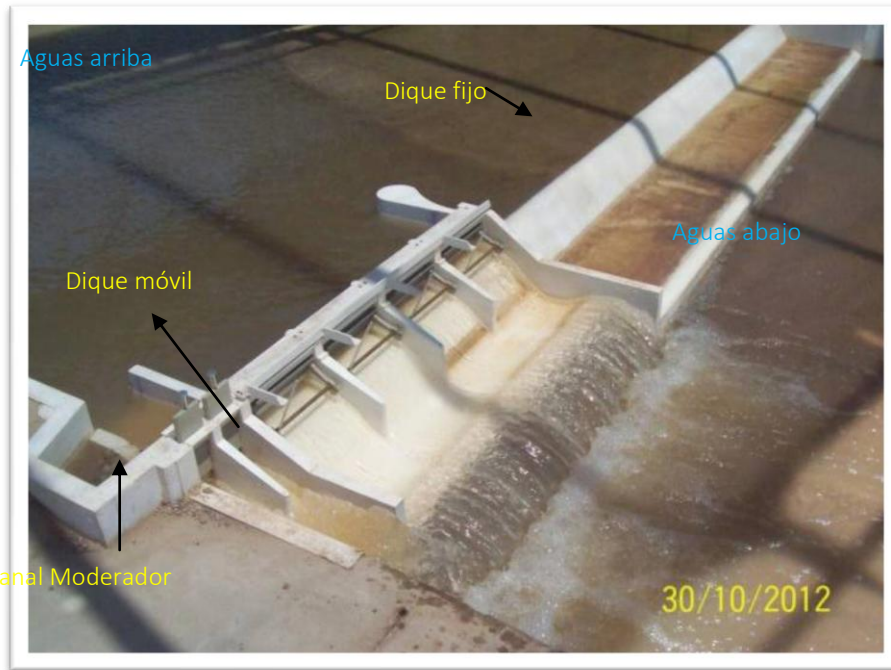


Figura 9: Modelo Físico “Los Molinos”. Obras de regulación.



Figura 10. Guía soporte para la cámara RGB-D (LH, 2012 y Bellino, 2013).

Los elementos que componen el modelo, en orden de circulación del agua son:

- ✚ **Cisterna:** se encuentra dentro de las instalaciones del Laboratorio de Hidráulica, es de forma anular y tiene una capacidad de almacenamiento de 65 m^3 .
- ✚ **Bombas tipo flight:** el laboratorio posee dos bombas, de tipo centrífuga y sumergible; tienen una capacidad teórica de bombeo de 70 lts/s. 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 (Río Reyes y Río Grande). En la **Figura 11** se puede observar el vertedero triangular que nos permite regular el caudal que circulara por cada río.



Figura 11: Cámara de aforo del modelo físico.

- + **Cámara de Carga:** Los elementos antes mencionados sirven tanto para el modelo bajo estudio como para el modelo del río Suquia que está dispuesto al lado. Para seleccionar hacia cual de los dos modelos se dirigirá el agua se construyó estas cámaras que permiten derivar el caudal mediante compuertas.

En la **Figura 12** se puede observar la cámara de carga del río Reyes. Mediante la compuerta que se observa se puede derivar el caudal hacia el modelo del río Suquia si dicha compuerta está abierta o alimentar al río Reyes al estar cerrada.



Figura 12: Cámara de carga del río Reyes.

- + **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 linealmente que proviene de las cámaras de carga, para simular las condiciones hidrológicas reales (Ver **Figura 13**).



Figura 13. Cámara de ingreso del río Grande

- ✚ **Obra de Cierre:** está constituida por márgenes de derecha a izquierda, dique fijo (DF), dique móvil (DM), canal moderador (CM) y obra de toma (ver **Figura 9**).
- ✚ **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 (ver **Figura 14**)



Figura 14: Compuerta rebatible.

- ✚ **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 (ver **Figura 15**).



Figura 15: Tanque Volumétrico.

- ✚ **Sedimentador o Desarenador:** espacio donde al agua sedimenta el arena erosionada en los tramos de fondo móvil; luego la conduce, a través del retorno, a la cisterna para luego volver a comenzar el ciclo (ver Figura 16).

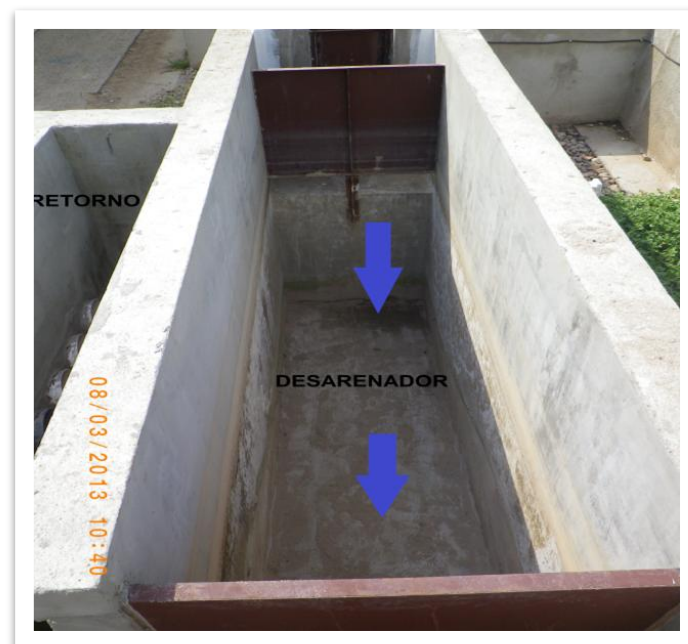


Figura 16: Desarenador.

En la **Figura 17** se puede observar el recorrido del agua desde la cisterna hasta el desarenador y de regreso a la misma. Las flechas indican el recorrido del agua. Desde las cámaras de carga el agua se conduce hacia las cámaras de ingreso mediante tuberías enterradas que pasan por debajo del modelo físico.

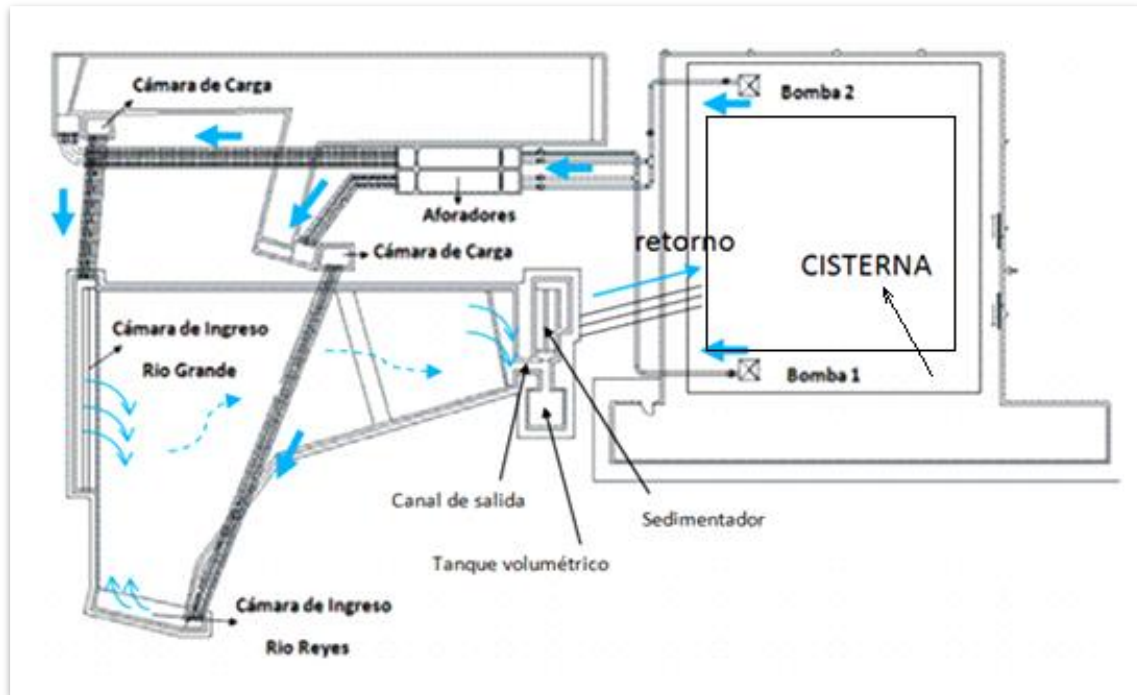


Figura 17: Esquema en planta del recorrido del agua en el modelo.

1.7 Metodología de ensayo.

Se ha definido un protocolo de trabajo para organizar las actividades previas y posteriores a los diversos ensayos que se realizaron en el modelo y que se presentan en este trabajo. Las actividades se enumeran a continuación.

1.7.1 Actividades a realizar el día anterior al ensayo

Las actividades que se describen a continuación, son principalmente de asegurar el volumen de agua necesario para operar el modelo y realizar los ensayos.

1. Verificar el nivel de cisterna (debe encontrarse en su nivel máximo).
2. Llenar tanques volumétricos (el del modelo Dique Los Molinos y el del modelo Presa Los Monos, que se encuentra en el interior del Laboratorio de Hidráulica) para asegurar el volumen de agua necesario para la operación.
3. Verificar niveles de canales de aforos, deben estar llenos.
4. Verificar cámaras de carga (se deben llenar y verificar que la configuración de las compuertas sea la indicada para su funcionamiento).
5. Verificar que las dos cámaras de ingreso estén llenas.
6. Verificar con el nivel óptico la configuración del lecho móvil aguas arriba y aguas abajo, en función de lo que se quiere medir. Más adelante se verá el procedimiento de los ensayos y cuál es el objetivo de los mismos pero se puede adelantar que para que los resultados de los diversos ensayos sean comparables entre si las condiciones iniciales deben ser las mismas.

1.7.2 Actividades a realizar durante el ensayo

A continuación se enumeran los pasos a seguir para poner en funcionamiento el modelo.

1. Encender bombas centrífugas del laboratorio con retornos abiertos y válvulas de paso al modelo cerrado (si el caudal a ensayar en el modelo es menor a 60 lts/s, se utiliza una sola bomba).
2. Empezar a abrir las válvulas de paso a las cámaras aforadoras en forma convenientemente al caudal necesario.
3. Abrir la válvula intermedia y después comenzar a cerrar el retorno (la válvula intermedia se ubican en el interior del laboratorio).
4. Abrir las dos compuertas para que el caudal fluya hacia el modelo del Río Suquia
5. Establecer los caudales requeridos en ambos aforadores regulando válvulas y retornos.
6. Cambiar configuración de compuertas en cámaras de cargas para que al agua fluya por el modelo de Los Molinos
7. Abrir la compuerta aguas abajo hacia la cisterna.
8. Realizar las mediciones requeridas en el experimento.

1.7.3 Actividades a realizar durante el proceso de apagado del modelo

Estas actividades buscan sacar la mayor cantidad de agua del modelo llevándola nuevamente a la cisterna.

1. Llenar tanque volumétrico.
2. Abrir las compuertas para que el caudal fluya hacia el otro modelo existente en el Laboratorio de Hidráulica (Río Suquia.)
3. Abrir retornos de las bombas y cerrar válvulas intermedias.
4. Cerrar válvulas de paso al modelo.
5. Apagar bombas centrífugas.
6. Bajar compuerta rebatible para desagotar región de aguas abajo; para evaluar experimentalmente la erosión.

CAPITULO II

ANÁLISIS DE LOS DATOS DE PROFUNDIDAD DEL SENSOR KINECT

CAPITULO II: ANALISIS DE LOS DATOS DE PROFUNDIDAD DEL SENSOR KINECT

2 Metodología de trabajo con el uso de la cámara RGB-D

2.1 Cámara RGB-D

El sensor Microsoft Kinect (Microsoft, 2010), inicialmente diseñado para la consola de juegos Microsoft Xbox 360, está compuesto por una cámara RGB (siglas en inglés de Rojo, Verde, Azul), un sensor de profundidad (D), un conjunto de micrófonos y un mecanismo de inclinación motorizado. (Figura 18: Cámara RGB-D Kinect Microsoft. (Adaptado de Wikipedia, 2012).)



Figura 18: Cámara RGB-D Kinect Microsoft. (Adaptado de Wikipedia, 2012).

La cámara RGB (R: *Red*, G: *Green*, B: *Blue*) produce un conjunto de datos de 24 bits por píxel. Su resolución estándar es 640x480 píxeles con una frecuencia de muestreo máxima de 30 capturas (o *frame*) por segundo. El sensor de profundidad (D: *Depth*) está compuesto por un emisor láser infrarrojo (IR) con una definición de 2048 datos por píxel (11 bits). Posee igual resolución y frecuencia de muestreo máxima que la cámara RGB. El campo de visión es de 57° horizontal y 43° vertical.

2.2 Procedimiento implementado

Para generar un mapeo 3D o modelo digital de elevaciones (MDE) de la condición de erosión resultante sobre un modelo físico utilizando una cámara RGB-D, se consideraron las etapas presentadas en la Figura 19

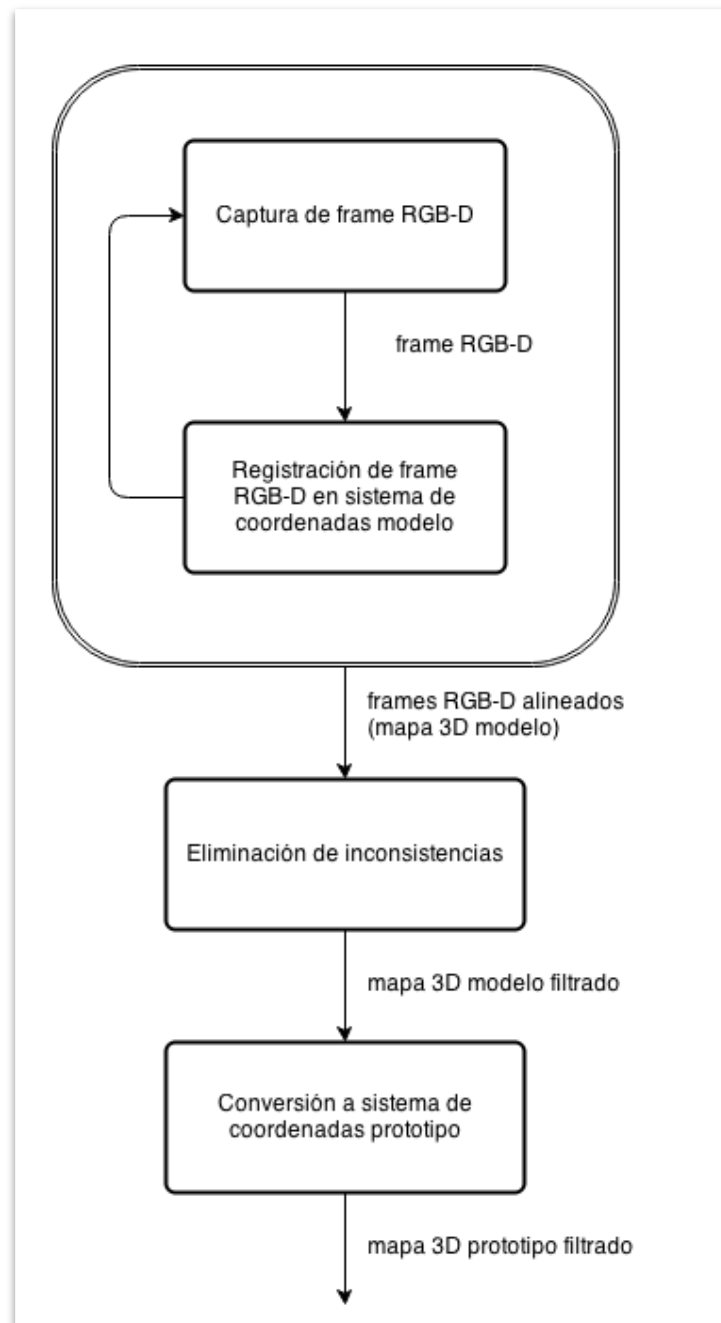


Figura 19: Etapas en la generación del mapeo 3D con cámara RGB-D. (Sanchez Aimar, 2013)

Estas etapas implicaron la captura de cada toma (*frame*) y sus respectivos datos de profundidad utilizando el sensor RGB-D. Las tomas fueron registradas en el mismo sistema de coordenadas de referencia (sistema modelo) generando un mosaico con el conjunto de imágenes capturadas.

La registración global de las imágenes obtenidas con la cámara RGB-D se obtuvo aplicando una transformación rígida que alinea los conjuntos de datos generados basados en una descomposición de valores singulares (Besl y MacKay, 1992) y en un filtrado de correspondencias erróneas con eliminación de inconsistencias (Fischler y Bolles, 1981).

Se realizó una conversión desde el sistema de escala modelo al sistema de escala prototipo, a fin de trabajar con niveles de profundidades reales. En este sentido, utilizando la información de profundidad provista por la cámara RGB-D se pudo establecer un mapeo (x,y,z) asignando un valor de profundidad en prototipo (Z) a cada punto en prototipo en una correspondencia 2D (X,Y) , lo que derivó en correspondencias 3D (X, Y, Z) .

El método se implementó y probó sobre el sistema operativo Ubuntu y requiere de las librerías *Open Source*. Para simplificar la implementación, se utilizó una interfaz de líneas de comandos estándar en sistemas GNU/Linux.

2.3 Análisis de la precisión de las mediciones de erosión con la cámara RGB-D

En este apartado se presentan los resultados alcanzados sobre la calidad geométrica de los datos de profundidad obtenidos con el sensor Kinect. En primer lugar, se presenta el modelo matemático de medición de profundidad utilizado por el sensor y un análisis teórico del error, lo que da una idea de los factores que influyen en la exactitud de los datos.

2.4 Enfoque teórico

El sensor Kinect capta los datos de profundidad y las imágenes en color de forma simultánea a una velocidad de 30 fps (fotograma por segundo). La integración de los datos de profundidad y color resulta una nube de puntos que contiene alrededor de 300.000 datos en cada fotograma. Al registrar imágenes de profundidad consecutivas se puede obtener una mayor densidad de puntos, y recrear un ambiente interior. Para alcanzar el máximo potencial del sensor en aplicaciones de mapeo 3D, es necesario un análisis de los errores sistemáticos y aleatorios de los datos.

La corrección de errores sistemáticos es un requisito previo para la alineación de los datos de profundidad y color, y se basa en la identificación del modelo matemático de mediciones de profundidad y los parámetros de calibración que intervienen. La caracterización de los errores aleatorios es importante y útil en el tratamiento posterior de los datos de profundidad.

En el presente trabajo, el enfoque principal se encuentra en los datos de profundidad, por lo que se realizó un análisis de la precisión y la densidad de los puntos adquiridos.

El sensor Kinect se compone de un emisor láser de infrarrojos, una cámara infrarroja y una cámara RGB. Los desarrolladores describen la medición de la profundidad como un proceso de triangulación (Freedman *et al.*, 2010). La fuente de láser emite un único haz que se divide en múltiples haces por una rejilla de difracción para crear un patrón constante de puntos que se proyecta sobre la escena. Este patrón es capturado por la cámara infrarroja y se correlaciona contra un patrón de referencia. El patrón de referencia se obtiene mediante la captura de un plano a una distancia conocida desde el sensor, y se almacena en la memoria del sensor. Cuando un conjunto de puntos se proyecta sobre un objeto cuya distancia al sensor es más pequeño o más grande que la del plano de referencia la posición en la imagen infrarroja se desplazará en la dirección de la línea de base entre el

proyector láser y el centro de perspectiva de la cámara infrarroja. Para cada píxel la distancia al sensor, se puede recuperar de la disparidad correspondiente, como se describe en la siguiente sección. La Figura 20 muestra la medición de la profundidad a partir del patrón de puntos.

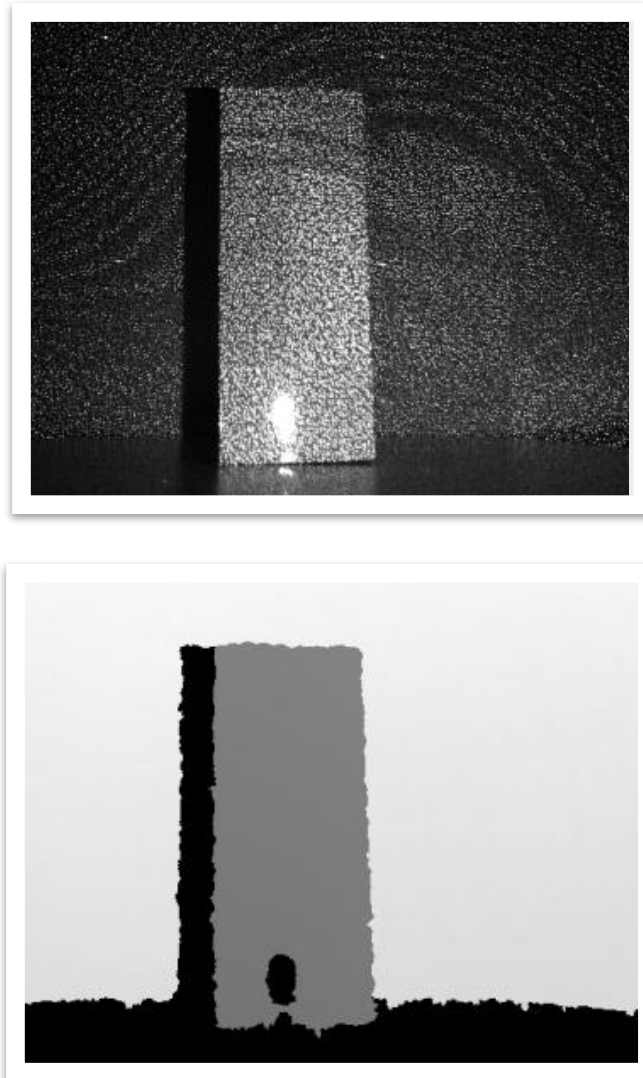


Figura 20. Objeto patrón capturado con Kinect. Izquierda: imagen infrarroja y patrón de puntos proyectados sobre el objeto. Derecha: imagen de la profundidad resultante.

2.5 Modelo matemático

La **Figura 21**. Representación esquemática de la relación entre la profundidad y la disparidad. ilustra la relación entre la distancia de un punto objeto “ k ” para el sensor relativo a un plano de referencia y la disparidad medida “ d ”. Para expresar las coordenadas 3D de los puntos del objeto, consideramos una profundidad del sistema de coordenadas con origen en el centro de la perspectiva de la cámara infrarroja. El eje “ Z ” es ortogonal al plano de la imagen hacia el objeto, el eje “ X ” perpendicular al eje “ Z ” en la dirección de la línea de base “ b ” entre el centro de la cámara infrarroja y el proyector láser, y el eje “ Y ” ortogonal a “ X ” y “ Z ”.

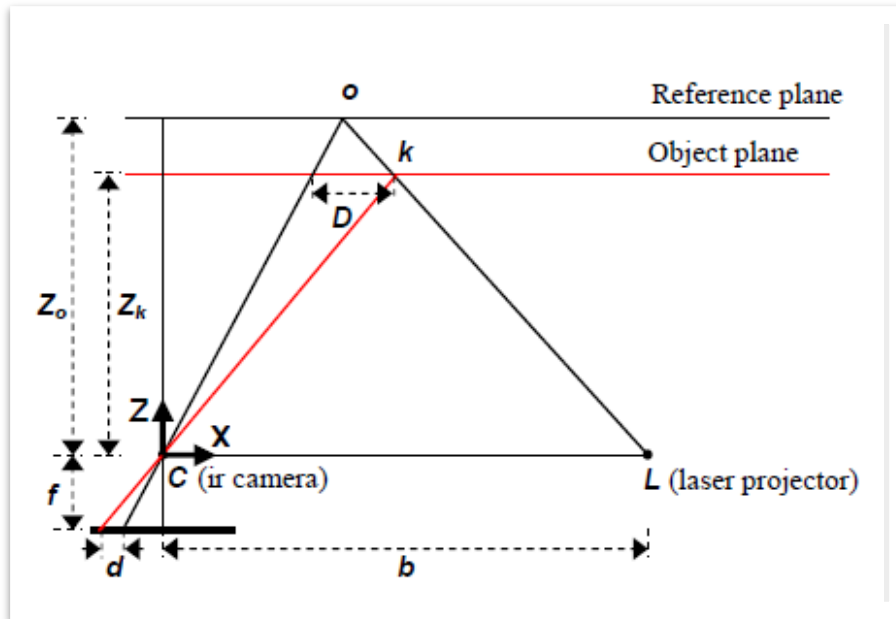


Figura 21. Representación esquemática de la relación entre la profundidad y la disparidad.

Supongamos que un plano de referencia se encuentra a una distancia “Z₀” al sensor, y un punto de un objeto es capturado en el plano de la imagen de la cámara infrarroja. Si el objeto se desplaza más cerca (o más lejos de) del sensor la ubicación del punto en el plano de la imagen se desplaza en la dirección “X”. Esto se mide en el espacio de la imagen como la disparidad “d” correspondiente a un punto “k” en el plano del objeto. A partir de la similitud de los triángulos tenemos:

$$\frac{D}{b} = \frac{Z_0 - Z_k}{Z_0} \quad (1)$$

$$\frac{d}{f} = \frac{D}{Z_k} \quad (2)$$

Donde: “Z_k” es la distancia (profundidad) del punto “K” en el plano del objeto, “b” es la longitud de la base, “f” es la longitud focal de la cámara infrarroja, “D” es el desplazamiento del punto “K” en el plano del objeto, y “d” es la disparidad observada en el plano de la imagen. Despejando “D” de la Ecuación 2 y reemplazándola en la Ecuación 1 y expresando “Z_k” en términos de las otras variables se obtiene:

$$Z_k = \frac{Z_0}{1 + \frac{Z_0}{f * b} d} \quad (3)$$

La Ecuación 3 es el modelo matemático básico para estimar la profundidad de la disparidad observada siempre que los parámetros constantes “Z₀”, “f”, y “b” se pueden determinar por calibración. La coordenada “Z” de un punto junto con “f” define la escala de imagen para ese punto:

$$X_K = -\frac{Z_k}{f}(x_k - x_0 + \delta x) \quad (4)$$

$$Y_K = -\frac{Z_k}{f}(y_k - y_0 + \delta y) \quad (5)$$

Donde: “ x_k ” e “ y_k ” son las coordenadas del punto de una imagen, “ x_0 ” e “ y_0 ” son las coordenadas del punto principal, y “ δx ” y “ δy ” son las correcciones para la distorsión de lentes, para los que existen diferentes modelos con diferentes coeficientes. Tenga en cuenta que aquí se supone que el sistema de coordenadas de la imagen es paralelo con la línea de base y por lo tanto con la profundidad del sistema de coordenadas.

