



Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado
Facultad De Ingeniería – Programa de Magister en Ciencias de la
Ingeniería, Mención Ingeniería Civil

SIMILITUD Y REPETIBILIDAD DE LA FORMACIÓN DE UN
DELTA DE SEDIMENTOS EN LA COLA DE UN EMBALSE



POR

ANDRÉS IGNACIO ARANEDA VALDÉS

Tesis presentada a la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad de
Concepción para optar al grado académico de Magíster en Ciencias de la
Ingeniería con mención en Ingeniería Civil

Profesor Guía
Oscar Link

noviembre 2021
Concepción, Chile

© 2021 Andrés Ignacio Araneda Valdés

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.



AGRADECIMIENTOS

La presente memoria fue parcialmente financiada por dos proyectos de consultoría realizados por el Instituto de Investigaciones Tecnológicas IIT-UdeC, denominados: Modelo físico de bocatoma Tinguiririca para la optimización de la operación de obras hidráulicas, OTs 2018-126-11 y 2018-374-11. El autor agradece a Tinguiririca Energía Joint Venture y especialmente, al Ing. Ignacio Sabat por la información proporcionada.



El autor agradece especialmente a Oscar Link y Alicia Rivas por su tiempo, consejo y apoyo constante durante la realización de esta tesis.

Del mismo modo el autor agradece a René Iribarren, Frank Tinapp, Jordan Flores y Edgar Fuentealba por su compromiso y ayuda técnica durante la realización de los experimentos en los que se basó este estudio.

RESUMEN

La formación de deltas de sedimentos es un proceso morfodinámico complejo, el cual puede ser estudiado mediante modelación física. Sin embargo, los efectos de escala aún no son bien comprendidos, generando dudas en la confiabilidad de los resultados. En esta tesis, la similitud y repetibilidad de la formación de un delta de sedimento en la cola de un embalse fue analizado. Para ello, se construyó un modelo físico de la bocatoma Tinguiririca a escala 1:26 y 1:65 en vertical y horizontal, conservando los adimensionales de Froude y Shields. Se modelaron 8 deltas de sedimentos bajo las mismas condiciones experimentales, cuyas morfologías fueron medidas usando un dron con cámara de alta resolución. La morfología de cada delta se caracterizó mediante 6 índices morfométrico. Estos índices fueron comparados entre los deltas modelados, para luego ser comparados con los índices medidos del prototipo mediante 5 imágenes satelitales. Los resultados muestran que los deltas modelados presentan índices similares, indicando que la morfología de los deltas es repetible en el modelo físico. Además, se encontró similitud en la morfología de los deltas modelados y el prototipo, con un número y densidad de canales similares.

ABSTRACT

The formation of deltas is a complex morphodynamical process which can be studied through physical models. However, scale effects are not well understood, raising doubts about the reliability of the results. In this thesis, the similitude and repeatability of the delta formation at the tail of a reservoir were investigated. A physical model of the Tinguiririca Dam was built using 1:26 and 1:65 as vertical and horizontal scale, leaving unchanged the Froude and Shields number. Eight delta formation experiment were modeled under the same experimental condition, whose morphology were captured using a high-resolution drone camera. The morphology of each delta was characterized by six morphometric indices. These indices were compared between the modeled deltas, to later be compared with the indices obtained in the prototype delta using 5 satellite images. Results show that the modeled deltas present similar indices, indicating that the delta morphology is repeatable in the physical model. Furthermore, similitude between the modeled deltas and the prototype was found, with a similar number and density of channels.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN	12
1.1. Motivación.....	12
1.2. Hipótesis	14
1.3. Objetivos.....	15
1.3.1. Objetivo general	15
1.3.2. Objetivos específicos	15
1.4. Metodología.....	16
1.5. Estructura del informe	17
CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE.....	19
2.1. Introducción.....	19
2.2. Deltas de sedimentos	19
2.3. Índices morfométricos	21
2.4. Modelación física	23
2.5. Conclusiones.....	27
CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS	28

3.1. Introducción.....	28
3.2. Área de estudio	28
3.3. Diseño experimental.....	30
3.3.1. Similitud y escalamiento	30
3.3.2. Instalación y procedimientos experimentales	36
3.3.3. Técnicas de medición.....	38
3.4. Determinación de los índices morfométricos.....	41
3.5. Propagación de errores.....	44
3.6. Análisis estadístico	49
3.6.1. Repetibilidad de ensayos.....	49
3.6.2. Similitud con el prototipo	51
3.7. Conclusiones.....	53
CAPÍTULO 4: RESULTADOS.....	56
4.1. Introducción.....	56
4.2. Modelos digitales de elevación	56
4.3. Análisis de repetibilidad.....	59

4.3.1. Número de canales	59
4.3.2. Densidad de canales	60
4.3.3. Ancho de canales.....	62
4.3.4. Profundidad de canales	65
4.3.5. Razón ancho-profundidad	67
4.3.6. Pendiente longitudinal.....	70
4.4. Similitud con el prototipo.....	70
4.5. Análisis de incertidumbre.....	75
4.6. Discusión de resultados	77
4.7. Conclusiones.....	80
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES	82
REFERENCIAS.....	86

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1 Precisiones planimétricas y altimétricas de los 8 ensayos realizados bajo mismas condiciones experimentales y de operación, en dimensiones del modelo y a escala real.	58
Tabla 4.2 Prueba Kruskal-Wallis para los anchos de los canales obtenidos en cada sección transversal, comparando los 8 ensayos realizados.	64
Tabla 4.3 Prueba Kruskal-Wallis para las profundidades de los canales obtenidas en cada sección trasversal, comparando los 8 ensayos realizados.	66
Tabla 4.4 Prueba Kruskal-Wallis para las razones ancho-profundidad obtenidas en cada sección transversal, comparando los 8 ensayos realizados.	69
Tabla 4.5 Pendiente longitudinal del delta formado en los 8 ensayos realizados.....	70
Tabla 4.6 Errores relativos de los índices morfométricos para cada ensayo.	76