2.6 Calibración

Como se mencionó anteriormente, los parámetros de calibración que intervienen en el modelo matemático para el cálculo de las coordenadas 3D de las mediciones de imagen son:

- distancia focal (f)
- compensaciones punto principal (x_0, y_0)
- coeficientes de distorsión de la lente (en $\delta x, \delta y$)
- longitud de la base (b)
- La distancia del patrón de referencia (Z_0)

A partir de estos parámetros de calibración, los primeros tres pueden ser determinados por un estándar de calibración de la cámara infrarroja. La determinación de la longitud de base y la distancia de referencia es sin embargo más complicada. Por lo tanto, en la Ecuación 3, “d” debería ser reemplazado con $d+n$, con d' la disparidad normalizado y “m”, “n” los parámetros de una (supuestamente) normalización lineal (de hecho desnormalización). La inclusión de estos en la Ecuación 3 y la inversión resulta:

$$Z_k^{-1} = \left(\frac{m}{fb}\right) d' + \left(Z_k^{-1} + \frac{n}{fb}\right) \quad (6)$$

La Ecuación 6 expresa una relación lineal entre la profundidad inversa de un punto y su correspondiente disparidad normalizada. Mediante la observación de la disparidad normalizada para un número de puntos del objeto (o planos) a distancias conocidas al sensor se puede estimar los coeficientes de esta relación lineal de una manera de mínimos cuadrados. Sin embargo, la inclusión de los parámetros de normalización no permite la determinación de “b” y “ Z_0 ” por separado.

2.7 Precisión de profundidad y densidad de puntos

La precisión y la densidad de puntos son dos medidas importantes para evaluar la calidad de la nube de puntos registrada por el sensor Kinect. En este apartado se discuten los factores que influyen en la precisión y la densidad de datos de la Kinect.

2.8 Fuentes de error

Los errores e imperfecciones en los datos de la Kinect pueden provenir de tres fuentes principales:

- El sensor.
- La configuración de la medición.
- Las propiedades de la superficie del objeto.

Los errores en los sensores, para un dispositivo que funcione adecuadamente, se refieren principalmente a la calibración inadecuada y la medición inexacta de las disparidades. Una inadecuada calibración y/o error en la estimación de estos parámetros conducen a errores sistemáticos en las coordenadas del objeto de los puntos individuales. En la Tabla 1 se presentan los parámetros de calibración originales de fábrica para el sensor Kinect.

Tabla 1: Parámetros de calibración de la cámara infrarroja

1	Parámetro de calibración		2	Valor	3	Unidad
4	Longitud focal	5 f	6	4,73	7	mm
8	Punto principal de desplazamiento	9 x0	10	-0,12	11	mm
		y0		0,00		mm
Tamaño del pixel	px			7,80		µm
	py			7,80		µm
Distorsión radial de la lente	K1			5,67 e-3		
	K2			3,43 e-4		
	K3			0		
Descentramiento de la lente	P1			0		
	P2			0		

Los errores causados por la configuración de la medición están relacionados principalmente con la condición de iluminación y de la geometría de la imagen. La condición de iluminación influye en la correlación y la medición de las disparidades. A la luz fuerte los puntos láser aparecen con bajo contraste en la imagen infrarroja, que puede conducir a valores atípicos o vacíos en la nube de puntos resultante. Las imágenes geométricas incluyen la distancia al objeto y la orientación de la superficie del objeto con respecto al sensor. El rango de operación del sensor es de 0,5 m y 5,0 m de acuerdo a las especificaciones del mismo, y, como veremos a continuación, el error aleatorio de medición de profundidad aumenta al aumentar la distancia al sensor.

2.9 Imagen con falla de iluminación

Dependiendo de la geometría de la imagen, partes de la escena pueden estar ocluidos o aparecer en sombra. En la **Figura 20** el lado derecho de la caja está ocluido, ya que no puede ser visto por la cámara de infrarrojos infrarroja a pesar de que puede haber sido iluminado por el patrón de láser. El lado izquierdo de la caja es la sombra, ya que no está iluminada por el láser, pero es capturado en la imagen infrarroja. Tanto las áreas ocluidas y sombras aparecen como vacíos en la nube de puntos resultante.

Las propiedades de la superficie del objeto también influyen en la medición de puntos. Como se puede ver en la **Figura 20** las superficies lisas y brillantes que aparecen sobreexpuestas en la imagen infrarroja (la parte inferior de la caja) impiden la medición de las disparidades, y dan lugar a un vacío en la nube de puntos resultante.

2.10 Densidad de puntos

La resolución de la cámara infrarroja, es decir, el tamaño de los píxeles, determina el espaciado de puntos de los datos de profundidad en el plano XY (perpendicular al eje de la cámara). Puesto que cada imagen de profundidad contiene una resolución constante de 640x480 píxeles, la densidad de puntos disminuirá al aumentar la distancia de la superficie del objeto desde el sensor. Teniendo en cuenta que la densidad de puntos es el número de puntos por unidad de área definida, mientras que el número de puntos se mantiene constante (307200 puntos por imagen) el área es proporcional al cuadrado de la distancia desde el sensor. Por lo tanto, la densidad de puntos es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia del sensor, que es:

$$\rho \approx \frac{1}{Z^2} \quad (7)$$

2.11 Linealidad

Para este ensayo se utilizó una superficie plana compuesta por una grilla de 9 x 9 cuadrantes tal como se ilustra en la Figura 22. Cada cuadrante tiene una longitud de 20,10 mm, se utilizó una escuadra para mantener la perpendicularidad de la superficie al sensor KINECT y una cinta métrica para medir las distintas distancias entre el sensor y la superficie. (Figura 23)

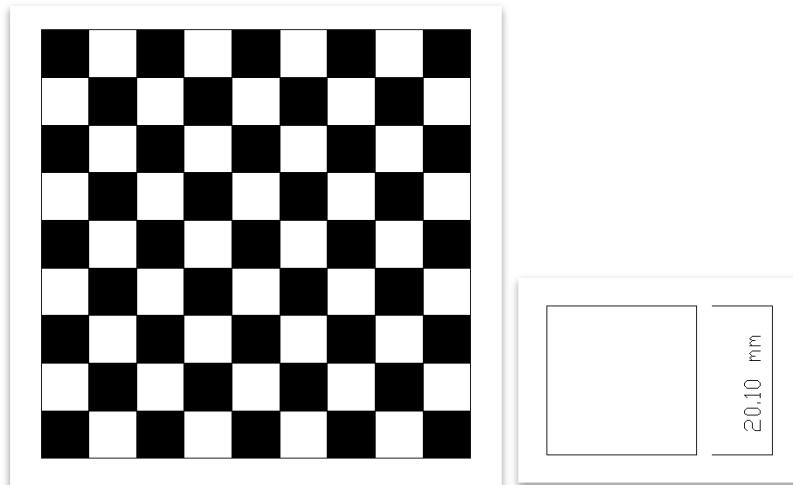


Figura 22. Grilla para calibración y detalle del cuadrante tipo.



Figura 23. Disposición de los elementos en el ensayo.

El ensayo consistió en tomar datos con la cámara KINECT para distintas distancias definidas entre 0,50 m y 1,50 m, con el fin de analizar las mediciones de cada cuadrante respecto del sensor, en base a las condiciones que se trabajará en el modelo físico.

La profundidad es una estimación de la distancia del objeto al plano de la cámara laser en lugar de la distancia real desde el objeto al sensor, tal como se muestra en la Figura 24. Esquema de estimación de profundidad con . La imagen capturada por el sensor Kinect se observa en la Figura 25, y con mayor detalle de los puntos en la Figura 26.

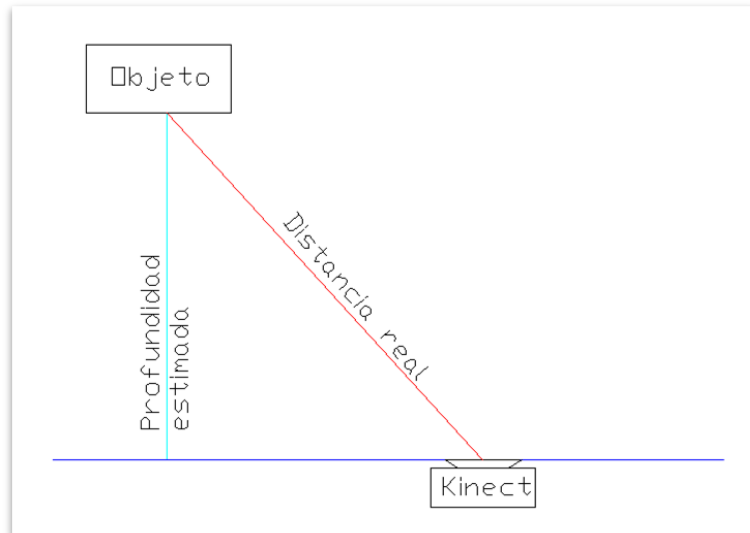


Figura 24. Esquema de estimación de profundidad con Kinect.

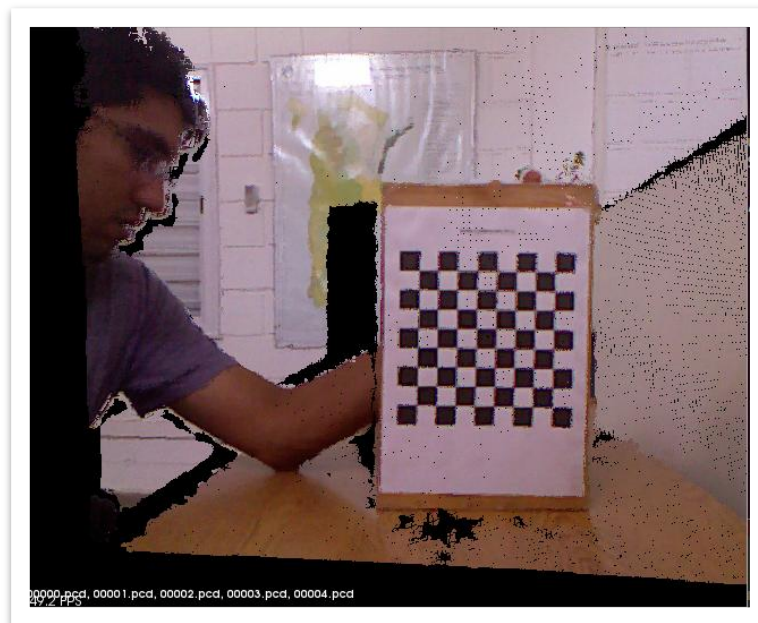


Figura 25. Imagen capturada con Kinect de una superficie plana ubicada a 500 mm del sensor.

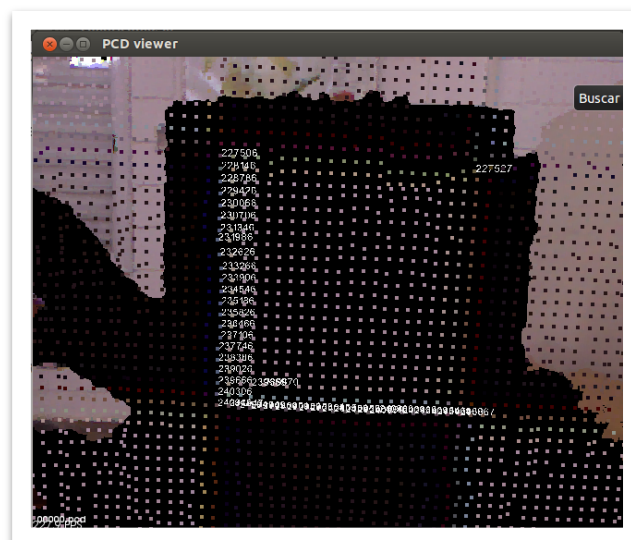


Figura 26. Detalle de la grilla ubicada a 500 mm del sensor Kinect.

Para cada distancia hacia la grilla, las estimaciones de profundidad se promedian sobre un área de cuadrante de la misma y se comparan con la distancia real (medida con cinta métrica). Los resultados se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Calibración sensor Kinect. Distancia medida manual y digitalmente.

Profundidad (mm)	
Medición manual (mm)	Medición digital con Kinect (mm)
500	496
750	745
1000	994
1250	1254
1500	1502

En la **Figura 27** se muestran los valores de profundidad como una función de la distancia. El rango de mediciones se encuentra entre 500 mm y 1500 mm, se evaluó este rango por el hecho que son las distancias con mayor frecuencia que se utilizarán en los ensayos de laboratorio. Cabe aclarar que el sensor Kinect tiene una muy buena linealidad hasta los 5 m inclusive. (Universidad de Twente, 2010)

En el caso que los límites de mediciones sean excedidos, la estimación de la profundidad se ajusta a 0 (cero).

El conjunto de mediciones digitales y manuales se pueden representar por una función lineal con un coeficiente de determinación (R^2) de 0,9999.

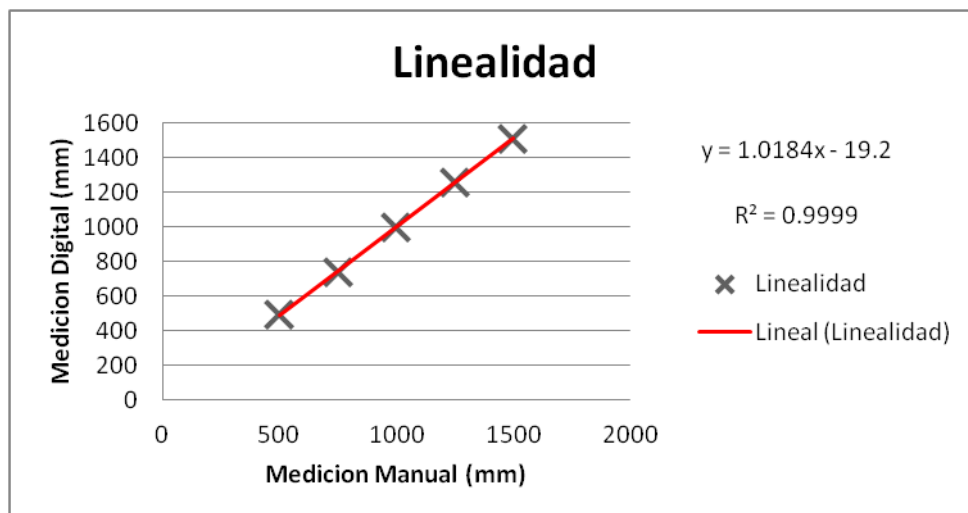


Figura 27. Análisis de la linealidad de las mediciones. Profundidad del sensor medido digitalmente a distancias definidas.

2.12 Exactitud y precisión

Se analizó la exactitud y la precisión tanto en planta como en profundidad. Para la evaluación en planta, con la superficie plana perpendicular al sensor Kinect, se procede a medir un cuadrante arbitrario de la grilla con la ayuda del sensor. A este valor se lo compara con el valor real medido con un calibre manual (valor igual a **20,10 mm**). Esto se repitió con diferente distancia del sensor a la superficie plana tal como se detalla en la primera columna de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, la segunda columna de esta tabla indica las medidas del cuadrante analizado y en la tercera columna se presenta el error absoluto estimado (diferencia entre la medida digital y la real).

Tabla 3. Análisis de la exactitud de la mediciones con con Kinect.

Distancia (mm)	Longitud del cuadrante con KINECT (mm)	Error absoluto (mm)
500	19,84	0,26
750	19,75	0,35
1000	20,83	0,73
1250	21,41	1,06
1500	21,16	1,31

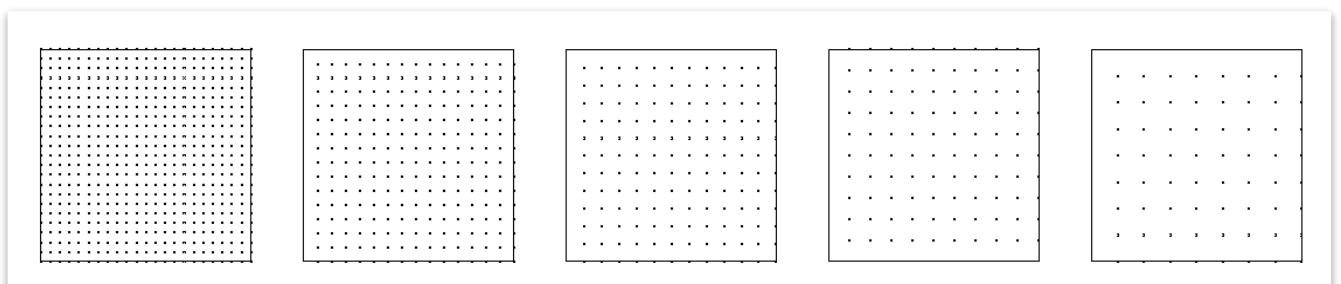


Figura 28. Proyección de puntos sobre cuadrante

El error absoluto promedio arrojó un valor de 0,66 mm, lo que representa un 3,3 % de la medida real del cuadrante analizado. El error se incrementa con la distancia del sensor al plano objeto.

2.13 Resolución espacial

Para determinar la resolución espacial del sensor Kinect, se realizaron ensayos donde el sensor de profundidad se ubicó perpendicular a una superficie plana. Se cuantificaron la cantidad de pixeles

por cuadrante, variando la distancia del plano objeto al sensor Kinect. Esto se realizó para distancias entre 0,5 m y 1,5 m. Los resultados se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Análisis de la resolución del sensor Kinect con respecto a la distancia.

Distancia (mm)	Número de píxeles por cuadrante tipo	Resolución espacial del pixel (mm)
500	22	0,914
750	15	1,340
1000	12	1,675
1250	10	2,010
1500	8	2,513

El conjunto de valores obtenidos se presenta en la **Figura 29**, indicando que la resolución aumenta al aumentar en forma cuadrática con la distancia entre el sensor y el plano objeto. El coeficiente de determinación (R^2) obtenido resultó de 0,9955.

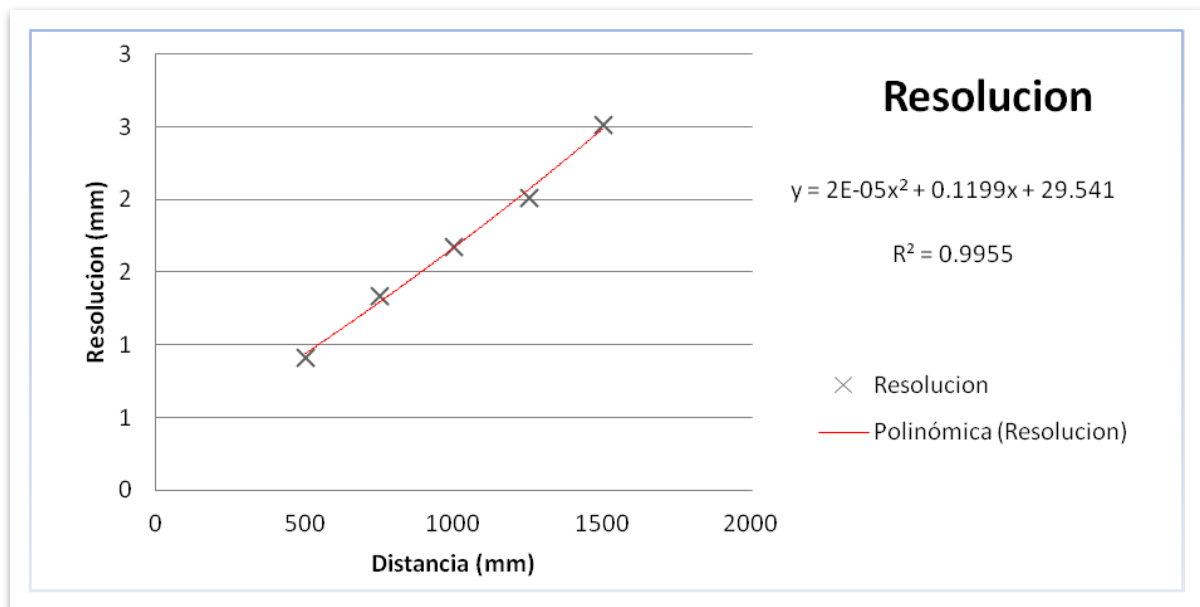


Figura 29. Resolución espacial en función de la distancia

2.14 Irregularidad de los bordes

Debido a la distancia que se presenta entre la cámara infrarroja, el sensor laser y la cámara RGB en el sensor Kinect y las imágenes de profundidad no resultan perfectamente alineadas.

Esta falta de alineación también se produce debido a la discontinuidad de la superficie, a la sensibilidad del laser a la luz y a los efectos de reflexión del laser infrarrojo, que por el efecto reflejo terminan captando puntos adicionales a los cuales le asigna un valor de profundidad inadecuados.



Figura 30. Análisis de objetos con forma conocida. Superficie cuadrada en color azul.

En la **Figura 30** se observa cómo se produce el error de alineación, ya que el color marrón que se observa dentro del círculo no corresponde a la superficie plana azul.

Se considera que este error no afecta los trabajos de investigación aquí presentados ya que se trabajó con un mosaico de imágenes que en conjunto elimina esta falta de alineación de bordes.

2.15 Análisis de los resultados alcanzados

Los resultados experimentales muestran que el error aleatorio de medición de la profundidad aumenta linealmente con la distancia al sensor, abarcando rangos desde 0,26 mm hasta 1,31 mm para distancias entre 0,5 m y 1,5 m respectivamente. En trabajos previos (Universidad de Twente, 2010) se llega hasta 4 cm de error correspondiente a una distancia de 5 m.

La resolución espacial disminuye cuadráticamente con la distancia del sensor a la superficie de referencia.

Estas conclusiones coinciden con los antecedentes consultados, los cuales indican que:

- La nube de puntos de un sensor Kinect debidamente calibrado no contiene grandes errores.

- El error aleatorio de las mediciones de profundidad aumenta cuadráticamente con el aumento de la distancia desde el sensor.
- La densidad de puntos también disminuye al aumentar la distancia al sensor. Un factor que influye es la resolución de profundidad, que en general es muy bajo con la distancia.

En general, otros autores recomiendan para aplicaciones de mapeo que los datos deben ser adquiridos dentro del rango de distancias comprendido entre 0,50 m a 3 m respecto al sensor. Los trabajos que se realizaron en el Laboratorio de Hidráulica de la UNC, en el marco de la presente Práctica Supervisada, se encuentran dentro de un rango de 0,50 y 1,50 m.

CAPITULO III

ANÁLISIS DE EROSIONES AGUAS ABAJO DEL CANAL MODERADOR

CAPITULO III: ANÁLISIS DE LAS EROSIONES AGUAS ABAJO DEL CANAL MODERADOR

3 Introducción y Objetivos

Se presenta la caracterización hidráulica del nuevo perfil lanzador del Canal Moderador puesto a evaluación en el modelo físico del Dique Los Molinos durante el mes de febrero de 2014.

En primera instancia se determinó las curvas altura-caudal (H-Q) característica de cada uno de los descargadores de fondo del canal moderador (CM), mientras que posteriormente se analizó para el conjunto (es decir trabajando ambos en forma simultánea). Se confeccionaron las curvas H (altura de pelo de agua, aguas arriba del labio del descargador) – Q (caudal erogado) y Q – D (distancia a la cual cae el flujo de agua luego de atravesar el salto esquí) y se verificaron las erosiones aguas abajo, para el rango de caudales solicitado (15, 30, 50, 75, 100 y 150 m³/s).

Se aclara que al CM ubicado sobre la margen derecha del río se le denominará CM1 y al otro (que se ubica a su izquierda) CM2.

A modo de resumen se indican los objetivos específicos para la presente etapa de trabajo:

- Definición de la capacidad de erogación (Relación H-Q del nuevo perfil).
- Definición de las velocidades en la estructura (Velocidades máximas observadas sobre la estructura).
- Análisis de las distancia de lanzamiento del chorro respecto al muro colado del CM.
- Medición de las profundidades de socavación y dimensiones de la fosa (evaluación de las erosiones máximas esperables).

3.1 Curvas características del canal moderador: Relación H-Q

Para la realización de estas curvas características, se hizo variar el caudal y se midieron tanto las variables de altura (H) como la distancia de despegue (D). Para medir H, el modelo físico cuenta con escalas graduadas al milímetro, ubicadas en las márgenes derecha e izquierda de cada obra de descarga (**Figura 31**). De esta manera, se cuenta con dos escalas en el canal moderador CM (una sobre margen izquierda -MI- y otra sobre margen derecha -MD-) y dos escalas en el dique móvil DM (MI y MD).

Para caracterizar los descargadores de fondo del canal moderador se optó por tomar lecturas en las escalas ubicadas tanto sobre la margen derecha de CM como la margen derecha de DM. No se utilizó la escala de margen izquierda de CM, ya que su lectura, estaba influenciada por efectos de separaciones del flujo.

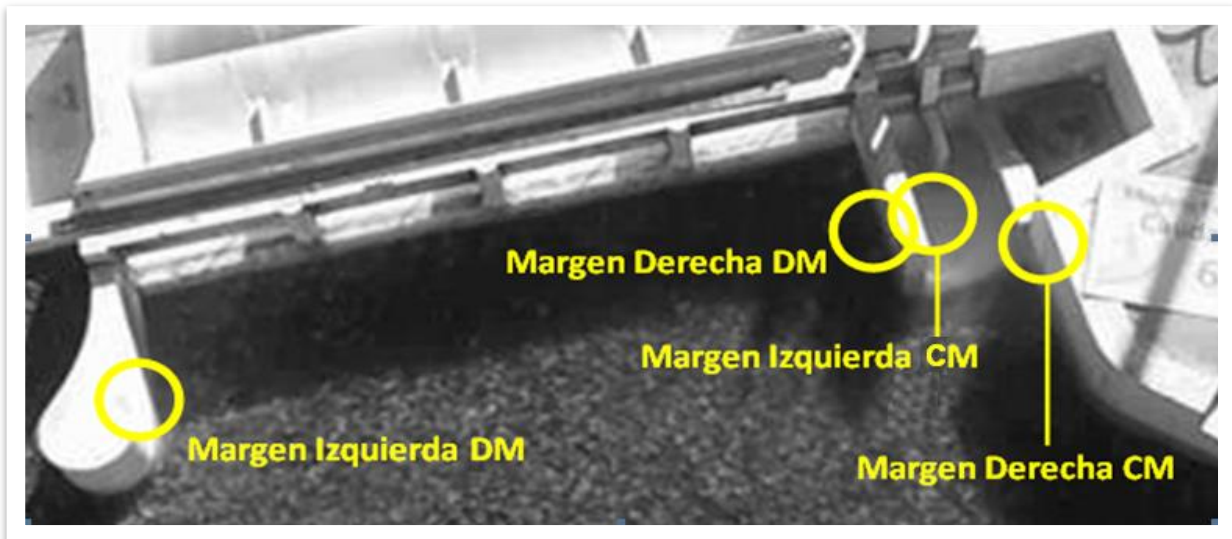


Figura 31: Ubicación de las escalas milimétricas para medir H en DM y CM.

La distancia de despegue del flujo aguas abajo del salto esquí (D), se midió según la representación de la **Figura 32**.

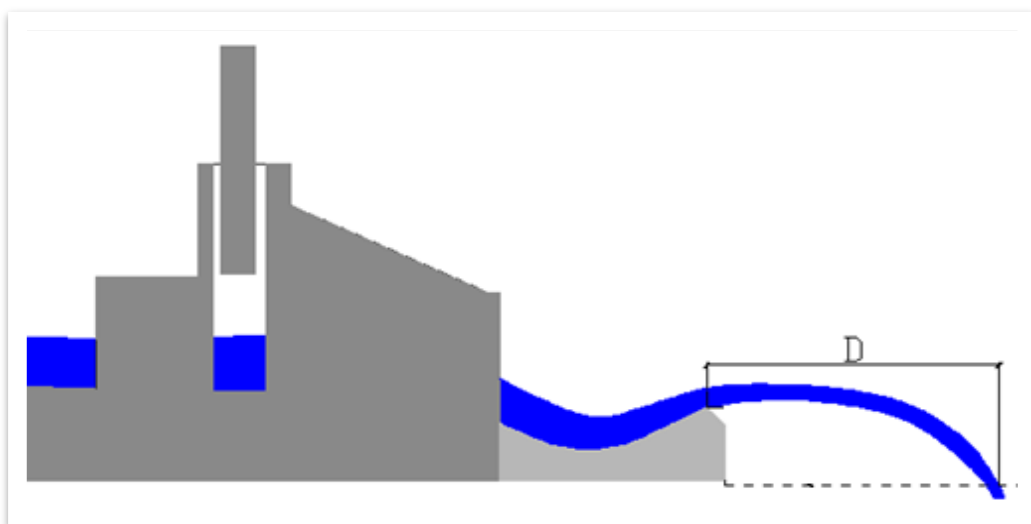


Figura 32: Corte esquemático del canal moderador.

3.1.1 Definición de las Curvas H – Q

Las curvas H – Q obtenidas de la estructura en su conjunto (CM1 y CM2 trabajando en simultáneo) son las siguientes:

- **Figura 33:** Curva H-Q del conjunto (ambos CM abiertos).
- **Figura 34:** Curva H-Q del CM1 (Solo CM1 abierto).
- **Figura 35:** Curva H-Q del CM2 (Solo CM2 abierto).

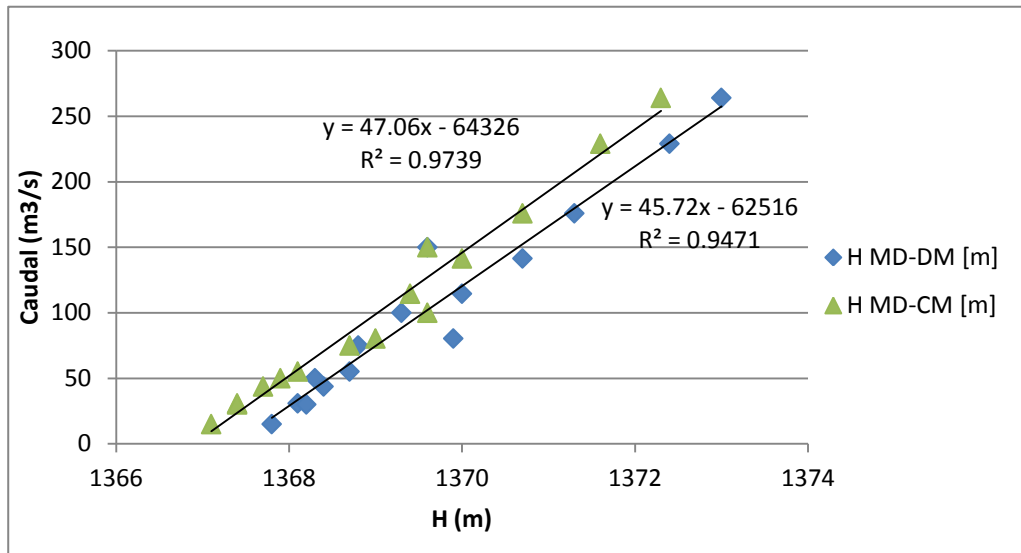


Figura 33: Curva H – Q del CM. H = altura del nivel de agua medida sobre la margen derecha de DM y CM.

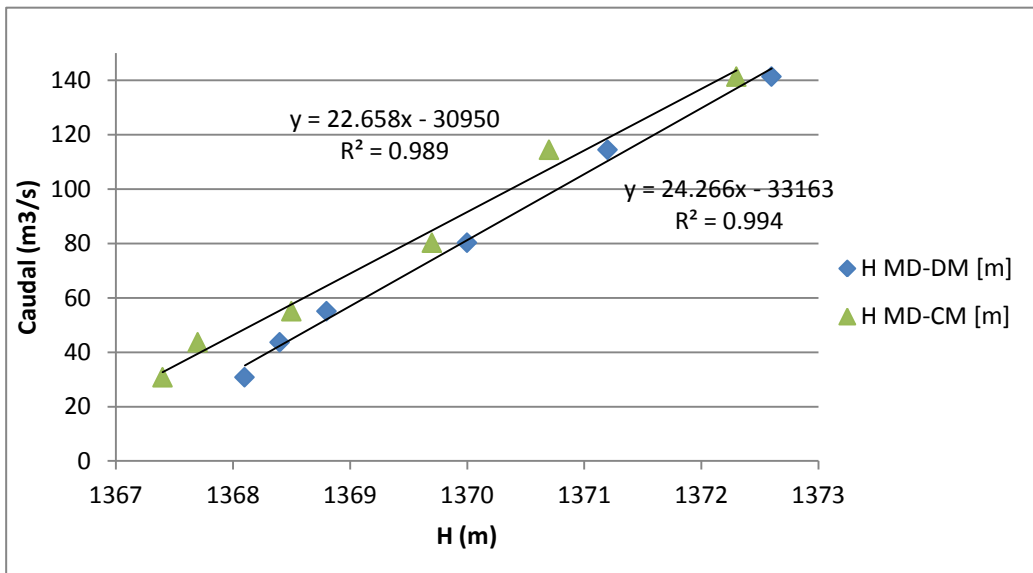


Figura 34: Curva H – Q de CM1. H= altura del nivel de agua medida sobre la margen derecha de DM y CM.

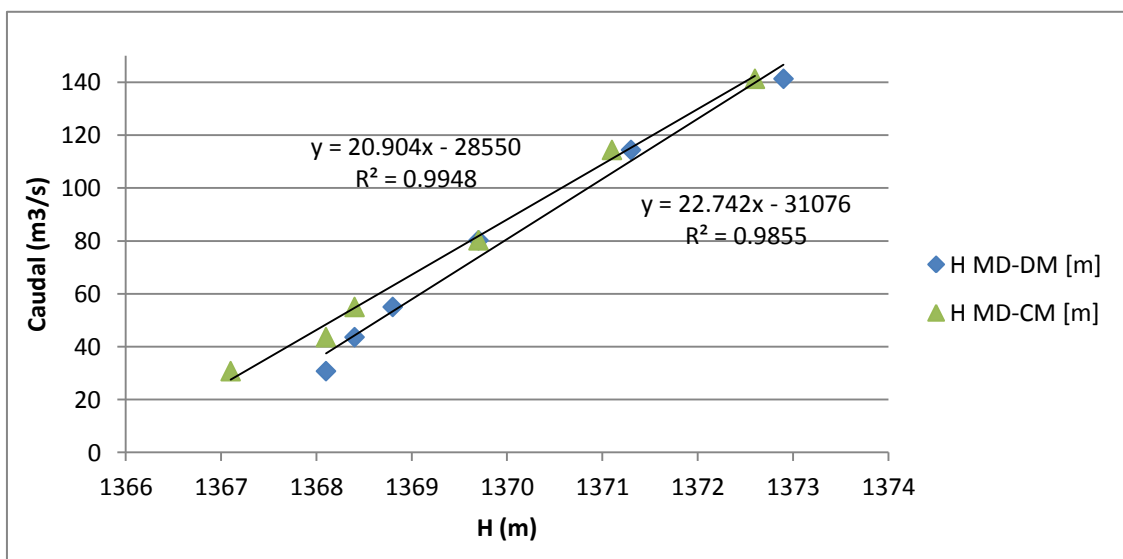


Figura 35: Curva H – Q de CM2. H= altura del nivel de agua medida sobre la margen derecha de DM y CM.

Se observa que tenemos un relación directa entre el caudal que pasa ya sea por el CM1 y el CM2 actuando cada uno por separado o en forma simultánea y la altura del pelo de agua, aguas arriba del descargador, con una correlación lineal que va entre el 94% y el 99%.

3.1.2 Definición de las Curvas de despegue (D – Q)

Por otro lado, se determinaron las curvas de despegue (D – Q). En la **Figura 36** se presenta la relación para los descargadores de fondo del CM trabajando simultáneamente. En la **Figura 37** y **Figura 38** se presentan las curvas asociadas a los CM1 y CM2 respectivamente,

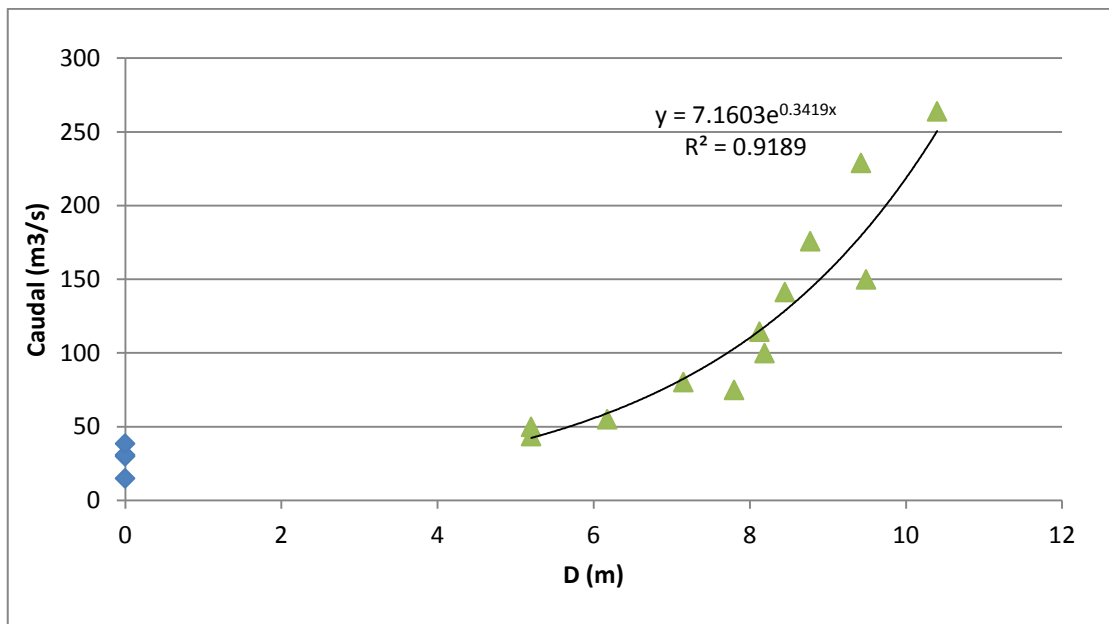


Figura 36: Curva D – Q del CM.

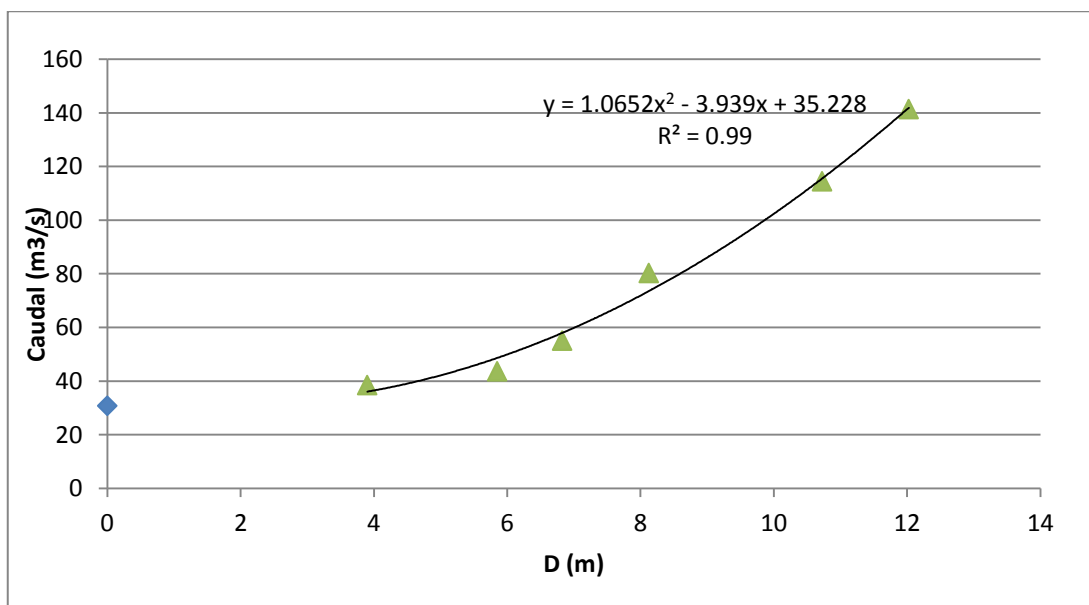


Figura 37: Curva D – Q de CM1.

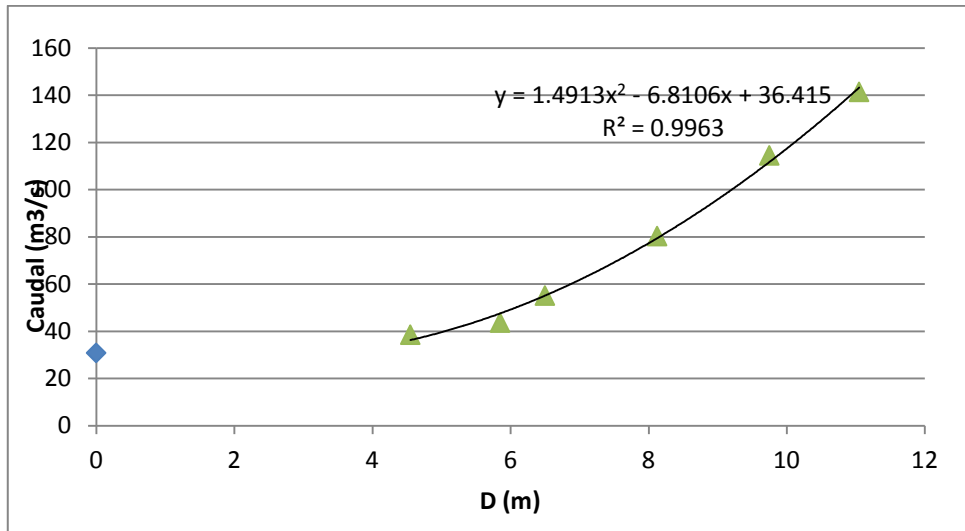


Figura 38: Curva D – Q de CM2.

Para el funcionamiento conjunto de ambos CM se definió una relación cuadrática entre el caudal y la distancia del salto, con una correlación del 92%. A la vez que se puede observar que para caudales menores a 45 m³/s, el flujo no se despega del salto esquí. También se definió una relación cuadrática entre el caudal que pasa ya sea por el CM1 y el CM2 actuando cada uno por separado y la distancia del salto esquí, en tanto que su correlación es del 99%. Se observa que para caudales menores a 40 m³/s, el flujo no se despega del salto esquí.

3.1.3 Comparación de perfiles del salto esquí

Al comparar este perfil del salto esquí con el propuesto anteriormente, caracterizado ya en ensayo previo (Nro. 37), se observó que para un mismo caudal, la distancia de despegue resultó menor con esta nueva alternativa aquí evaluada. Esto último se muestra en la **Figura 39** para CM1 y en la **Figura 40** para CM2.

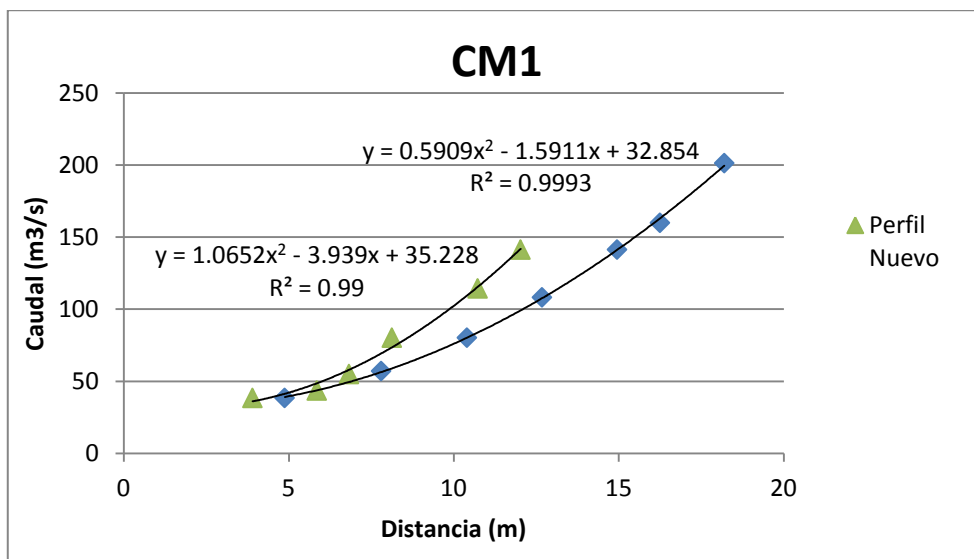


Figura 39: Comparación de alternativas de perfil del salto esquí. Curvas D – Q de CM1.

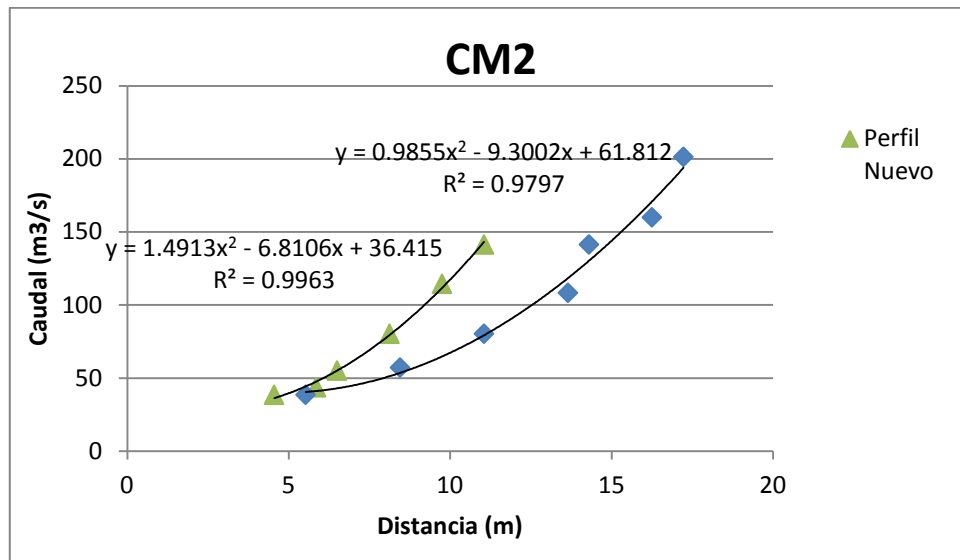


Figura 40: Comparación de alternativas de perfil del salto esquí. Curvas D – Q de CM2.

En cuanto al caudal mínimo de despegue, la comparación que surge entre las 2 alternativas ensayadas es la siguiente:

- 2 CM trabajando en simultáneo:
- Alternativa actual: 45 m³/s
 - Alternativa anterior: 50 m³/s

3.1.4 Definición de la velocidad en el salto esquí

A partir de las curvas de despegue anteriormente mostradas, se calculó la velocidad de despegue del flujo en el salto esquí del CM.

La trayectoria del chorro depende del caudal de descarga, de su energía en el extremo y del ángulo con el que sale del trampolín. A partir de la distancia (D) medida experimentalmente en modelo, no solo se puede conocer el caudal (Q) (a través de la curva presentada) sino también se puede determinar la velocidad de despegue. Las velocidades de despegue estimadas para los diferentes caudales se presentan en la **Figura 41**.

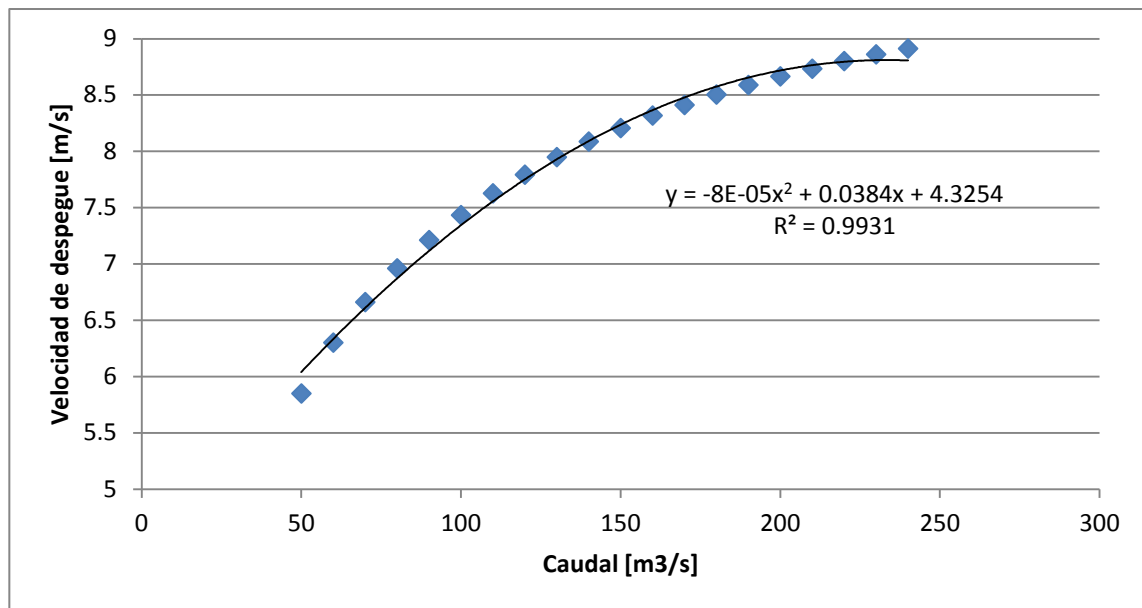


Figura 41: Velocidad de despegue en el salto esquí del CM para distintos caudales.

3.2 Análisis de Erosión

A continuación se presentan las fosas de erosión obtenidas para los diferentes ensayos realizados. Por un lado se relevaron puntos de esa zona con nivel óptico, y luego se generó a partir de ellos la superficie digital del terreno; y por otro lado, utilizando la cámara Kinect se relevó la superficie completa aguas abajo del CM.

Los caudales para los cuales se midió la fosa de erosión formada fueron 15, 30, 50, 75, 100 y 150 m³/s. Para los dos caudales menores, no se observó el despegue del perfil del flujo en el salto esquí del canal moderador, mientras que para los demás, se produjo el despegue del flujo. La cota inicial del lecho aguas abajo de la obra para todos los ensayos resultó en 1359,7 m.

Debido a que anteriormente se había observado que al utilizar el CM como estructura de descarga (operando el mismo con apertura total), se propicia un descenso del cauce aguas arriba del dique móvil ubicado sobre la margen derecha (DM1) que puede ser riesgoso para la estabilidad estructural del CM. Para los ensayos realizados, además de medir la fosa de erosión formada aguas abajo del CM, durante el ensayo se relevó la cota mínima de la fosa que se forma aguas arriba de DM1 (en la zona mostrada en la **Figura 42**).

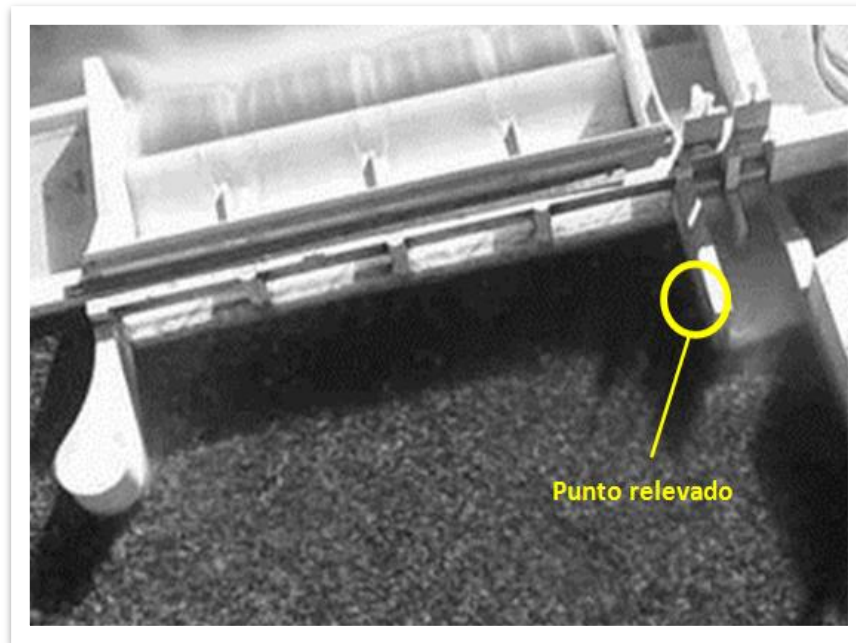


Figura 42: Punto crítico donde se produce la mayor erosión aguas arriba del CM.

3.2.1 Caudal de $15 \text{ m}^3/\text{s}$

Para este caudal, no se produce el despegue del flujo en el salto esquí del canal moderador. El canal moderador CM2 estuvo colmatado con sedimento por lo que no evacua caudal. El salto esquí posee sedimento sobre él. Esto se observa en la **Figura 43**.



Figura 43: Funcionamiento del Canal Moderador con $Q=15 \text{ m}^3/\text{s}$

La cota mínima alcanzada en la fosa que se forma aguas arriba de DM1 fue 1366,3 m. Esta fosa puede observarse en la **Figura 44**.

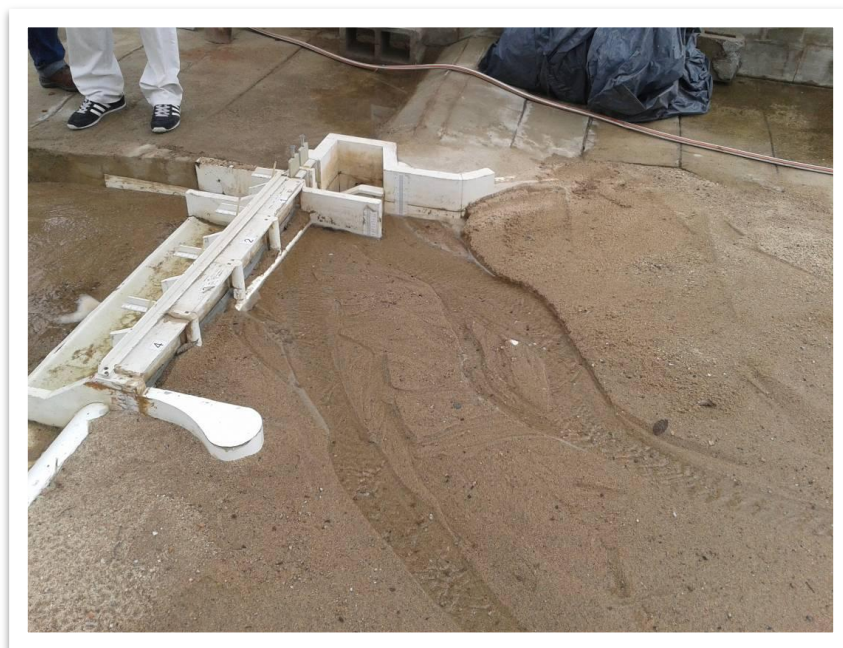


Figura 44: Detalle de zona aguas arriba de la obra con $Q=15 \text{ m}^3/\text{s}$

Prácticamente, no se produce erosión al evacuar este caudal por el canal moderador. Esto puede apreciarse en la **Figura 45**.



Figura 45: Detalle de zona aguas abajo de la obra con $Q=15 \text{ m}^3/\text{s}$

La variación de la cota mínima de la fosa aguas abajo de la obra a lo largo de la realización del ensayo se presenta en la **Figura 46**.

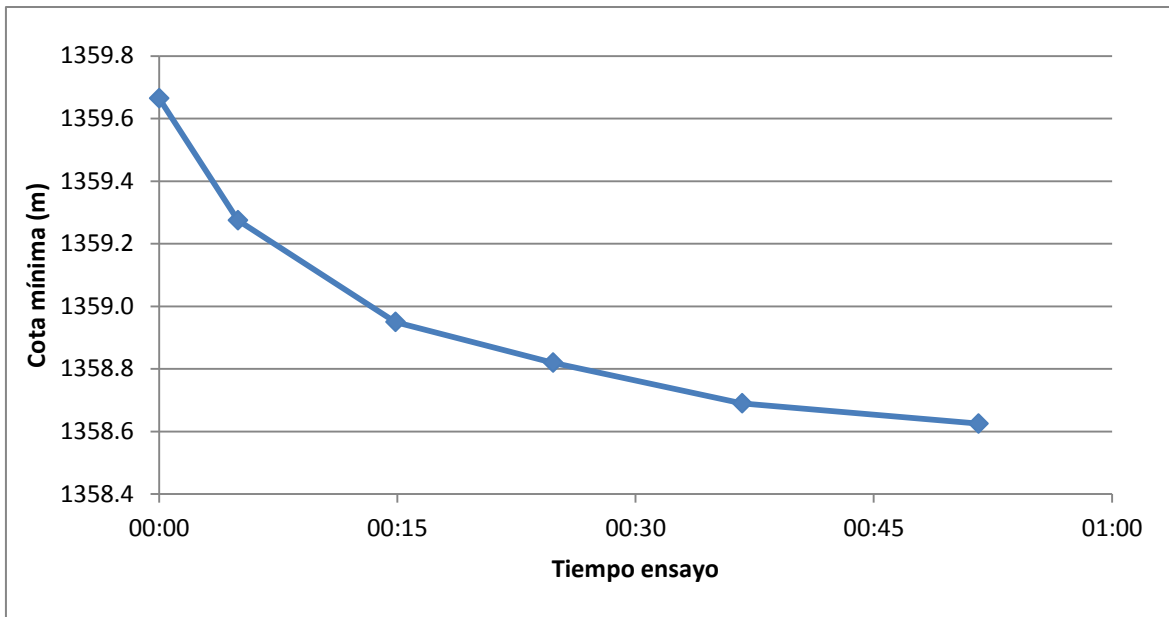


Figura 46: Variación de la cota mínima durante el ensayo – $Q=15\text{m}^3/\text{s}$

A continuación se presentan las fosas de erosión obtenidas para este ensayo hidráulico. Por un lado se relevaron puntos de la zona de interés con nivel óptico, y luego se generó a partir de ellos la superficie digital del terreno; y por otro lado, utilizando la cámara Kinect se relevó la superficie completa aguas abajo del CM.

En la **Figura 47** se presentan las curvas de nivel generadas a partir de los puntos relevados con nivel óptico. Se observa que la cota mínima ($H_{\text{mín}}$: 1358,6 msnm en prototipo) se da al pie del CM al no existir despegue del flujo. En la **Figura 48** se presenta la superficie 3D generada por la cámara Kinect.

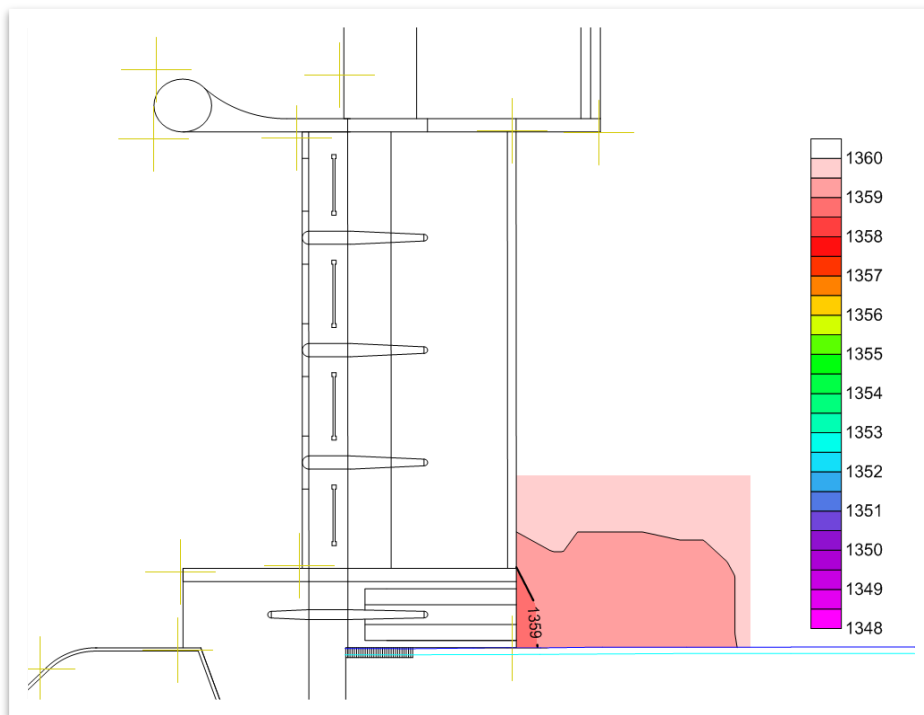


Figura 47: Fosa de erosión relevada con técnica tradicional - $Q=15\text{m}^3/\text{s}$

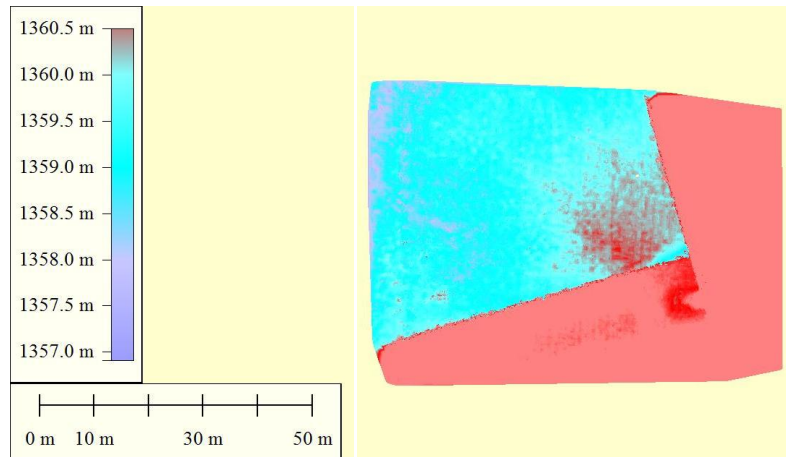


Figura 48: Fosa de erosión relevada con la técnica digital - $Q=15 \text{ m}^3/\text{s}$

La cota mínima relevada en la fosa aguas abajo de la obra fue 1358,6 m s.n.m., es decir 1,1 metros por debajo del nivel inicial del lecho. Esa cota mínima se alcanzó al pie del CM.

3.2.2 Caudal de $30 \text{ m}^3/\text{s}$

Para este caudal, tampoco se produce el despegue del flujo en el salto esquí del canal moderador. El canal moderador CM2 estuvo colmatado con sedimento por lo que evacúa menor caudal. El salto esquí posee sedimento sobre él. Esto se observa en la **Figura 49**.



Figura 49: Funcionamiento del Canal Moderador con $Q=30 \text{ m}^3/\text{s}$

La cota mínima alcanzada en la fosa que se forma aguas arriba de DM1 fue 1365,8 m s.n.m. (Figura 50).



Figura 50: Detalle de zona aguas arriba de la obra con $Q=30 \text{ m}^3/\text{s}$

La variación de la cota mínima de la fosa aguas abajo de la obra durante el ensayo se presenta en la **Figura 51**.

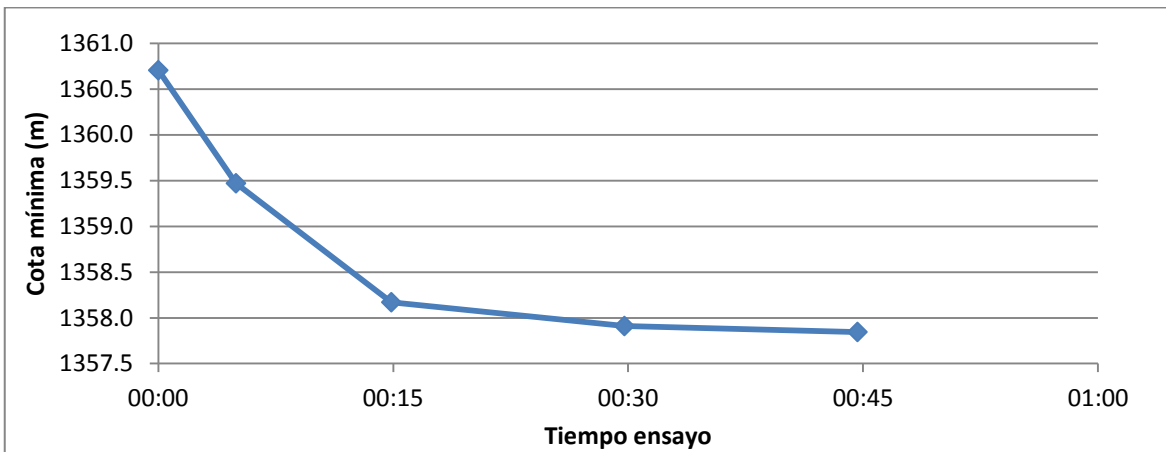


Figura 51: Variación de la cota mínima durante el ensayo – $Q=30 \text{ m}^3/\text{s}$

Al no despegar el flujo, la fosa de erosión tampoco tuvo gran desarrollo. La misma se generó al pie del canal moderador, alcanzando una cota mínima de 1357,8 m s.n.m. (70 centímetros por debajo del nivel inicial del lecho). Se observa la zona aguas abajo del CM en la **Figura 52** y la fosa en detalle en la **Figura 53**.



Figura 52: Detalle de zona aguas abajo de la obra con $Q=30 \text{ m}^3/\text{s}$



Figura 53: Fosa de erosión aguas abajo de CM con $Q=30 \text{ m}^3/\text{s}$

En la **Figura 54** se presentan las curvas de nivel generadas a partir de los puntos relevados con nivel óptico. Al igual que en el caso anterior, aquí también la cota mínima se encuentra al pie del CM ($H_{\text{mín}}$: 1357,8 m s.n.m. en prototipo) ya que al no despegar el flujo la mayor socavación se produce inmediatamente aguas abajo de la estructura del CM. En la **Figura 55** se presenta la superficie 3D generada por la cámara Kinect.

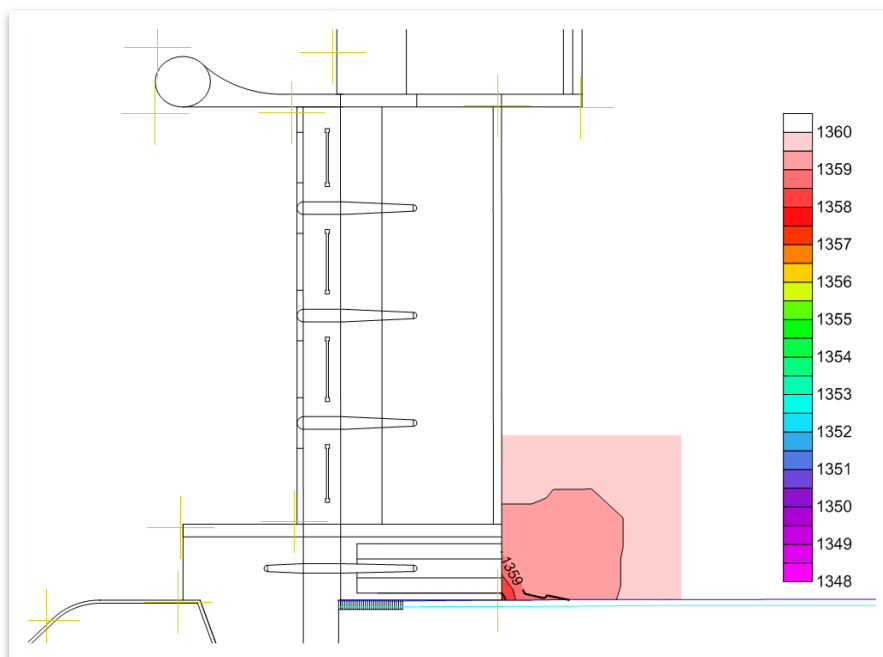


Figura 54: Fosa de erosión construida a partir de puntos relevados con nivel óptico - $Q=30 \text{ m}^3/\text{s}$

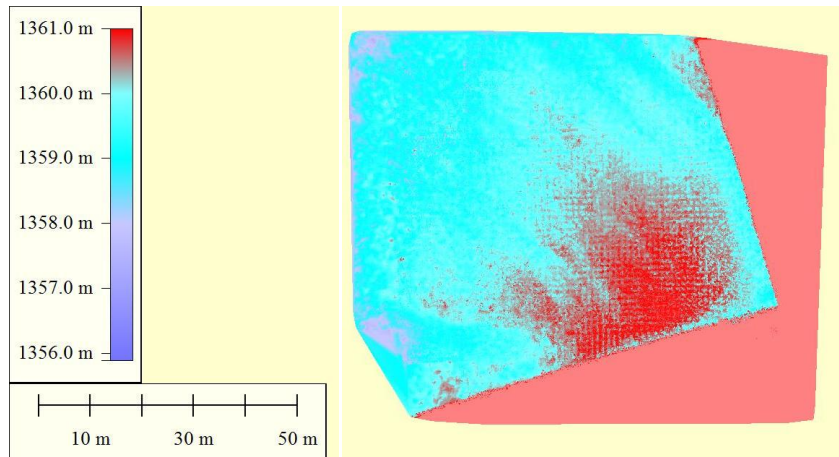


Figura 55: Fosa de erosión construida a partir de puntos relevados con cámara Kinect - $Q=30 \text{ m}^3/\text{s}$

3.3 Caudal de $50 \text{ m}^3/\text{s}$

Para este caudal, sí se produjo el despegue del flujo en el salto esquí del canal moderador. No se depositó sedimento sobre el salto esquí y esto puede verse en detalle en la **Figura 56**. La cota mínima alcanzada en la fosa que se forma aguas arriba de DM1 fue 1364,9 m s.n.m. (**Figura 57**).



Figura 56: Funcionamiento del Canal Moderador con $Q=50 \text{ m}^3/\text{s}$



Figura 57: Detalle de zona aguas arriba de la obra con $Q=50 \text{ m}^3/\text{s}$

La variación de la cota mínima de la fosa aguas abajo de la obra durante el ensayo se presenta en la **Figura 58**.

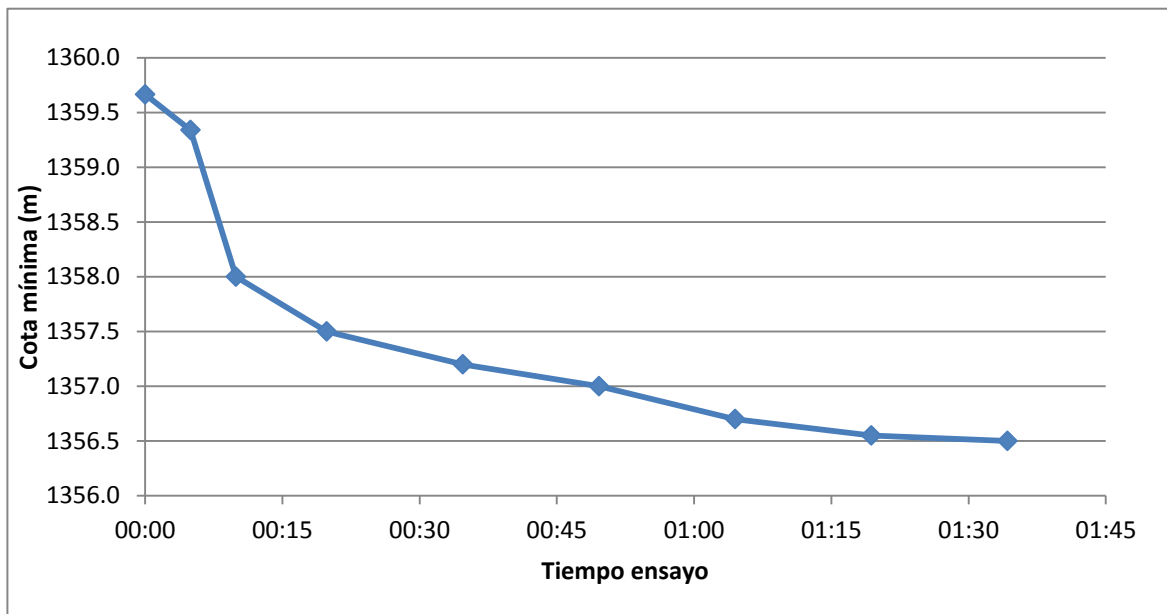


Figura 58: Variación de la cota mínima durante el ensayo – $Q=50 \text{ m}^3/\text{s}$

Este caudal es el mínimo capaz de despegar del salto esquí, por lo que la fosa formada aguas abajo del CM se desarrolló cercana a la estructura pero no al pie del CM como los 2 ensayos anteriores. La cota mínima alcanzada fue de 1356,5 m s.n.m. (3,2m por debajo del nivel inicial del lecho) y se produjo a 6,5 m de distancia en prototipo desde el pie del canal moderador. Un detalle de la fosa se observa en la **Figura 59**.



Figura 59: Fosa de erosión aguas abajo de CM con $Q=50 \text{ m}^3/\text{s}$

En la **Figura 60** se presentan las curvas de nivel generadas a partir de los puntos relevados con nivel óptico. Al producirse el despegue del flujo del salto esquí del CM, en este caso la cota mínima ocurre aguas abajo del pie del CM y no inmediatamente al pie de esta estructura ($H_{\text{mín}}$: 1356,55 m s.n.m. en prototipo). En la **Figura 61** se presenta la superficie 3D generada con datos de la cámara Kinect.

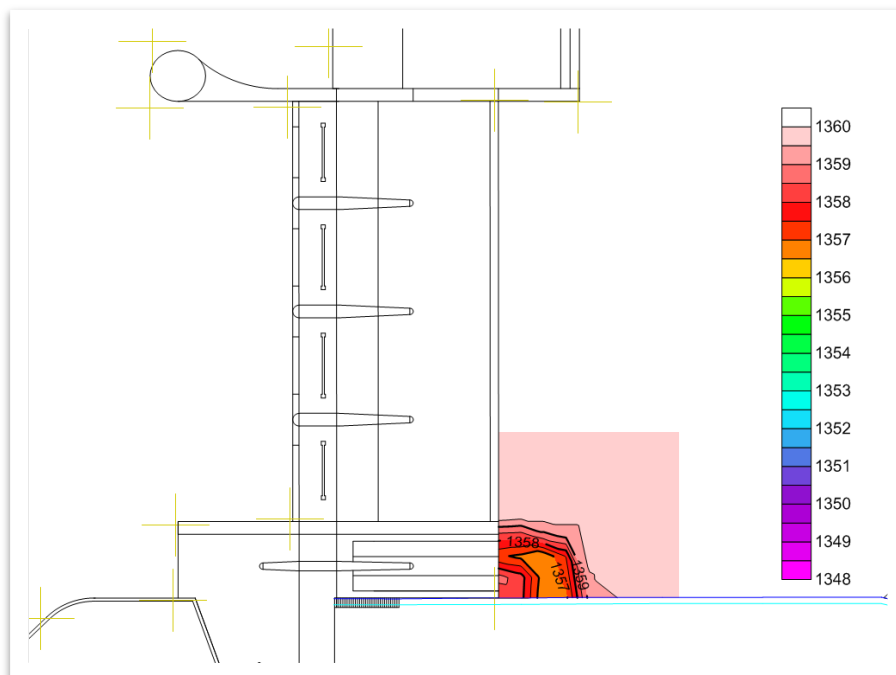


Figura 60: Fosa de erosión construida a partir de puntos relevados con técnica tradicional - $Q=50 \text{ m}^3/\text{s}$

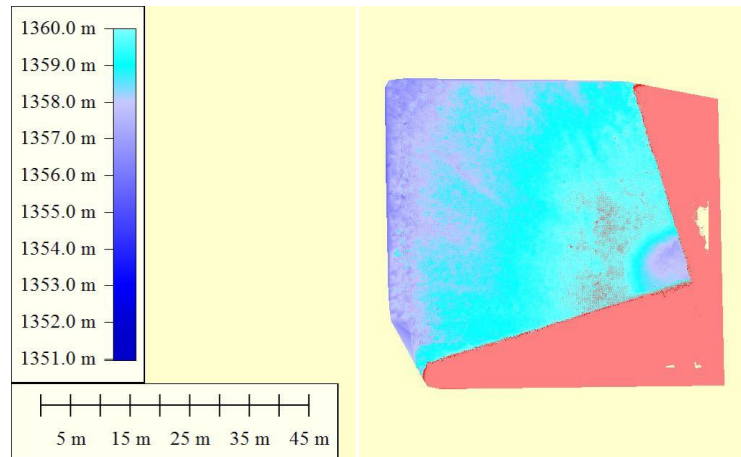


Figura 61: Fosa de erosión construida a partir de puntos relevados con técnica digital - $Q=50 \text{ m}^3/\text{s}$

3.3.1 Caudal de $75 \text{ m}^3/\text{s}$

Para este caudal, también se produjo el despegue del flujo en el salto esquí del canal moderador. No se depositó sedimento sobre el salto esquí y esto puede verse en detalle en la **Figura 62**.



Figura 62: Funcionamiento del Canal Moderador con $Q=75 \text{ m}^3/\text{s}$

La cota mínima alcanzada en la fosa que se forma aguas arriba de DM1 fue 1365,1 m s.n.m. Esta zona puede observarse en la **Figura 63**.



Figura 63: Detalle de zona aguas arriba de la obra con $Q=75 \text{ m}^3/\text{s}$

La variación de la cota mínima de la fosa, aguas abajo de la obra, durante el ensayo es la que se presenta en la Figura 64.

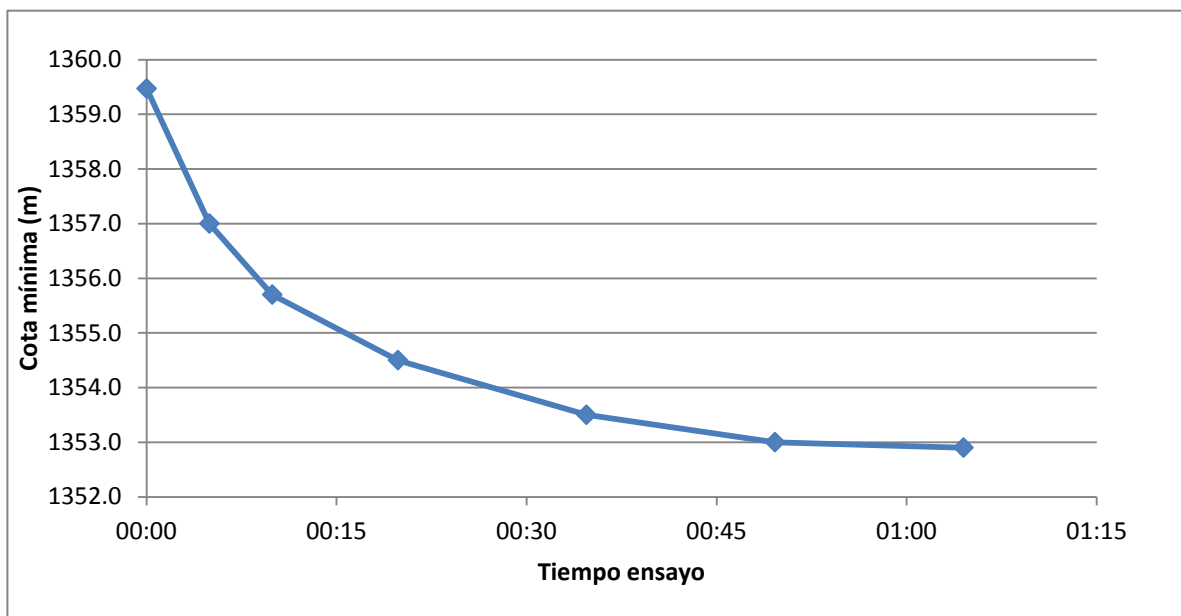


Figura 64: Variación de la cota mínima durante el ensayo – $Q=75 \text{ m}^3/\text{s}$

Al despegar el flujo del salto esquí, la cota mínima alcanzada fue de 1352,9 m s.n.m. (6,8m por debajo del nivel inicial del lecho) y se produjo a 12 m de distancia desde el pie del canal moderador. Un detalle de la fosa se observa en la Figura 65.



Figura 65: Fosa de erosión aguas abajo de CM con $Q=75 \text{ m}^3/\text{s}$

En la **Figura 66** se presenta las curvas de nivel generadas a partir de los puntos relevados con nivel óptico. En este caso, al igual que en el anterior, al producirse el despegue del flujo del salto esquí del CM, la cota mínima ocurre aguas abajo del pie del CM y no inmediatamente al pie de esta estructura ($H_{\text{mín}}$: 1352,91 m s.n.m. en prototipo). En la **Figura 67** se presenta la superficie 3D generada por la cámara Kinect.

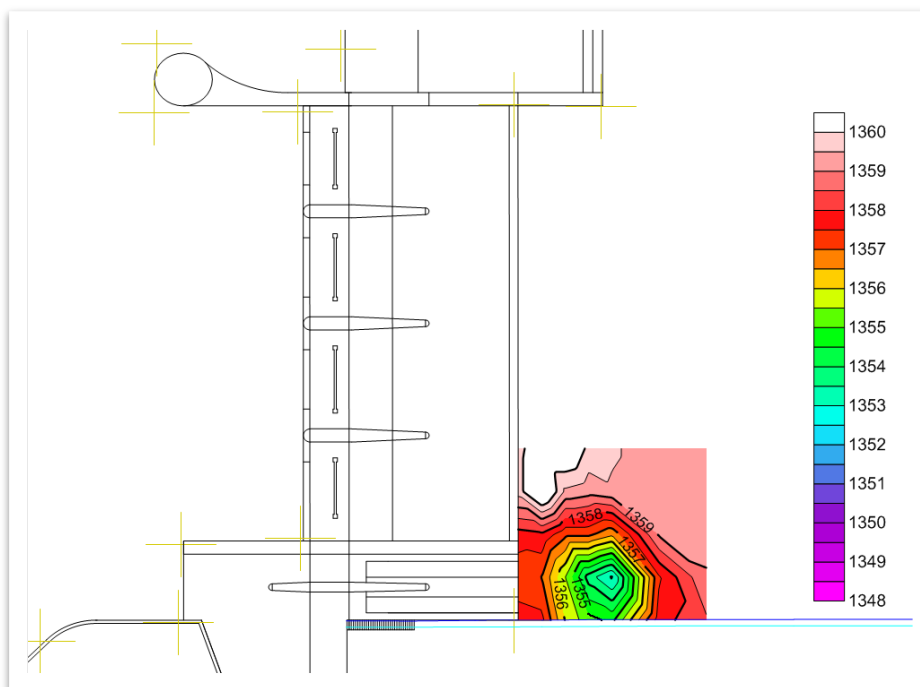


Figura 66: Fosa de erosión construida a partir de puntos relevados con técnica tradicional - $Q=75 \text{ m}^3/\text{s}$

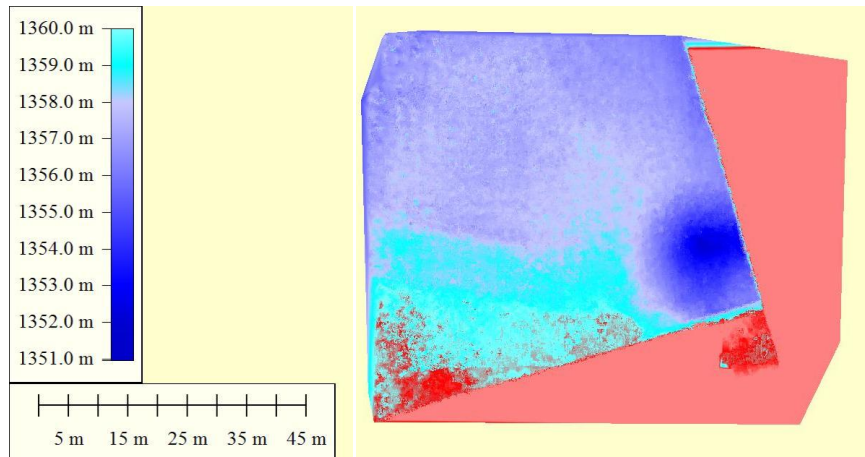


Figura 67: Fosa de erosión construida a partir de puntos relevados con técnica digital - $Q=75 \text{ m}^3/\text{s}$

3.3.2 Caudal de $100 \text{ m}^3/\text{s}$

Para este caudal, también se produjo el despegue del flujo en el salto esquí del canal moderador, tal como se observa en la **Figura 68**.



Figura 68: Funcionamiento del Canal Moderador con $Q=100 \text{ m}^3/\text{s}$

La cota mínima alcanzada en la fosa que se forma aguas arriba de DM1 fue 1363 m. Esta zona puede observarse en la **Figura 69**.



Figura 69: Detalle de zona aguas arriba de la obra con $Q=100 \text{ m}^3/\text{s}$

La variación de la cota mínima de la fosa aguas abajo de la obra durante el ensayo es la que se muestra en la **Figura 70**.

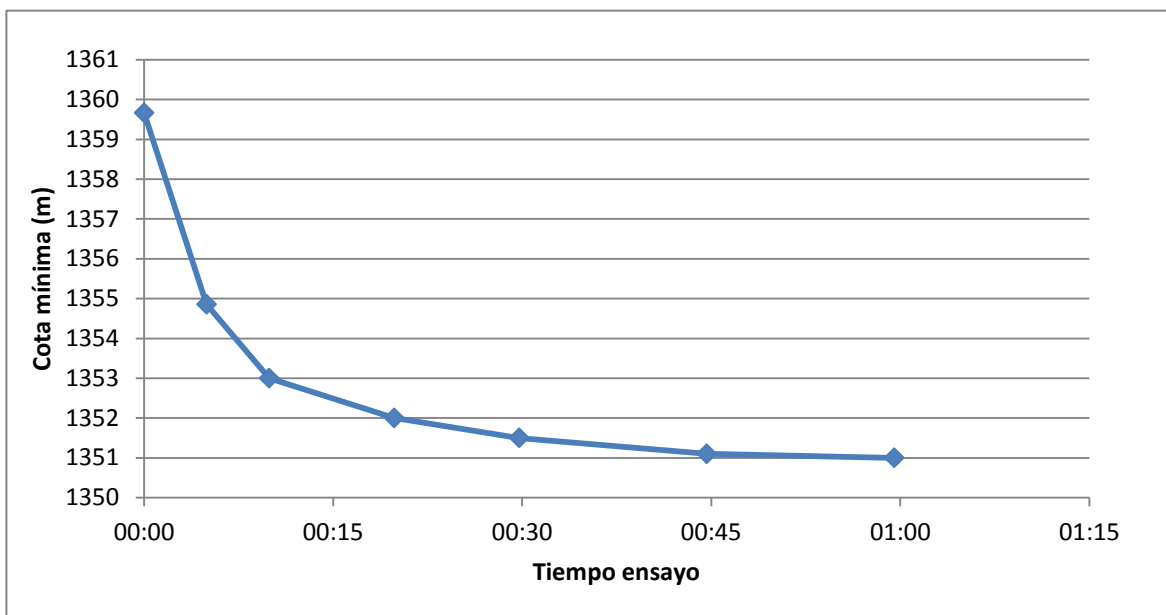


Figura 70: Variación de la cota mínima durante el ensayo – $Q=100 \text{ m}^3/\text{s}$

Al ir aumentando el caudal la fosa formada se aleja del pie del canal moderador. En este caso a cota mínima alcanzada fue de 1351 m s.n.m. (8,8 m por debajo del nivel inicial del lecho). La distancia a la cual se produjo desde el pie del CM fue de 14,5 m. Un detalle de la fosa se observa en la **Figura 71**.



Figura 71: Fosa de erosión aguas abajo de CM con $Q=100 \text{ m}^3/\text{s}$

En la **Figura 72** se presentan las curvas de nivel generadas a partir de los puntos relevados con nivel óptico. Aquí también se produce el despegue del flujo del salto esquí del CM, por lo que la cota mínima ocurre aguas abajo del CM (H_{\min} : 1350,96 m s.n.m. en prototipo) y no inmediatamente al pie de esta estructura. En la **Figura 73** se presenta la superficie 3D generada con datos de la cámara Kinect.

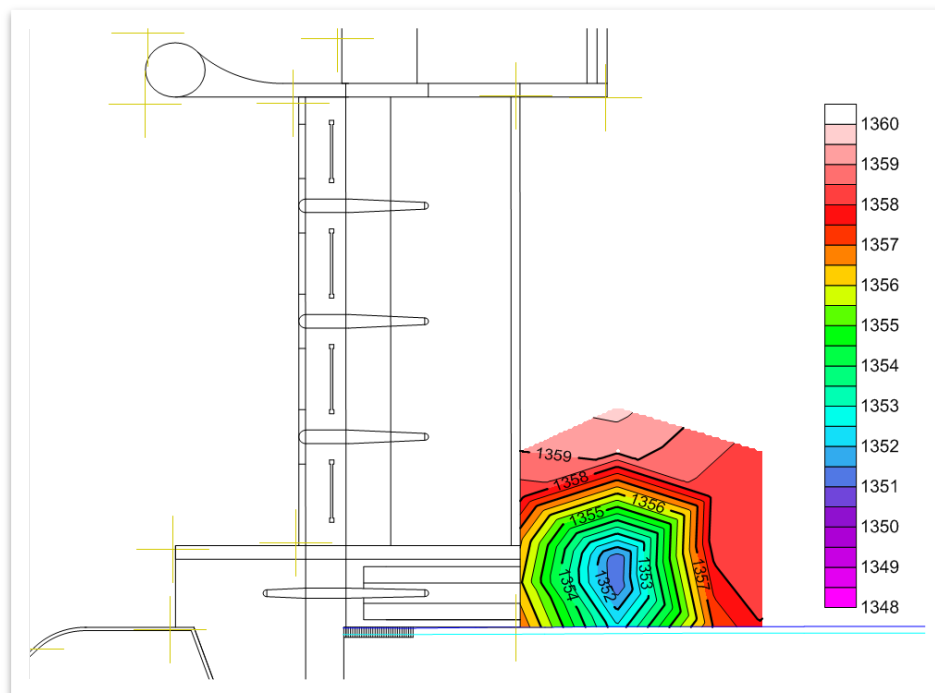


Figura 72: Fosa de erosión construida a partir de puntos relevados con técnica tradicional - $Q=100 \text{ m}^3/\text{s}$

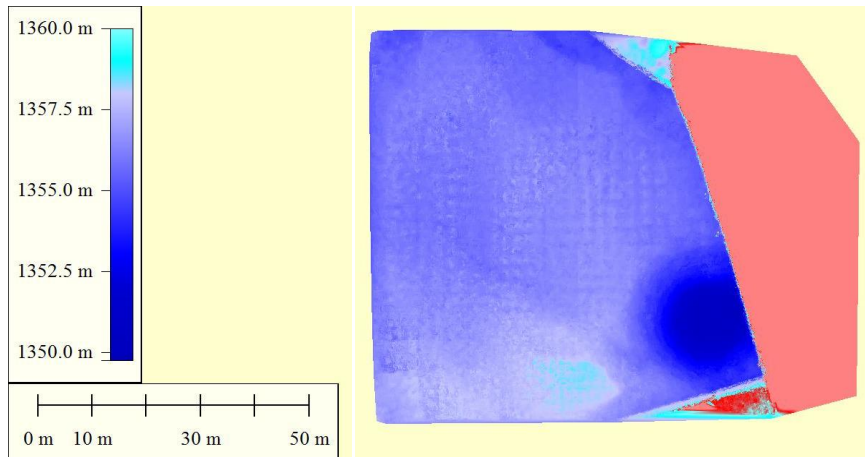


Figura 73: Fosa de erosión construida a partir de puntos relevados con técnica digital - $Q=100 \text{ m}^3/\text{s}$

3.3.3 Caudal de $150 \text{ m}^3/\text{s}$

Para este caudal, también se produjo el despegue del flujo en el salto esquí del canal moderador, tal como se observa en la **Figura 74**.



Figura 74: Funcionamiento del Canal Moderador con $Q=150 \text{ m}^3/\text{s}$

La cota mínima alcanzada en la fosa que se forma aguas arriba de DM1 fue 1363,1 m s.n.m. Esta zona puede observarse en la **Figura 75**.



Figura 75: Detalle de zona aguas arriba de la obra con $Q=150 \text{ m}^3/\text{s}$

La variación de la cota mínima de la fosa aguas abajo de la obra durante el ensayo es la que se presenta en la **Figura 76**.

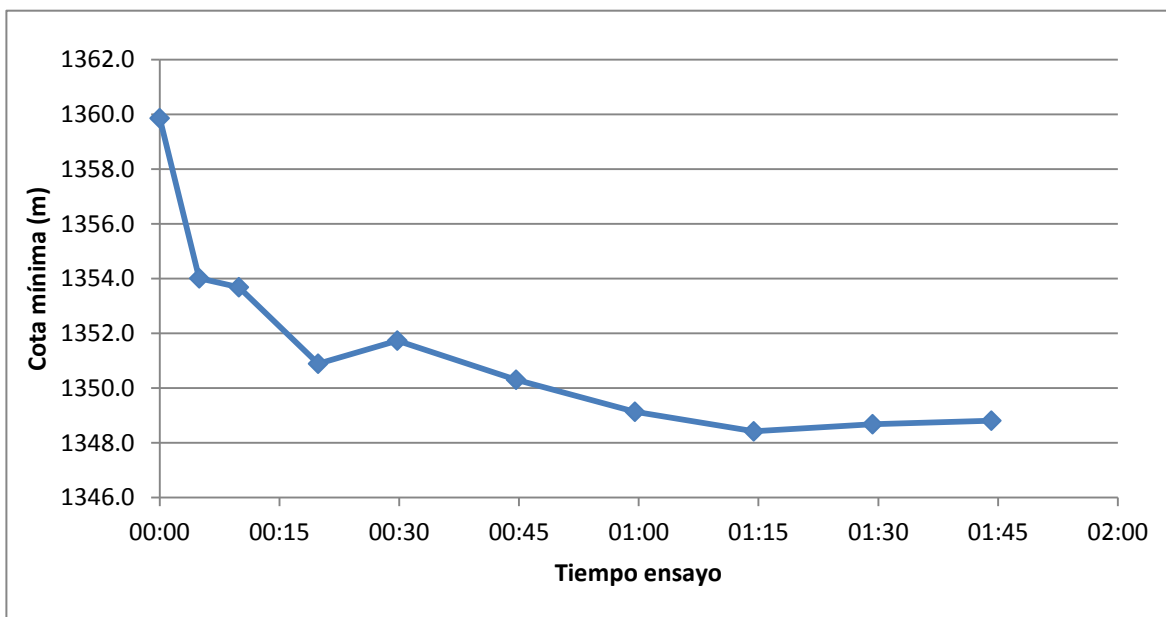


Figura 76: Variación de la cota mínima durante el ensayo – $Q=150 \text{ m}^3/\text{s}$

Al ir aumentando el caudal la fosa formada se aleja del pie del canal moderador. En este caso a cota mínima alcanzada fue de 1348,5 m s.n.m. (11,25 m por debajo del nivel inicial del lecho). La distancia a la cual se produjo desde el pie del CM fue de 17,6 m. Un detalle de la fosa se observa en la **Figura 77**.



Figura 77. Fosa de erosión aguas debajo de CM con $Q=150 \text{ m}^3/\text{s}$

En la **Figura 78** se presenta las curvas de nivel generadas a partir de los puntos relevados con nivel óptico. Aquí también la fosa ocurre aguas abajo del CM (y no inmediatamente al pie de la estructura) ($H_{\text{mín}}$: 1348,49 m s.n.m. en prototipo). En la **Figura 79** se presenta la superficie 3D generada con datos de la cámara Kinect.

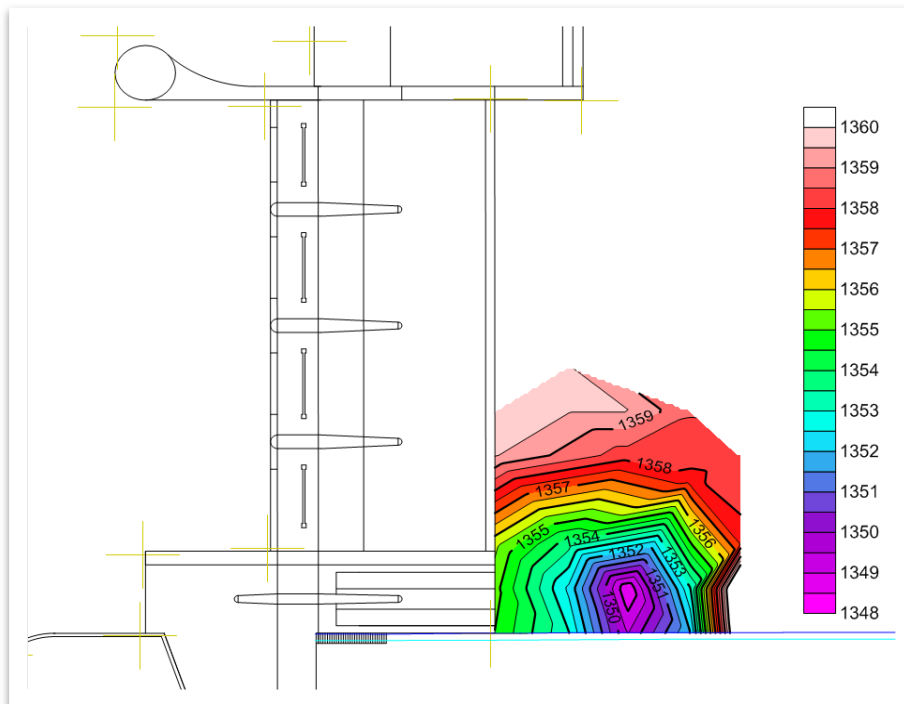


Figura 78: Fosa de erosión construida a partir de puntos relevados con técnica tradicional - $Q=150 \text{ m}^3/\text{s}$

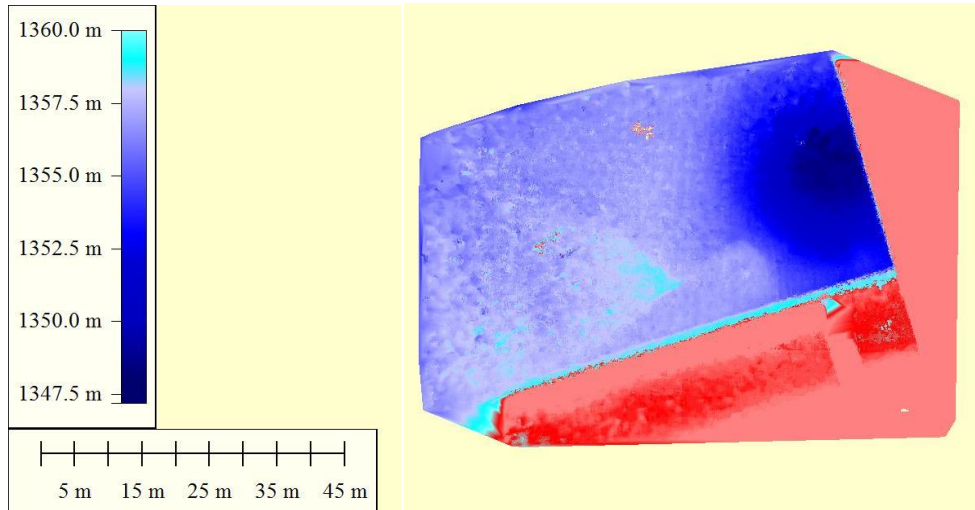


Figura 79: Fosa de erosión construida a partir de puntos relevados con técnica digital - $Q=150 \text{ m}^3/\text{s}$

3.4 Perfiles de las fosas de erosión

En la **Figura 80** se presenta un plano de planta del Dique Los Molinos donde se muestra la ubicación de los perfiles relevados para los distintos ensayos.

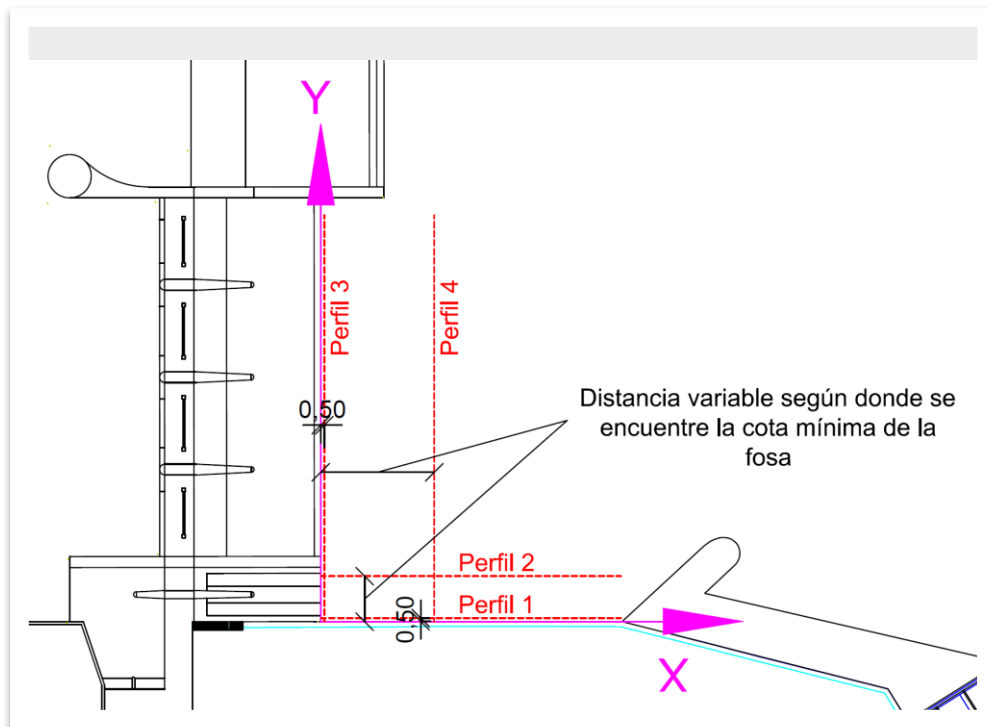


Figura 80: Ubicación de los perfiles de la fosa de erosión relevados para los distintos ensayos.

El Perfil 1 se realizó sobre la margen derecha del río y se presenta en la **Figura 81**.

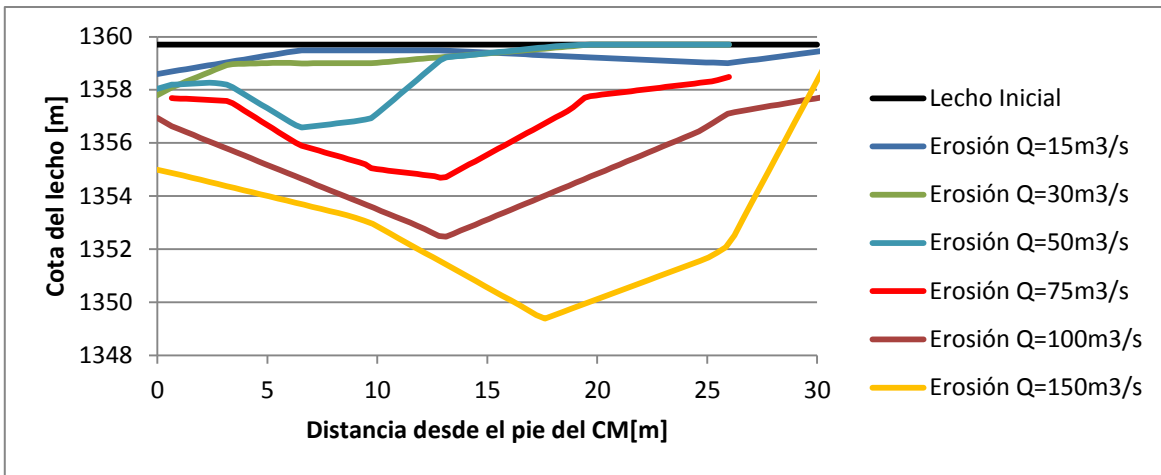


Figura 81: Perfil 1 de los diferentes ensayos realizados.

El Perfil 2 se realizó en coincidencia con la cota mínima de cada ensayo, entonces permite representar la envolvente de erosión de las diferentes fosas relevadas. Para los casos de 15 y 30 m³/s, el punto mínimo se desarrolló inmediatamente aguas abajo del CM (y se muestra en el Perfil 1); y es por ello que para ambos caudales no se realizó este perfil. El perfil para los caudales de 50, 70, 100 y 150 m³/s se presenta en la **Figura 82** y **Figura 83**.

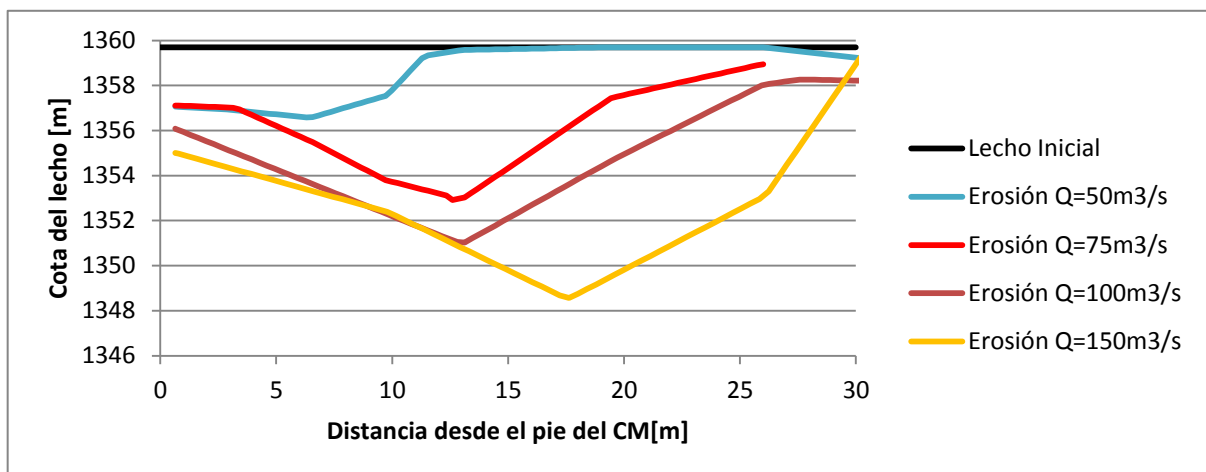


Figura 82: Perfil 2 de los diferentes ensayos realizados con técnica tradicional.

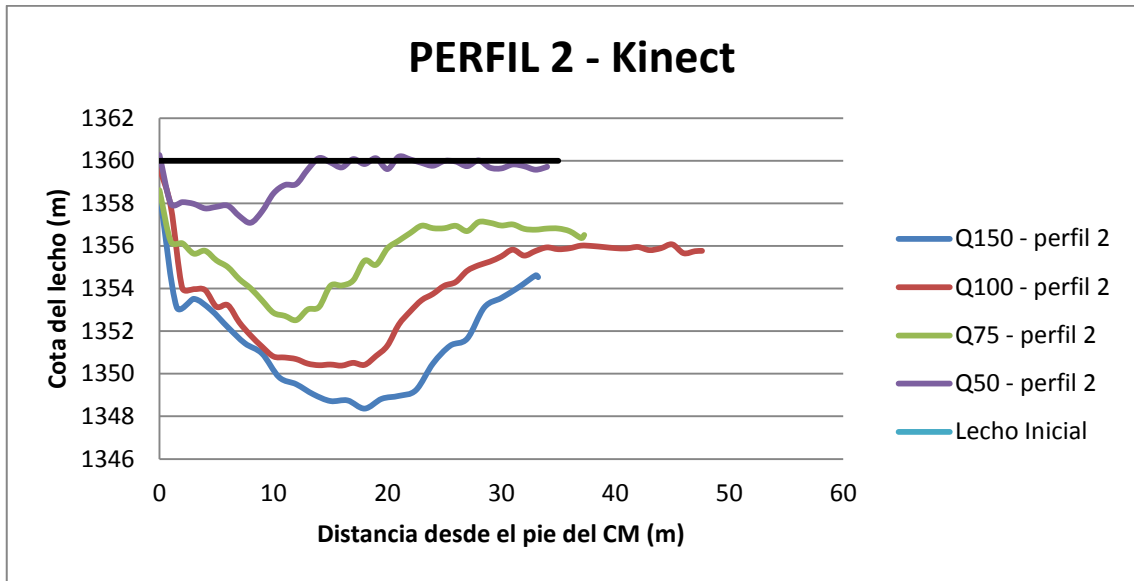


Figura 83. Perfil 2 de los diferentes ensayos realizados con técnica digital.

El Perfil 4 se realizó transversalmente al flujo por donde pasa la cota mínima de cada ensayo, entonces al igual que para el caso del perfil 2 no se realizó para los 2 caudales menores donde no despega el flujo pero si para los demás. El perfil para los caudales de 50, 70, 100 y 150 m³/s se presenta en la Figura 84 y Figura 85.

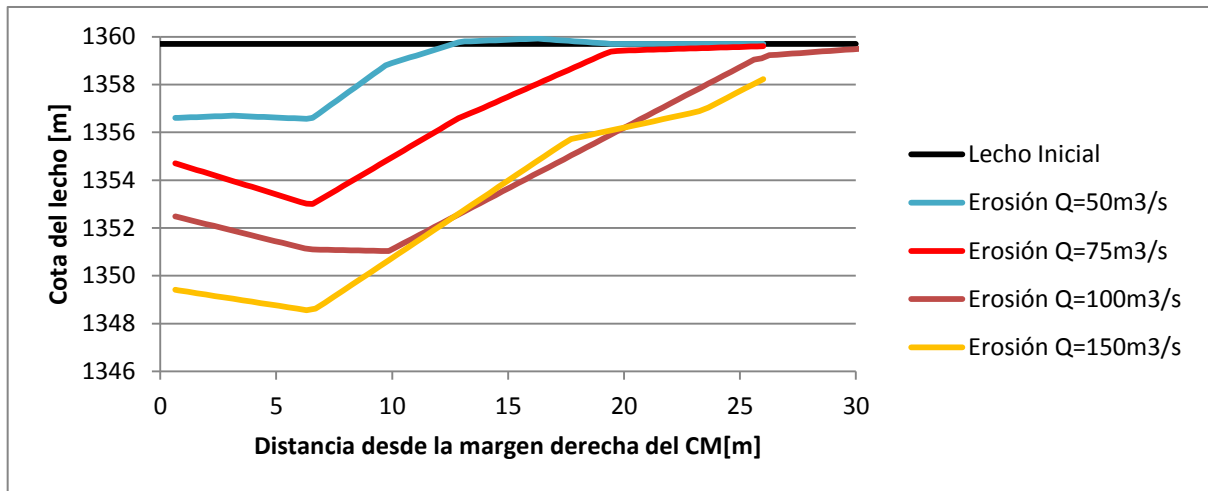


Figura 84: Perfil 4 de los diferentes ensayos realizados con técnica tradicional

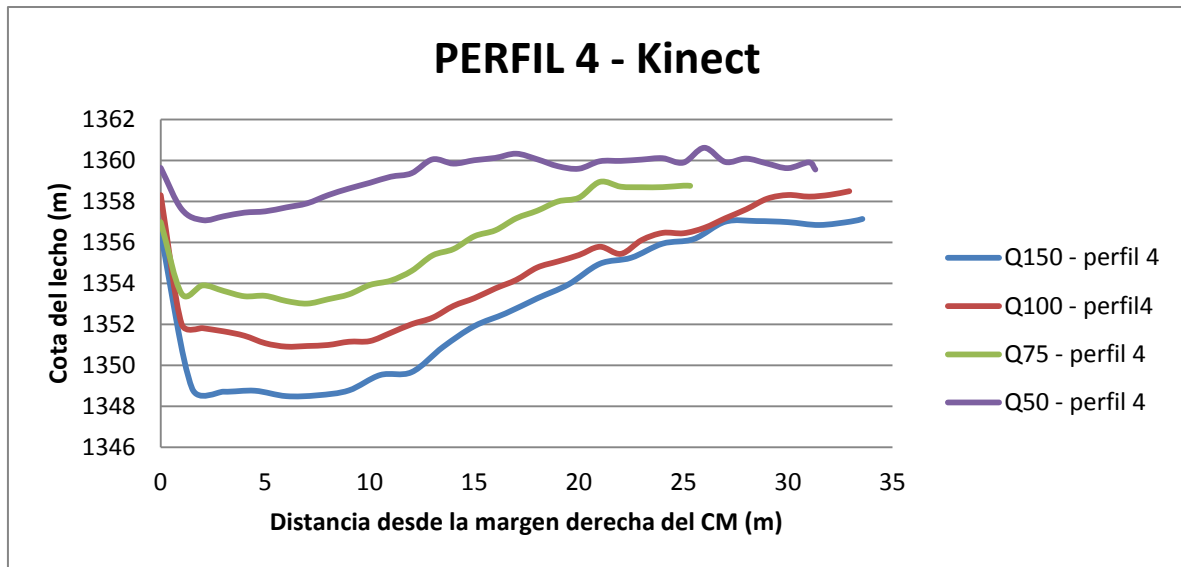


Figura 85. Perfil 4 de los diferentes ensayos realizados con técnica digital

3.5 Resumen de los principales resultados obtenidos

A continuación, en la Tabla 5 y la **Figura 86** se presentan los principales resultados obtenidos durante el desarrollo de esta etapa de trabajo.

Tabla 5: Resumen de los ensayos realizados con técnica tradicional.

Caudal [m ³ /s]	Cota mínima de erosión aguas debajo de CM [m]	Profundidad de erosión respecto al nivel de lecho inicial [m]	Distancia donde ocurre la cota mín. desde el pie del CM [m]	Cota mínima aguas arriba de DM1 [m]
15	1358,6	1,14	0,0	1366,3
30	1357,8	1,94	0,0	1365,8
50	1356,55	3,20	6,5	1364,9
75	1352,91	6,83	12,0	1365,1
100	1350,96	8,78	13,0	1363
150	1348,49	11,25	17,6	1363,1

Tabla 6. : Resumen de los ensayos realizados con técnica digital.

Máxima erosión con técnica digital			
Caudal [m3/s]	Cota mínima de erosión aguas debajo de CM [m]	Profundidad de erosión respecto al nivel de lecho inicial [m]	Distancia donde ocurre la cota mín. desde el pie del CM [m]
Q15	1358.27	1.73	0
Q30	1358.53	1.47	0
Q50	1357.093	2.907	8
Q75	1353.018	6.982	12
Q100	1350.91	9.09	16
Q150	1348.361	11.639	18

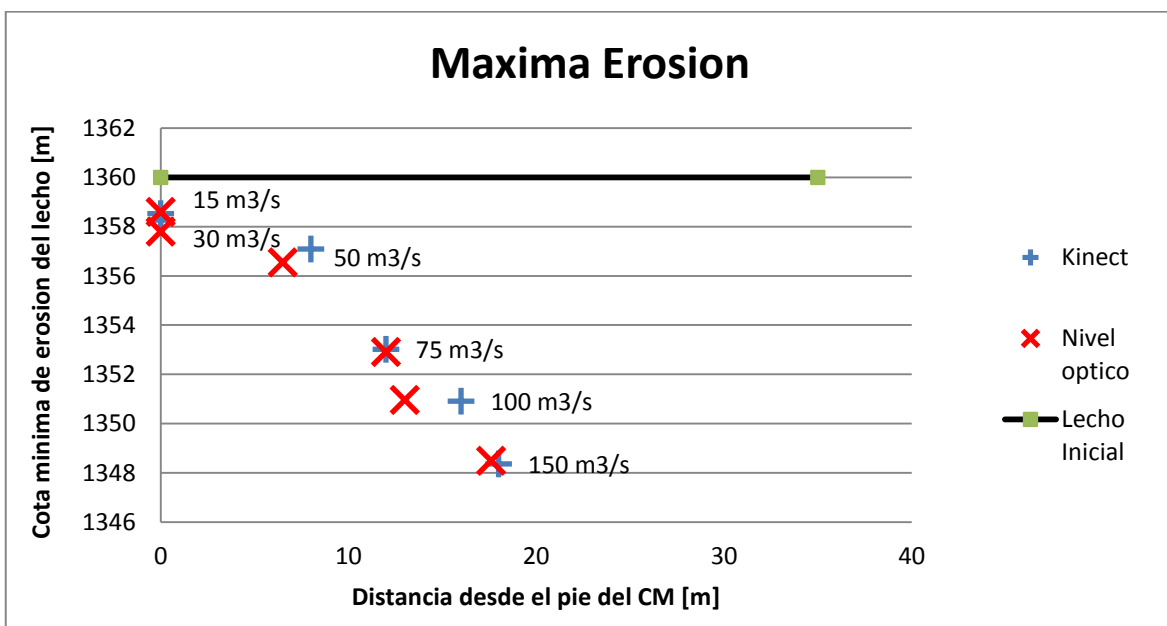


Figura 86: Ubicación de las cotas mínimas relevadas en los diferentes ensayos

A partir de los gráficos precedentes de erosiones se puede arribar a las siguientes conclusiones asociadas al nuevo perfil del CM evaluado:

- + Para caudales pequeños menores a 45 m³/seg no se produce el salto del agua en el salto esquí produciéndose erosiones que no preocupan para la estabilidad de la obra en especial del muro colado por debajo del salto.
- + Para caudales mayores siendo el máximo valor analizado de 150 m³/seg se produce el salto del agua con una distancia de 18,5 m, distancia menor a la que se generaba con el viejo salto esquí produciéndose una fosa de erosión de 11,5 m de profundidad. Básicamente esta menor distancia de despegue del flujo en el salto esqui nuevo se traduce (en obra) en un ahorro de material en la plataforma que se construiría donde justamente se encuentra la fosa de erosión al pie del salto.

Con respecto a los resultados obtenidos con la nueva técnica digital (no intrusiva), si lo comparamos con la tradicional (intrusiva), de acuerdo a las Tabla 7 y Tabla 8 se observó que los

valores relevados presentaron una diferencia promedio de 0,31 m en prototipo para las mediciones de elevaciones y de 0,82 m para las mediciones en prototipo de distancias en planta.

Tabla 7. Cota mínima de erosión aguas abajo de CM [m]

Caudal [m ³ /s]	Cota máxima de erosión medida con técnica tradicional (m s.n.m.)	Cota máxima de erosión medida con técnica digital (m s.n.m.)	error abs (m)
15	1358,6	1358,27	0,33
30	1357,8	1358,53	0,73
50	1356,55	1357,093	0,54
75	1352,91	1353,018	0,11
100	1350,96	1350,91	0,05
150	1348,49	1348,36	0,13
		promedio	0,31

Tabla 8 Distancia donde ocurre la cota mínima desde el pie del CM [m]

Caudal [m ³ /s]	Distancia máxima de despegue medida con técnica tradicional (m s.n.m.)	Distancia máxima de despegue medida con técnica digital (m s.n.m.)	error abs (m)
15	0	0	0
30	0	0	0
50	6,5	8	1,5
75	12	12	0
100	13	16	3
150	17,6	18	0.4
		promedio	0,82

El error promedio que se registró en la cota mínima de erosión aguas abajo del CM es 31 cm que si lo llevamos al modelo son 0,50 cm. Para el caso de la distancia donde ocurre la cota mínima medida desde el pie del CM se puede ver que el error promedio es 82 cm, si lo llevamos a escala del modelo representa un error de 1,25 cm. Ambos valores obtenidos se consideran aceptables considerando que se añade una mejora en la resolución espacial del relevamiento realizado con la técnica digital respecto de la técnica tradicional.

CAPITULO IV

VALIDACIÓN DEL USO DE LA CÁMARA RGB-S POR CONTROL DE ESTRUCTURAS DEL DIQUE Y MEDICIÓN DE FORMAS DE FONDO

CAPITULO IV: CONTROL DE ESTRUCTURAS DEL DIQUE Y MEDICIÓN DE FORMAS DE FONDO

4 Introducción

En la presente sección se analiza la precisión de la técnica propuesta para representar estructuras del dique. Las mediciones de forma de fondo se realizaron con el objetivo de verificar y optimizar las consignas de operación de las estructuras de control, con el fin de regular los procesos hidrosedimentológicos presentes en las proximidades de la presa aguas arriba.

4.1 Control de estructuras del dique

En las **Figura 87**, se muestra un perfil longitudinal sobre el muro de encauzamiento. Se puede observar que la representación es precisa, conservando la forma general de la estructura, pero se advierte la presencia de algunas fluctuaciones y pequeños picos. Los mismo se encuentran donde se producen cambios bruscos de profundidad tal como habíamos analizado en el capítulo II. Esto indica que una diferencia de 0,3 m en prototipo o equivalentemente 4.61 mm en modelo, condición que se mantiene dentro del margen esperado de 5 mm, posicionando la cámara a una distancia menor a 1,5 m. Se observen los respectivos cortes en **Figura 88**. Corte A-A **Figura 89**. Corte B-B **Figura 90**. Corte C-C.

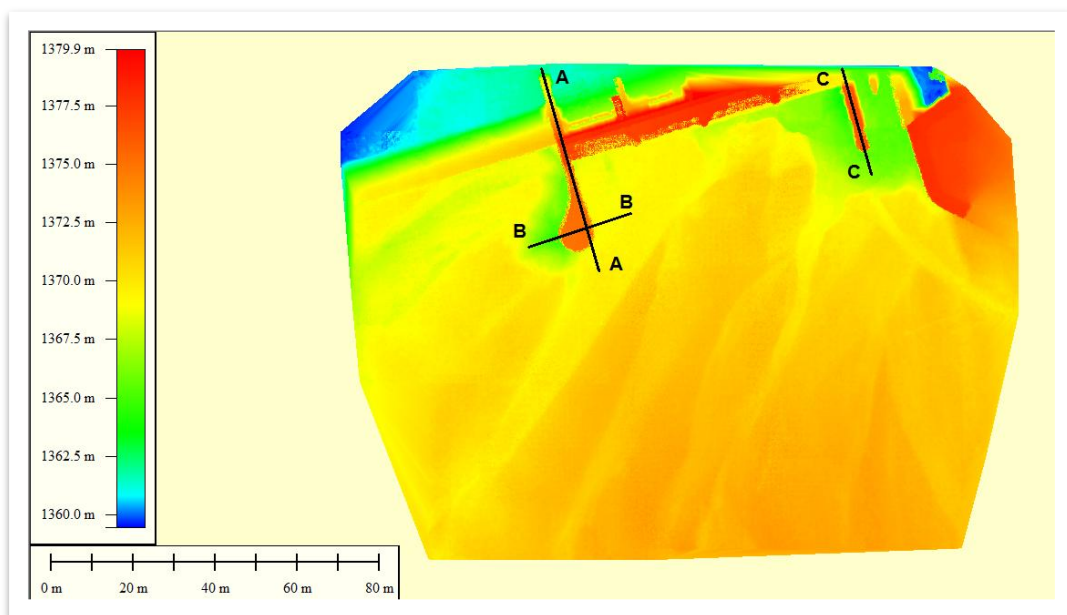


Figura 87. Área aguas arriba del dique móvil. Modelo digital de elevaciones

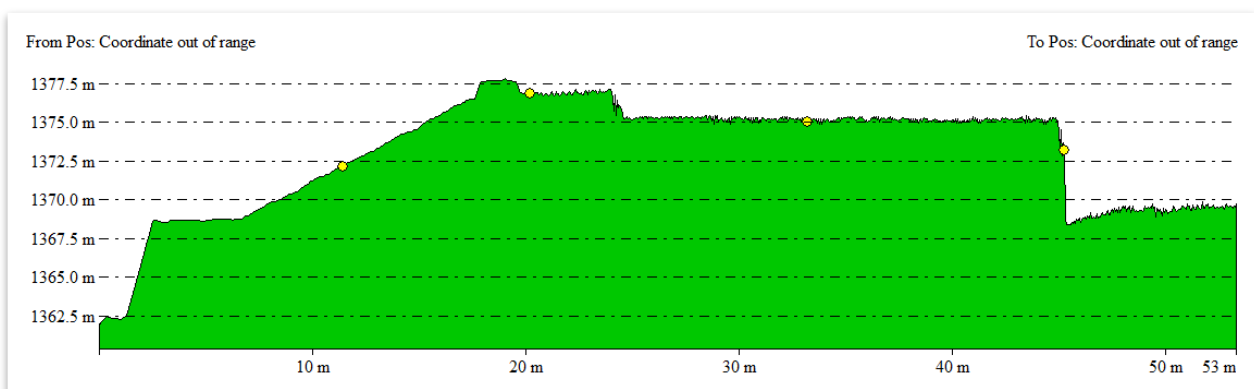


Figura 88. Corte A-A

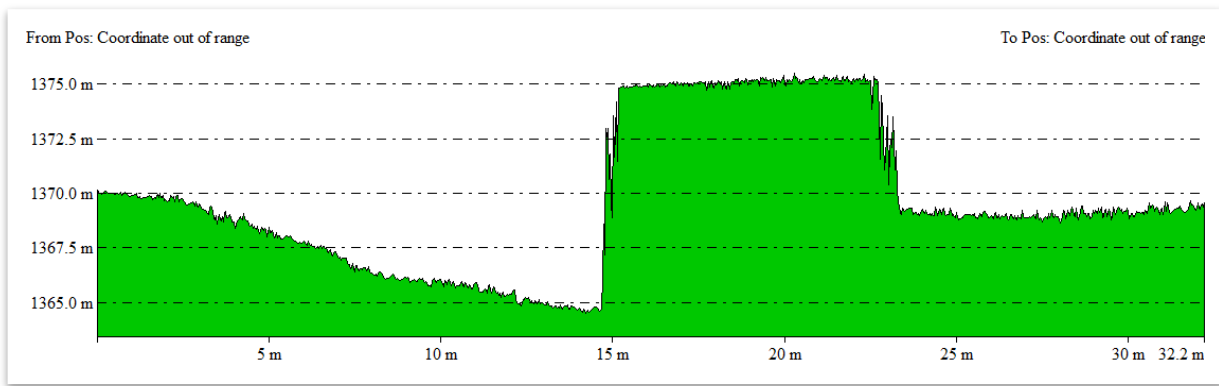


Figura 89. Corte B-B

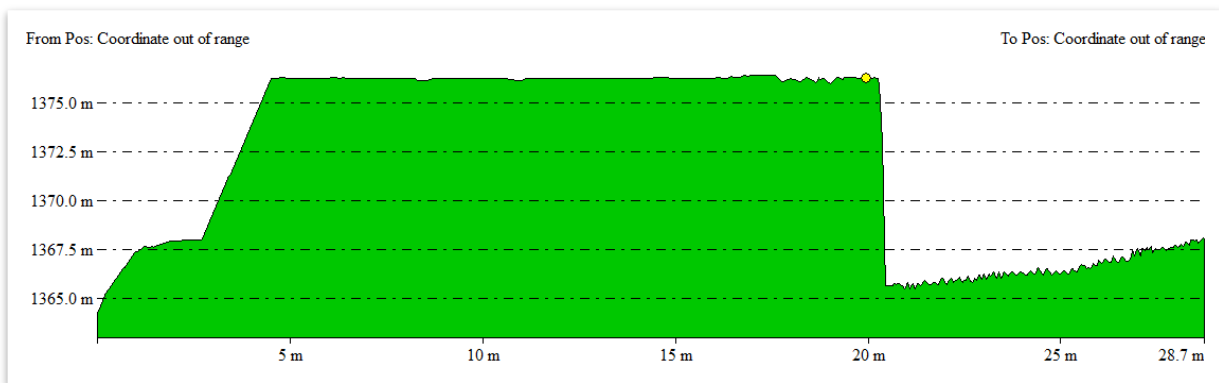


Figura 90. Corte C-C

4.2 Medición de formas de fondo

En este ensayo se relevaron las canalizaciones formadas debido a la apertura de las compuertas del dique móvil y el canal moderador. El análisis de los canales que se formaron sobre la superficie del modelo, debido a las llamadas que se realiza con la operación de las estructuras de control, requiere relevar una gran cantidad de puntos y a la vez cubrir grandes superficie. La técnica digital mediante la utilización de la cámara Kinect, aborda esta tarea de forma mucha más eficiente y precisa que la metodología tradicional.

A continuación en la **Figura 91** y **Figura 92** muestran los mapas de elevación en escala prototipo, generados a partir del área de modelación aguas arriba del dique para el ensayo hidráulico realizado para un caudal de 600 m³/s, que permitió evaluar las formas de fondo. Como punto de referencia se utilizo la parte superior del dique móvil, con cota igual a 1377.77 m s.n.m.

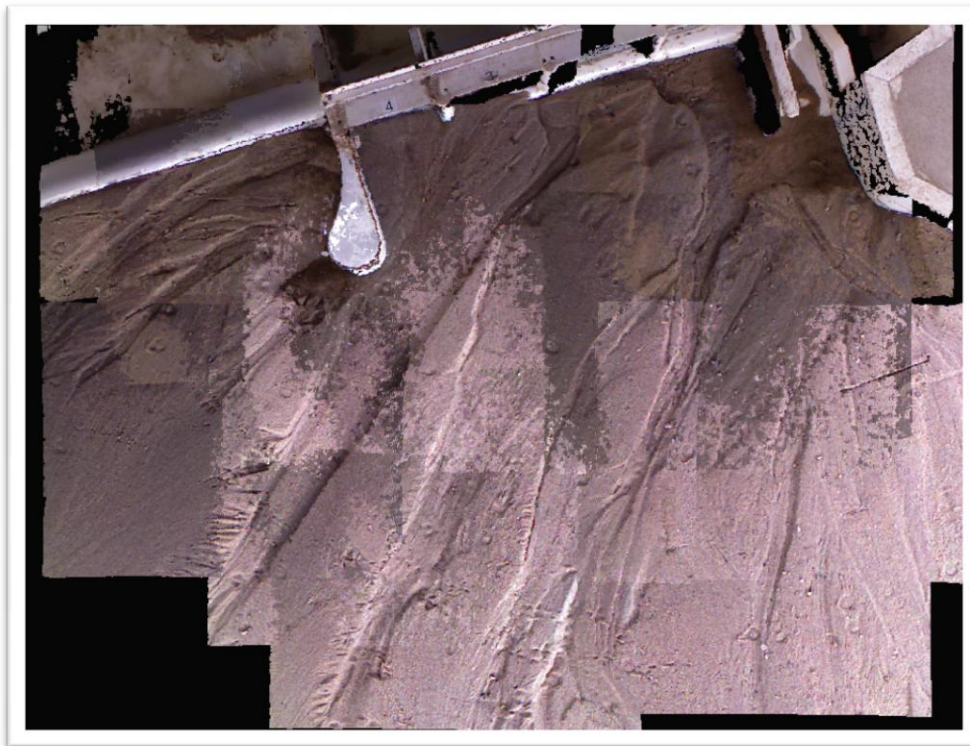


Figura 91. Área aguas arriba del dique móvil. Imagen RGB

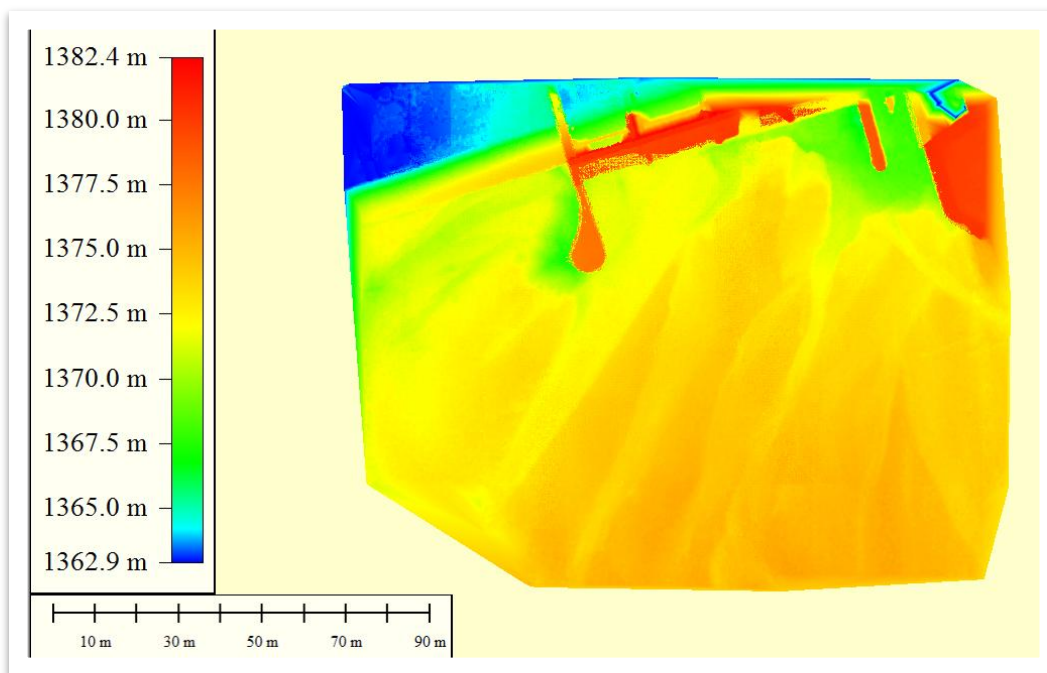


Figura 92. DEM generado por sensor KINECT

Con la técnica tradicional se relevan puntos equidistantes sobre varios perfiles transversales y se añade la medición de puntos extras que se consideran representativos en la definición de las canalizaciones. Para obtener una aproximación global de las formas de fondo, se debe generar un modelo 3D utilizando métodos de interpolación, como se muestra en la **Figura 93**.

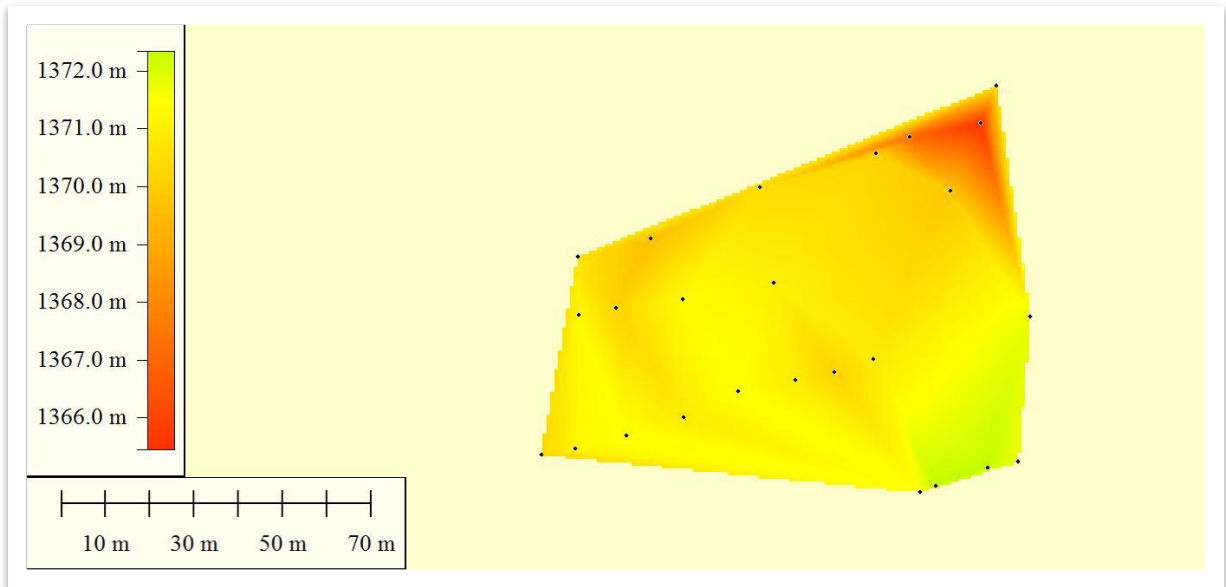


Figura 93. DEM generado utilizando interpolación a partir de los puntos medidos con nivel óptico

En la **Figura 94**. Superposición de DEM se presenta la superficie generada por medio de interpolación a partir de puntos medidos con nivel óptico y el modelo 3D relevado con la Kinect sobre la misma zona.

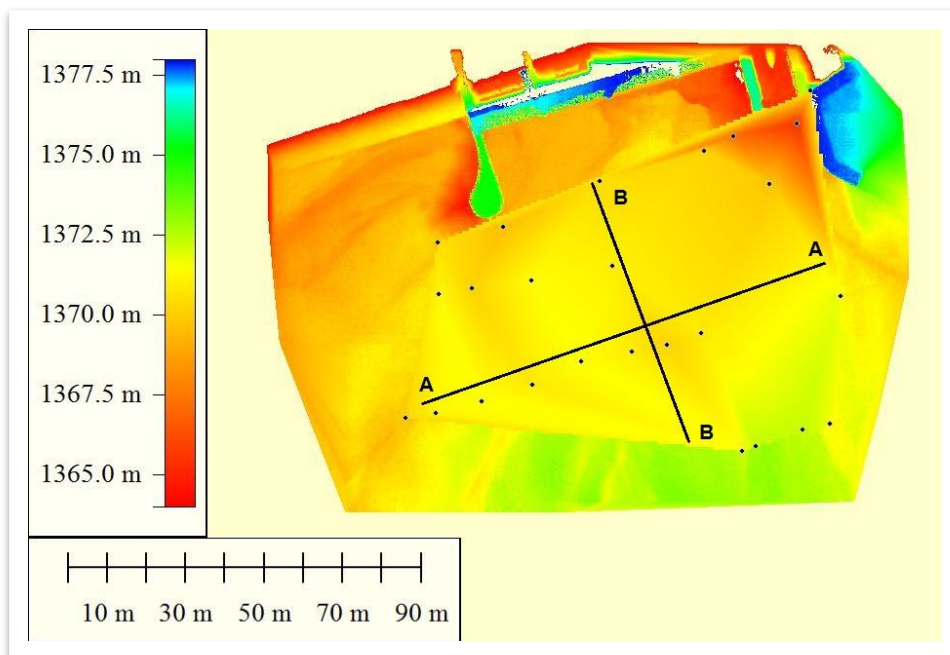


Figura 94. Superposición de DEM

Con el objetivo de analizar la fidelidad de la aproximación entre ambas técnicas, se evaluó la diferencia entre la superficie medida con la técnica digital y la misma superficie medida con la técnica tradicional. Sobre esta superficie resultante se trazó un perfil transversal y se obtuvieron las diferencias resultantes entre ambas técnicas. Los perfiles transversales se presenta en las **Figura 95** y **Figura 96**, donde se distinguen zonas con diferencias de elevación (con respecto a los valores en prototipo) dentro del intervalo 0.5 a 1.0 m. Este intervalo representa en el modelo 7.7 a 15.3 mm.

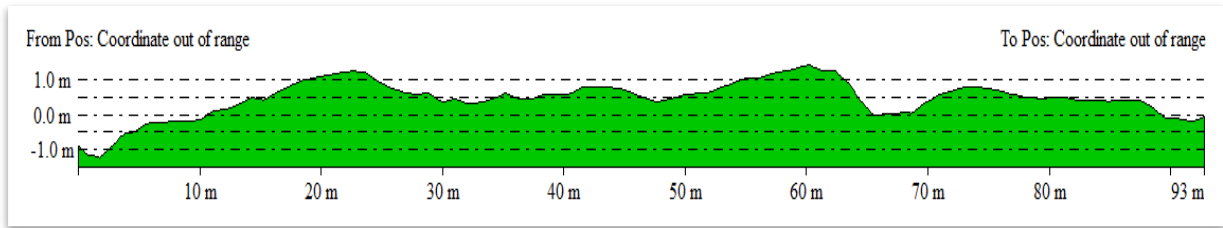


Figura 95. Perfil transversal A-A

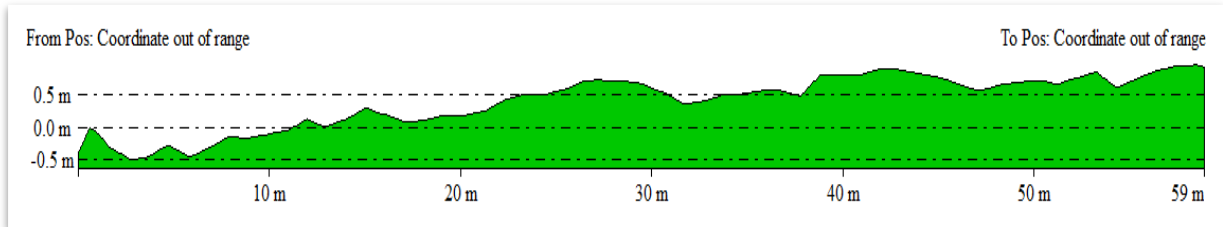


Figura 96. Perfil transversal B-B

El análisis muestra que existen dentro de las áreas estudiadas, zonas donde las canalizaciones relevadas con la técnica tradicional han sido suavizadas por la interpolación realizada en base a las mediciones con nivel óptico y mira milimétrica.

Así, la discrepancia entre los distintos modelos 3D es demasiado alta, lo que refleja que la aproximación por interpolación no representa de forma realista la topobatimetría. Cabe recalcar, que es posible disminuir el error presente en la superficie interpolada, incrementando la cantidad de puntos relevados con la técnica tradicional pero a costo de elevar el tiempo de medición.

El método tradicional implica mayor tiempo de medición para relevar áreas extensas con la densidad de puntos necesaria para estudios de formas de fondo por otra parte es laborioso cuando se deben realizar ensayos consecutivos y secuenciales asociados a aspectos complementarios de un estudio global.

Por este motivo, la técnica Kinect permite obtener una mejor representación realista del lecho erosionado con bajo costo-tiempo de medición, resolviendo así la problemática asociada a ensayos a fondo móvil.

CAPITULO IV

CONCLUSIONES

5 CONCLUSIONES

En este trabajo se continuó con la aplicación y desarrollo de la técnica digital propuesta en el Laboratorio de Hidráulica (FCEfyN-UNC) para medir la erosión en modelos físicos a fondo móvil en escala reducida, utilizando una cámara RGB-D Microsoft Kinect.

Los resultados experimentales alcanzados arribaron a que el error aleatorio de medición de la profundidad aumenta linealmente con la distancia al sensor y que resolución espacial disminuye cuadráticamente con la distancia del sensor a la superficie de referencia. Cada imagen adquirida por el sensor de profundidades de la cámara RGB-D, es una medición con alta resolución espacial de la topobatemetría de un ensayo hidráulico a fondo móvil. El tamaño de pixel varía entre 0,9 y 2,5 mm para un rango de distancias entre sensor y superficie de 0,5 a 1,5 m respectivamente, asociados a precisiones entre 0,9 a 1,1 mm.

Con respecto al nuevo perfil evaluado para el canal moderador, y en base a los valores medidos de erosiones aguas abajo se concluye que para caudales entre 45 y 150 m³/s se produce el salto del perfil del flujo con una distancia máxima de 18,5 m en prototipo. Esta distancia resultó menor a la que se generaba con el viejo salto esquí produciéndose una fosa de erosión de 11,5 m de profundidad. Por lo que el nuevo perfil del CM presenta un mejor comportamiento hidráulico en base a alejar las zonas críticas de la estructura.

Con respecto a las mediciones realizadas con la técnica digital analizada (no intrusiva), si lo comparamos con la tradicional (intrusiva), se observó que los valores obtenidos presentaron una diferencia promedio de 0,31 m para las mediciones en prototipo de elevaciones y de 0,82 m para las mediciones en prototipo de distancias en planta.

La diferencia entre los modelos digitales de elevaciones generados con la técnica tradicional y la técnica digital resultó de 1 m en prototipo y 15,3 mm en modelo.

Es importante destacar que esta moderna técnica digital exhibe una serie de ventajas frente a la técnica tradicional. Se resaltan dos aspectos que mejoran utilizando esta técnica digital, los que se asocian a la interacción con el medio y a las facilidades tecnológicas que esta técnica aporta. El primero se debe a la capacidad que presenta la técnica digital propuesta para realizar mediciones no intrusivas, es decir, que no altera la condición resultante del ensayo hidráulico. Por otro lado, el sistema propuesto presenta beneficios en la adquisición de datos porque mejora significativamente la resolución espacial del área relevada, a la vez que permite registrar áreas extensas y disminuir el tiempo de medición para cada escenario ensayado.

Los resultados alcanzados en este trabajo se presentaron y aceptaron para su difusión en la publicación de la Revista de la FCEfyN de la UNC, en la segunda edición. (Ver Anexo)

Además se presenta en el Anexo un manual con Instrucciones en el procedimiento para la captura y procesamiento de los datos con la cámara KINECT.

6 BIBLIOGRAFÍA

[1] Bellino, N. (2013), Nuevo método de medición de erosión aplicado al modelo físico del Dique Los Molinos (Jujuy). Trabajo final de la carrera de Ingeniería Civil – Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina. Abril.

[2] Besl, P. J. y McKay, N. D. (1992), “A method for registration of 3-d shapes”. IEEE Trans. Pattern Annual. Mach. Intell., 14 (2): 239-256.

[3] Eder, M. (2012), Diseño, construcción y calibración del modelo físico – Dique Los Molinos (Jujuy). Trabajo final de la carrera de Ingeniería Civil – Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – Universidad Nacional de Córdoba – Córdoba, Argentina. Diciembre.

[4] Fischler, M. A. y Bolles, R. C. (1981), “Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography”. ACM Digital Library, Association for Computing Machinery Commun. ACM, 24 (6): 381-395.

Freedman xxxxxx (2010)

[5] Laboratorio de Hidráulica (2012), Modelación física tridimensional del Dique Los Molinos, provincia de Jujuy. Segundo Informe Técnico a UTE Roggio-Cartellone. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba. Diciembre.

[6] MICROSOFT (2010), “KINECT” tomado de <http://www.xbox.com/en-us/kinect/> (08 junio 2012).

[7] Sánchez Aimar E. (2013), Software para medición de erosión y sedimentación en modelos físicos por medio de relevamiento digital de superficies. Trabajo final de la carrera de Licenciatura en Ciencias de la Computación – Facultad de Astronomía, Matemática y Física – Universidad Nacional de Córdoba – Córdoba, Argentina. Diciembre.

[8] WIKIPEDIA (2012), MICROSOFT KINECT, tomado de <http://es.wikipedia.org/wiki/Kinect> (08 junio 2012).

[9] Universidad de Twente, 2010

ANEXO

COMANDOS

```
lh@LH-PC:~$ cd KINECT2014/software-para-medicion-de-erosion-v2/build/source/
lh@LH-PC:~/KINECT2014/software-para-medicion-de-erosion-v2/build/source$
./SecuencialRegistrationDemoWithInteraction.out -o cubo0.5 -b -m camera
Camera parameters fx=525.000000 fy=525.000000 cx=319.500000 cy=239.500000
Initializing generator...OK
Starting to generate...OK
Opening device...OK
Starting registration... OK
Running visualization... OK
Registering cloud 1
# features found : 326
auto configuration running...
auto configured parameters : radius : 1.296482, min_distance 0.259297
manual configured parameters :
window_size : 5, extra_edges : 2, min_num_inliers : 45
, min_num_extra_inliers : 25
> Saving cubo0.5/backup/00000.pcd [done, 45 ms : 307200 points]
Successfully aligned...
Updating registration visualization...
Updating last cloud visualization...
Updating registration visualization...
applying global optimization
Total aligned 1 / 1 clouds.

> Saving cubo0.5/registration/00000.pcd [done, 48 ms : 307200 points]
```

COMANDOS PARA VISUALIZAR LAS IMAGENES TOMADAS

```
lh@LH-PC: cd KINECT2014/software-para-medicion-de-erosion-
v2/build/source/ensayo26022014/registration
lh@LH-PC:~/KINECT2014/software-para-medicion-de-erosion-
v2/build/source/ensayo26022014/registration$ pcl_viewer *.pcd
lh@LH-PC:~/KINECT2014/software-para-medicion-de-erosion-
v2/build/source/ensayo26022014/registration$ pcl_viewer *.pcd -use_point_picking
```

ayudas

| Help:

p, P : switch to a point-based representation
 w, W : switch to a wireframe-based representation (where available)
 s, S : switch to a surface-based representation (where available)

j, J : take a .PNG snapshot of the current window view
 c, C : display current camera/window parameters
 f, F : fly to point mode

e, E : exit the interactor
 q, Q : stop and call VTK's TerminateApp

+/- : increment/decrement overall point size
 +/- [+ ALT] : zoom in/out

g, G : display scale grid (on/off)
 u, U : display lookup table (on/off)

r, R [+ ALT] : reset camera [to viewpoint = {0, 0, 0} -> center_{x, y, z}]

ALT + s, S : turn stereo mode on/off
 ALT + f, F : switch between maximized window mode and original size

l, L : list all available geometric and color handlers for the current actor map
 ALT + 0..9 [+ CTRL] : switch between different geometric handlers (where available)
 0..9 [+ CTRL] : switch between different color handlers (where available)

SHIFT + left click : select a point

x, X : toggle rubber band selection mode for left mouse button

COMANDOS PARA ESCALAR UNA IMAGEN

```
lh@LH-PC:~/KINECT2014/software-para-medicion-de-erosion-v2/build/source
lh@LH-PC:~/KINECT2014/software-para-medicion-de-erosion-v2/build/source$
./ScalerDemo.out
```

Set all required parameters.

Options:

-h [--help]	produce help message
-i [--input] arg	set cloud_1..cloud_n [required]
-o [--output] arg	set output cloud [required]
-s [--scale] arg	set scale [required]

```
-r [ --real_base ] arg      set real base [required]
-m [ --model_base ] arg    set model base. [if not seted, use visualizer
                           to pick a point]
-p [ --drop_border ] arg  (=2.5) border percent to be eliminated
-n [ --min_z ] arg        set min z bound
-x [ --max_z ] arg        set max z bound
```

```
lh@LH-PC:~/KINECT2014/software-para-medicion-de-erosion-v2/build/source$
./ScalerDemo.out -i ~/KINECT2014/software-para-medicion-de-erosion-
v2/build/source/ensayo26022014/registration/*.pcd -o ~/KINECT2014/software-para-
medicion-de-erosion-v2/build/source/ensayo26022014/registration/q75.pcd -s 65 -r 1372.5 -p
0 -n 0 -x 1.2
```

```
> Loading /home/lh/KINECT2014/software-para-medicion-de-erosion-
v2/build/source/ensayo26022014/registration/00001.pcd [done, 76 ms : 307200 points]
Available dimensions: x y z rgba
```

```
> Loading ...
```

```
> Loading /home/lh/KINECT2014/software-para-medicion-de-erosion-
v2/build/source/ensayo26022014/registration/00006.pcd [done, 43 ms : 307200 points]
Available dimensions: x y z rgba
```

Creating visualizer... Select a point with shift + left click.

Are you sure you want to set model_base : 0.822058. Y/N ? Y

```
> Computing [done, 2338 ms : 1499663 points]
```

```
> Saving /home/lh/KINECT2014/software-para-medicion-de-erosion-
v2/build/source/ensayo26022014/registration/q75.pcd [done, 476 ms : 1499663 points]
```

COMANDOS PARA TRANSFORMAR A ARCHIVO ASCII

```
lh@LH-PC:~$ cd KINECT2014/software-para-medicion-de-erosion-
v2/build/source/ensayo260220143/registration
```

```
lh@LH-PC:~/KINECT2014/software-para-medicion-de-erosion-
v2/build/source/ensayo260220143/registration$
```

```
pcl_convert_pcd_ascii_binary q75.pcd
q75.txt o
```

Loaded a point cloud with 1499663 points (total size is 23994608) and the following channels: x y z rgba

Saving file q75.txt as ASCII.

```
lh@LH-PC:~/KINECT2014/software-para-medicion-de-erosion-
v2/build/source/ensayo260220143/registration2$
```


TÉCNICA DIGITAL PARA MEDICIÓN DE EROSIÓN EN MODELOS FÍSICOS

Mariana Pagot¹, Emanuel Sánchez Aimar², Pablo Vaca¹, Nicolás Bellino¹, Nicolás Guillen¹, Gerardo Hillman¹ y Andrés Rodríguez¹

¹Laboratorio de Hidráulica, FCEFYN, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina

²Facultad de Astronomía, Física y Matemática, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina

Fecha de recepción del manuscrito: dd/mm/aaaa

Fecha de aceptación del manuscrito: dd/mm/aaaa

Fecha de publicación: dd/mm/aaaa

Resumen—Se presenta una técnica digital experimental para medir la erosión en modelos físicos a escala reducida. Esta técnica permite generar en detalle mapeos tridimensionales de la superficie de interés, registrando las escenas resultantes de un ensayo hidráulico. En este trabajo se utilizó una cámara Kinect de Microsoft la cual genera una imagen óptica y otra imagen de profundidades. Los datos de profundidades medidos y sus ubicaciones, permiten reconstruir digitalmente la superficie erosionada con mayor resolución espacial respecto de la técnica utilizada tradicionalmente (que consiste en un relevamiento manual de puntos, utilizando un nivel óptico y una mira milimétrica). La técnica digital propuesta no modifica la condición del modelo, es una técnica no intrusiva. Esta técnica mejora significativamente la resolución y la cobertura espacial del área medida, mediante solapamiento de imágenes, además disminuye, en forma importante, el tiempo empleado en realizar la medición topobatimétrica de cada ensayo.

Palabras clave— Relevamiento digital, erosión, modelo físico, cámara, mapeo tridimensional.

Abstract— An experimental digital technique is presented to measuring erosion in physical scale models. This technique allows generating detailed 3D mapping of the surface, resulting recorded scenes of a hydraulic test. In this paper, an Microsoft Kinect camera was used. This camera allows generate an optical image and another image of depths. The data measured depths and his locations allow digitally reconstruct the surface with higher spatial resolution of the technique traditionally used (which is a manual survey points, using an optical level and millimeter scale). The proposed digital technique does not modify the condition of the model, it is a non-intrusive technique. This technique significantly improves the spatial resolution and density points of the coverage area by overlap of images, and reduces the time spent in each topobathimetric measurement.

Keywords— Digital survey, erosion, physical model, camera, three-dimensional mapping.

• INTRODUCCIÓN

La medición de las erosiones en modelos físicos a fondo móvil y escala reducida se realiza tradicionalmente utilizando un nivel óptico y una mira milimétrica. Esta técnica consiste en el relevamiento manual de puntos, generalmente distribuidos sobre una grilla equidistante. Los aspectos negativos de esta metodología son: la forma de medición, en la cual es necesario apoyarse sobre la superficie a relevar para medir el dato de interés y el tiempo que demanda relevar en detalle el área en estudio, maximizándose dichos aspectos cuando la superficie es extensa y cuando la cantidad de ensayos hidrosedimentológicos son numerosos. La metodología tradicional, además de tener un carácter intrusivo, presenta errores intrínsecos generados por la intervención humana y

restricciones relativas a los instrumentos de medición, estos errores pueden superar el centímetro. Algunas fuentes de error están relacionadas con la incorrecta verticalidad de la mira, el apoyo de la mira sobre el modelo (lo que puede alterar la superficie a medir), errores en las lecturas y/o transcripción de las mismas, entre otros.

Por otro lado, la generación de los productos derivados (curvas de nivel, modelos tridimensionales (3D), perfiles transversales, etc.) y los análisis de dichos productos, se verán afectados por la densidad de puntos relevados y la elección de los mismos.

Para salvar estos problemas, se desarrolló una nueva técnica digital que propone el registro de datos medidos en forma remota. Esta técnica brinda un mayor detalle del área en estudio, ya que se incrementa la resolución espacial del área relevada, y además, involucra menor tiempo de medición, respecto de la técnica tradicional. Esta condición se alcanza drenando adecuadamente la superficie, tal que no presente áreas con acumulación de agua en superficie.

Dirección de contacto:

Mariana Pagot, Av. Filloy s/n Ciudad Universitaria, X5016 CGA, Tel: 0351-4334446, E-mail. mpagot@efn.uncor.edu

La aplicación que se presenta, consistió en las mediciones de erosión realizadas sobre el modelo físico tridimensional del Dique Los Molinos sobre el río Grande, emplazado en la provincia de Jujuy. Este modelo fue construido con similitud de Froude, a escala 1:65 con fondo mixto, en el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ciencias Exactas Físicas y Naturales, de la Universidad Nacional de Córdoba. (Laboratorio de Hidráulica, 2012 y Eder, 2012)

• **METODOLOGÍA DE TRABAJO**

• **Cámara RGB-D**

El sensor Microsoft Kinect (Microsoft, 2010), inicialmente diseñado para la consola de juegos Microsoft Xbox 360, está compuesto por una cámara RGB (siglas en inglés de Rojo, Verde, Azul), un sensor de profundidad (D), un conjunto de micrófonos y un mecanismo de inclinación motorizado. (Fig. 1)



Fig. 1: Microsoft Kinect. (Adaptado de Wikipedia, 2012).

La cámara RGB (R: Red, G: Green, B: Blue) produce un conjunto de datos de 24 bits por píxel. Su resolución estándar es 640x480 píxeles con una frecuencia de muestreo máxima de 30 capturas (o *frame*) por segundo. El sensor de profundidad (D: Depth) está compuesto por un emisor láser infrarrojo (IR) con una definición de 2048 datos por píxel (11 bits). Posee igual resolución y frecuencia de muestreo máxima que la cámara RGB. El campo de visión es de 57° horizontal y 43° vertical.

• **Procedimiento implementado**

Para generar un mapeo 3D o modelo digital de elevaciones (MDE) de la condición de erosión resultante sobre un modelo físico utilizando una cámara RGB-D, se consideraron las etapas presentadas en la Fig. 2.

Estas implicaron la captura de cada toma (*frame*) y sus respectivos datos de profundidad utilizando el sensor RGB-D. Las tomas fueron registradas en un mismo sistema de coordenadas de referencia (sistema modelo) generando un mosaico digital con el conjunto de imágenes capturadas.

La registración global de las imágenes obtenidas con la cámara RGB-D se obtuvo aplicando una transformación rígida que alinea los conjuntos de datos generados basados en una descomposición de valores singulares (Besl y MacKay, 1992) y en un filtrado de correspondencias

erróneas con eliminación de inconsistencias (Fischler y Bolles, 1981).

Se realizó una conversión desde el sistema de escala modelo al sistema de escala prototipo, a fin de trabajar con niveles de profundidades reales. En este sentido, utilizando la información de profundidad provista por la cámara RGB-D se pudo establecer un mapeo (x,y,z) asignando un valor de profundidad en prototipo (Z) a cada punto en prototipo en una correspondencia 2D (X,Y), lo que derivó en correspondencias 3D.

El método se implementó y probó sobre el sistema operativo Ubuntu y requiere de las librerías *Open Source*. Para simplificar la implementación, se utilizó una interfaz de líneas de comandos estándar en sistemas GNU/Linux.

La resolución espacial, calibrada particularmente para la cámara RGB-D utilizada, resultó entre 1.67 y 2.5 mm de tamaño de píxel (menor área registrada) a distancias focales entre 1 y 1.5 m respectivamente. Las exactitudes de las mediciones asociadas a las mencionadas distancias se encontraron entre 0.67 y 1 mm respectivamente.

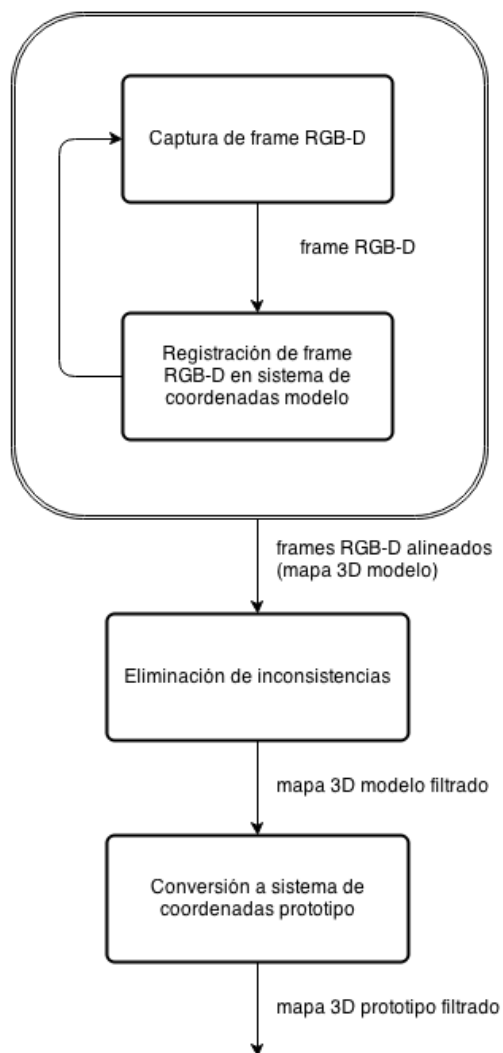


Fig. 2: Etapas en la generación del mapeo 3D con cámara RGB-D.

• **APLICACIONES**

Los ensayos se realizaron en el modelo físico construido en el Laboratorio de Hidráulica (LH) de la Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba (UNC). En la Fig. 3, se presenta una vista general de este modelo físico donde las flechas indican el sentido de escurrimiento de cada río modelado.

Como se mencionó, este modelo físico es una representación del Dique Los Molinos sobre el río Grande, ubicado en la provincia de Jujuy luego de la confluencia con el río Reyes. Cubre un tramo del curso fluvial de aproximadamente 1520 m (1000 m aguas arriba y 520 m aguas abajo del dique), y un ancho efectivo variable entre los 250 m a 700 m en prototipo.

El dique está constituido por un terraplén de materiales sueltos y dos vertederos, un tramo a nivel fijo (dique fijo), y otro regulado por 4 compuertas, conocido como dique móvil. Sobre la margen derecha, se encuentra el canal moderador. Se construyó con fondo fijo la planicie de inundación y con fondo móvil el cauce del río aguas arriba y abajo del dique.



Fig. 3: Vista general del modelo físico construido en el LH-UNC.

Se modelaron las obras de regulación, con todos sus componentes y elementos auxiliares de relevancia hidrosedimentológica presentados en la Fig. 4. Estas características permiten analizar adecuadamente la morfodinámica del flujo en cercanías de las obras. Se realizaron 10 ensayos con diferentes configuraciones de caudales.

Como se describe en la Fig. 4, aguas abajo del dique móvil se analizó la erosión máxima resultante de cada ensayo. Aguas arriba del dique móvil se realizó el relevamiento de canalizaciones (áreas preferenciales del flujo) y el estudio de formas de fondo resultantes ante diferentes procedimientos de maniobra de las compuertas del dique móvil.

En el modelo físico sobre la zona de interés, se construyó una plataforma deslizable (Fig. 5) que posibilita realizar las mediciones de erosión, entre otras variables. Sus componentes principales fueron:

- Una plataforma que puede ser trasladada para observar distintas áreas del modelo.
- Una guía-riel y un carro-soporte para trasladar, específicamente la cámara Kinect. (Bellino, 2013)

En la Fig. 5, las flechas indican el sentido de desplazamiento posible de la plataforma y de la cámara RGB-D sobre la guía soporte.

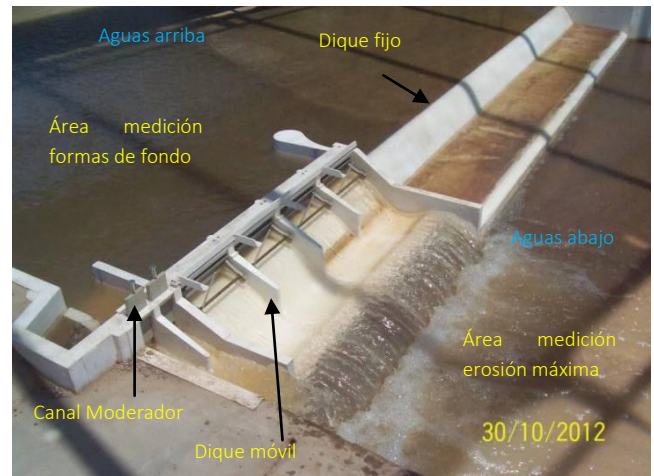


Fig. 4: Modelo físico del Dique Los Molinos. Obras de regulación. Ensayo para medición de erosión. Caudal prototipo= 900 m³/s.

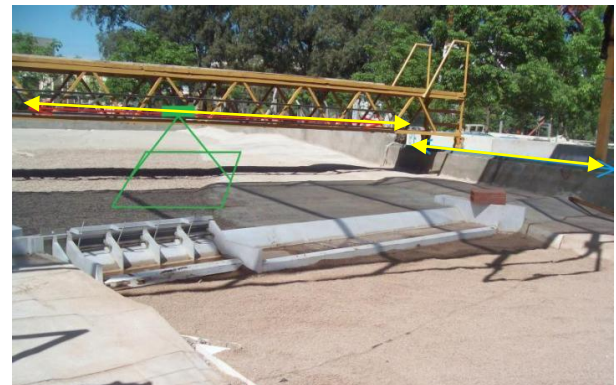


Fig. 5: Guía soporte para la cámara RGB-D (LH, 2012).

• **Resultados: Erosión máxima**

Se presentan los resultados para el escenario correspondiente a un caudal de 900 m³/s en prototipo, el cual permitió evaluar la erosión generada por el paso del mayor caudal posible por el canal moderador y por el dique móvil en conjunto. (Fig. 6)



Fig. 6: Foso de erosión aguas abajo del dique móvil. Caudal prototipo: 900 m³/s

En la Fig. 7 se muestra la imagen resultante RGB con la cámara ubicada a un altura de 1.25 m sobre el lecho sin erosión. En la Fig. 8 se presenta la imagen del modelo digital de elevaciones generado en escala prototipo a partir de los datos medidos con la cámara RGB-D. Los valores

máximos de erosión corresponden a los valores mínimos en la escala de color.



Fig. 7: Foso de erosión aguas abajo del dique móvil. Imagen RGB.

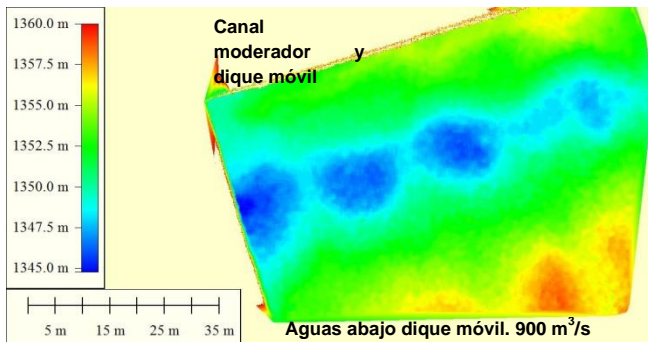


Fig. 8: Foso de erosión aguas abajo del dique móvil. MDE generado.

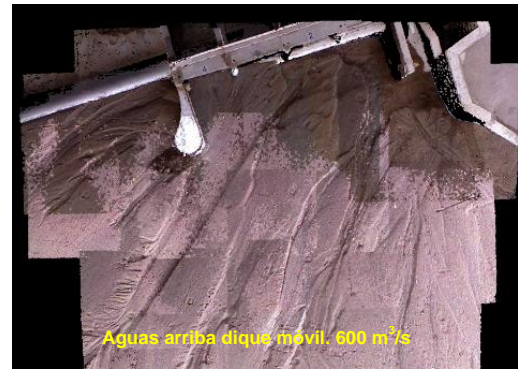


Fig. 9: Área relevada aguas arriba del dique móvil. Mosaico con imágenes RGB.

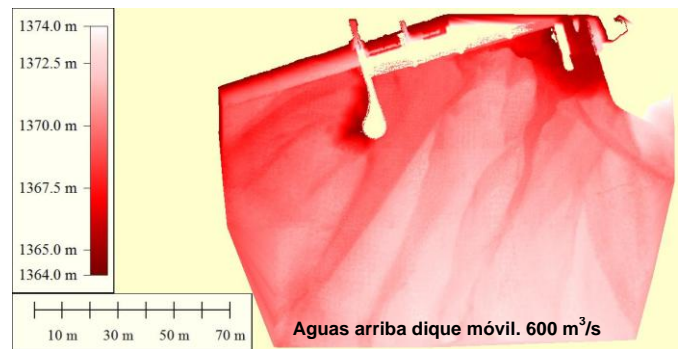


Fig. 10: Área relevada aguas arriba del dique móvil. MDE generado.

• **Resultados: Formas de fondo**

En este ensayo se relevaron las canalizaciones formadas por la influencia de las aberturas de compuertas del dique móvil y del canal moderador para un caudal en prototipo de 600 m³/s. El análisis de los canales que se formaron sobre la superficie del modelo, debido a las llamadas que se realizó con la operación de las estructuras de control, requirió relevar una elevada densidad de puntos y a la vez cubrir grandes superficies, como se muestra en la Fig. 9. La técnica digital propuesta permitió realizar esta medición de forma mucho más eficiente y precisa que la metodología tradicional. En la Fig. 10, se muestra el mapeo de elevaciones en escala prototipo, generado a partir del área relevada aguas arriba del dique móvil con la cámara RGB-D.

• **ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS**

En las Tablas 1 y 2 se presentan los valores de máxima erosión medidos aguas abajo del canal moderador y del dique móvil, respectivamente, relevando los datos tanto con nivel y mira (datos en la segunda columna) como con la cámara RGB-D (datos en la tercera columna).

Se relevaron los valores máximos obtenidos en cada uno de los ensayos realizados, considerando las variaciones de caudales, según se indica en la primera columna de ambas tablas. En la cuarta columna de ambas tablas, se presenta el error absoluto estimado como las diferencias entre los valores medidos con ambas técnicas. En la quinta columna se presentan los errores relativos, que corresponde al cociente entre el error absoluto y el valor medido con la técnica tradicional.

TABLA 1: EROSIONES MÁXIMAS MEDIDAS EN CADA ENSAYO HIDRÁULICO REALIZADO CON VARIACIÓN DE CAUDAL. CANAL MODELADOR MEDIANTE TÉCNICA TRADICIONAL (COTA MEDIDA CON NIVEL) Y DIGITAL (CON LA CÁMARA KINECT) (VALORES EN PROTOTIPO).

Caudal (m ³ /s)	Cota medida con nivel (m s.n.m.)	Cota medida con Kinect (m s.n.m.)	Error absoluto (m)	Error relativo (%)
90	1350.96	1350.37	-0.59	-0.044
600	1346.5	1346.16	-0.34	-0.025
900	1344.8	1345.75	0.95	0.071
1600	1345.7	1345.38	-0.32	-0.024
4200	1345.2	1345.59	0.39	0.029
4200bis	1344.6	1344.18	-0.42	-0.031
		Promedio	-0.05	-0.004
		Desv. Estándar	0.60	0.040

TABLA 2: EROSIONES MÁXIMAS MEDIDAS EN CADA ENSAYO HIDRÁULICO REALIZADO CON VARIACIÓN DE CAUDAL. DIQUE MÓVIL MEDIANTE TÉCNICA TRADICIONAL (COTA MEDIDA CON NIVEL) Y DIGITAL (CON LA CÁMARA KINECT) (VALORES EN PROTOTIPO)

Caudal (m ³ /s)	Cota medida con nivel (m s.n.m.)	Cota medida con Kinect (m s.n.m.)	Error absoluto (m)	Error relativo (%)
220	1354.2	1354.89	0.69	0.051
600	1350.1	1349.67	-0.43	-0.032
900	1346.1	1345.86	-0.24	-0.018
4200	1342.3	1343.20	0.90	0.067
4200bis	1343.2	1343.41	0.21	0.016
		Promedio	0.26	0.017
		Desv. Estándar	0.57	0.040

Analizando los errores absolutos entre las mediciones, se estimó un valor promedio de 0.08 m, la desviación estándar resultó próxima a 0.60 m y la discrepancia máxima resultó de 0.95 m para el conjunto de datos referidos al sistema en prototipo. Con relación al error relativo, se alcanzó una desviación estándar de 0.04 %, indicando una baja variabilidad entre las diferencias estimadas con ambas técnicas (<0.1%). En el sistema modelo, se obtuvo un error absoluto de 1.3 mm promedio y una discrepancia máxima de 14.6 mm. Al analizar los valores absolutos de cada diferencia entre mediciones con tradicional y digital, se alcanzó un valor promedio de 7.7 mm. Este valor corresponde a 3.85 veces el tamaño del pixel de la técnica tradicional (=2 mm).

Con el conjunto de datos, se realizó un análisis de regresión lineal simple (correlación) entre las mediciones realizadas con ambas técnicas (en escala prototipo) y se obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) igual a 0.976.

Con respecto al relevamiento de las formas de fondo generadas aguas arriba del dique móvil, se analizaron modelos tridimensionales de la superficie relevada con ambas técnicas para el ensayo hidráulico realizado para un caudal en prototipo de 600 m³/s.

La problemática asociada a este tipo de estudios radica en la necesidad de relevar áreas extensas con una alta densidad de puntos. Con la técnica tradicional se relevaron puntos equidistantes sobre varios perfiles transversales y se añade la medición de puntos extras que se consideran representativos en la definición de las canalizaciones. Para obtener una aproximación global de las formas de fondo, se debe generar un modelo 3D utilizando métodos de interpolación. Por un lado, en la Fig. 11 se presentan los resultados obtenidos con la técnica tradicional. Este modelo digital de elevaciones generado con los puntos que se visualizan en la Fig. 11, se superpuso sobre el modelo generado con la técnica digital propuesta.

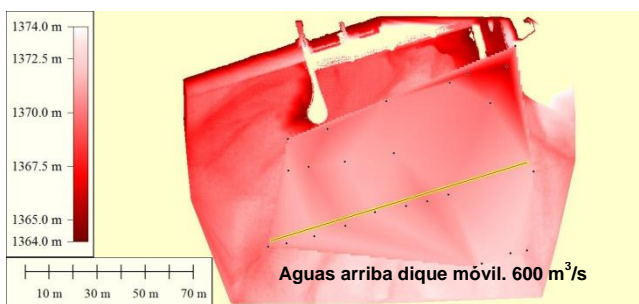


Fig. 11: Área aguas arriba del dique móvil. MDE generado con puntos relevados con técnica tradicional.

En base a un primer análisis visual, entre las figuras 10 y 11, se observa que con la técnica digital se obtuvo mayor representatividad de las canalizaciones resultantes del ensayo que con la técnica tradicional.

Con el objetivo de analizar las diferencias entre ambos MDE, se realizó la sustracción de los respectivos valores de las superficies generadas con la técnica digital y con la técnica tradicional. Sobre esta superficie resultante se trazó un perfil transversal (línea continua en la Fig. 11), el cual se presenta en la Fig. 12. En este gráfico se distinguen zonas con diferencias de elevación (con respecto a los valores en

prototipo) dentro del intervalo 0.5 a 2 m. Este rango de valores representa en el modelo un intervalo de 7.7 a 30 mm. Las pequeñas fluctuaciones en la superficie se corresponden al ruido de la señal de la cámara Kinect.

Este análisis muestra que existen, dentro de las áreas estudiadas, zonas donde las canalizaciones relevadas con la técnica tradicional han sido excluidas por la interpolación realizada en base a las mediciones de cada punto relevado.

Cabe recalcar, que es posible disminuir el error presente en la superficie interpolada, incrementando la cantidad de puntos relevados con la técnica tradicional pero a costo de elevar el tiempo de medición. El tiempo de medición que aquí se menciona contempla, en ambas técnicas, el intervalo desde el inicio al final de cada medición, sin considerar el tiempo de drenaje del modelo.

El método tradicional es laborioso cuando se deben realizar ensayos consecutivos y secuenciales asociados a aspectos complementarios de un estudio global.

Por este motivo, la técnica digital permite obtener una representación más realista del lecho erosionado con bajo costo-tiempo de medición, sin alterar la superficie ensayada.

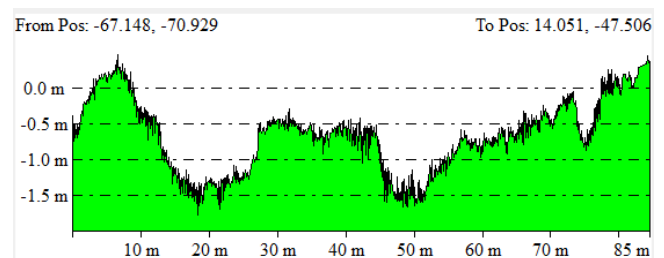


Fig. 12: Diferencias de elevaciones en prototipo sobre el perfil transversal. Eje vertical: Diferencias de elevación y Eje horizontal: Distancias desde margen derecha.

CONCLUSIONES

En este trabajo se ha desarrollado un sistema que permite medir la erosión en modelos físicos a fondo móvil en escala reducida, utilizando una cámara RGB-D Microsoft Kinect. El resultado es una medición con alta resolución espacial de la topobatemetría de un ensayo hidráulico a fondo móvil. Se obtiene una imagen con tamaño de pixel entre 0.9 y 2.5 mm para un rango de distancias entre sensor y superficie de 0.5 a 1.5 m respectivamente, asociados a precisiones entre 0.9 a 1.1 mm.

Es importante destacar que esta moderna técnica digital exhibe una serie de ventajas frente a la técnica tradicional. Se resaltan dos aspectos que mejoran utilizando esta técnica digital, los que se asocian a la interacción con el medio y a las facilidades tecnológicas que esta técnica aporta. El primero se debe a la capacidad que presenta la técnica digital propuesta para realizar mediciones no intrusivas, es decir, que no altera la condición resultante del ensayo hidráulico. Por otro lado, el sistema propuesto presenta beneficios en la adquisición de datos porque mejora significativamente la resolución espacial del área relevada, a la vez que permite registrar áreas extensas y disminuir el tiempo empleado específicamente en las mediciones para cada escenario ensayado.

Esto permite posicionar la técnica digital como una alternativa viable para realizar mediciones de erosión en laboratorio. Para continuar esta línea de desarrollo, se abordarán los temas relacionados con las fuentes de error posibles, como por ejemplo: el ruido debido a la rugosidad, la condición de humedad superficial y el ruido propio de la cámara RGB-D, entre otros.

• AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Dr. Oscar Bustos de FAMAFA-UNC y a la UTE Roggio-Cartellone por el apoyo brindado en este trabajo.

REFERENCIAS

- Bellino, N. (2013), Nuevo método de medición de erosión aplicado al modelo físico del Dique Los Molinos (Jujuy). Trabajo final de la carrera de Ingeniería Civil – Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – Universidad Nacional de Córdoba. Córdoba, Argentina. Abril.
- Besl, P. J. y McKay, N. D. (1992), “A method for registration of 3-d shapes”. IEEE Trans. Pattern Annual. Mach. Intell., 14 (2): 239-256.
- Eder, M. (2012), Diseño, construcción y calibración del modelo físico – Dique Los Molinos (Jujuy). Trabajo final de la carrera de Ingeniería Civil – Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales – Universidad Nacional de Córdoba – Córdoba, Argentina. Diciembre.
- Fischler, M. A. y Bolles, R. C. (1981), “Random sample consensus: A paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography”. ACM Digital Library, Association for Computing Machinery Commun. ACM, 24 (6): 381-395.
- Laboratorio de Hidráulica (2012), Modelación física tridimensional del Dique Los Molinos, provincia de Jujuy. Segundo Informe Técnico a UTE Roggio-Cartellone. Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de la Universidad Nacional de Córdoba. Diciembre.
- MICROSOFT (2010), “KINECT” tomado de <http://www.xbox.com/en-us/kinect/> (08 junio 2012).
- Sánchez Aimar E. (2013), Software para medición de erosión y sedimentación en modelos físicos por medio de relevamiento digital de superficies. Trabajo final de la carrera de Licenciatura en Ciencias de la Computación – Facultad de Astronomía, Matemática y Física – Universidad Nacional de Córdoba – Córdoba, Argentina. Diciembre.
- WIKIPEDIA (2012), MICROSOFT KINECT, tomado de <http://es.wikipedia.org/wiki/Kinect> (08 junio 2012).