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Estructura longitudinal de un delta de sedimentos en la cola de un embalse y sus regiones principales: (a) <i>Topset</i> ; (b) <i>Foreset</i> y (c) <i>Bottomset</i>	20
Figura 3.1 Área de estudio.	29
Figura 3.2 Esquema longitudinal de la instalación experimental.	37
Figura 3.3 Vista lateral del delta de sedimentos formado en el modelo físico.	38
Figura 3.4 Puntos de control sobre el modelo físico.....	40
Figura 3.5 Imágenes satelitales obtenidas de Google Earth desde diciembre de 2013 a marzo de 2016.	53
Figura 4.1 Modelos digitales de elevación de los 8 ensayos realizados bajo mismas condiciones experimentales y de operación.	57
Figura 4.2 Gráfico de caja del número de canales en cada sección transversal del delta para los 8 ensayos realizados.	59
Figura 4.3 Gráfico de caja de la densidad de canales en cada sección transversal del delta para los 8 ensayos realizados.	61
Figura 4.4 Gráfico de caja del ancho de los canales promedio en cada sección transversal del delta para los 8 ensayos realizados.	63
Figura 4.5 Gráfico de caja de la profundidad de los canales promedio en cada sección transversal del delta para los 8 ensayos realizados.	65
Figura 4.6 Gráfico de caja de la razón ancho-profundidad promedio en cada sección transversal del delta para los 8 ensayos realizados.	68
Figura 4.7 Gráficos de caja del número de canales para cada sección transversal de los 8 ensayos realizados sobre el modelo físico (negro) y las 5 imágenes satelitales obtenidas del prototipo (rojo).....	71
Figura 4.8 Gráficos de caja del ancho de los canales promedio para cada sección transversal de los 8 ensayos realizados sobre el modelo físico (negro) y las 5 imágenes satelitales obtenidas del prototipo (rojo).	73

Figura 4.9 Gráficos de caja de la densidad de canales para cada sección transversal de los 8 ensayos realizados sobre el modelo físico (negro) y las 5 imágenes satelitales obtenidas del prototipo..... 74



CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

Reducir la sedimentación de embalses constituye uno de los grandes desafíos de la industria hidroeléctrica (Constantine, 2018; Morris y Fan, 1998). En la realidad, se observa que los sedimentos en un embalse se depositan en forma de un delta en la cola del embalse (límite entre el río y el reservorio), progresando hacia aguas arriba, como también hacia aguas abajo hasta su encuentro con el muro de la presa. Este proceso genera la pérdida de la capacidad de almacenamiento de los embalses y, por lo tanto, afecta la función principal del mismo que es almacenar agua para, por ejemplo, producir energía hidroeléctrica (García, 2008; Schleiss, Franca, Juez y De Cesare, 2016). A nivel mundial, se estima que los embalses pierden entre un 0.5 a 1% de su capacidad de almacenamiento anualmente (Annandale, Randle, Langendoen y Hotchkiss, 2018; International Commission on Large Dams, 2009; Schleiss *et al.*, 2016) invirtiéndose globalmente alrededor de US\$ 10 billones a US\$ 20 billones al año para la recuperación de este volumen perdido (Kawashima, Jondrow, Annandale y Shah, 2003).

Por lo anteriormente descrito, resulta de interés estudiar la sedimentación de embalses y las estrategias que permiten reducir sus problemas asociados, siendo la modelación física a escala una alternativa ideal para el estudio de este tipo de fenómenos complejos. Sin embargo, debido a las limitaciones de espacio, equipos y materiales disponibles para la construcción de estos modelos, como también la imposibilidad de escalar todas las fuerzas presentes en el fenómeno, no es posible lograr una similitud completa entre el modelo y el prototipo, generando la aparición de efectos de escala.



Actualmente existe un vacío de conocimiento importante en la forma de aplicar la teoría de la similitud para reproducir la formación y desarrollo de los deltas de sedimento en embalses. Si bien se han establecido criterios de escalamiento para lograr conservar el comportamiento de los sedimentos sobre modelos físicos a escala en varias situaciones (Ettema, Arndt, Roberts y Wahl, 2000; Heller, 2011), la discusión sobre la importancia de los efectos de escala y, por ende, si existe realmente similitud entre un delta de sedimentos modelado físicamente y el delta de sedimento observado en la realidad no se ha realizado. Adicionalmente, la propia formación de un delta de sedimento es un proceso dinámico que va evolucionando y cambiando en

el tiempo, siendo difícil encontrar un consenso entre los autores sobre la llegada a un estado de equilibrio en la formación del delta. Por lo anterior, resulta de interés estudiar la variabilidad propia de la formación de deltas en modelos físicos y, en específico, si existe repetibilidad en la formación de deltas en modelos físicos al realizar varios ensayos bajo mismas condiciones experimentales.

En este contexto, el presente estudio busca analizar la repetibilidad y similitud de la formación de deltas de sedimentos en la cola de un embalse mediante un modelo físico a escala.

1.2. Hipótesis

La formación de deltas de sedimentos en la cola de un embalse es repetible mediante un modelo físico con efectos de escala, siendo los deltas modelados morfológicamente similares al delta observado en la realidad.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Analizar la repetibilidad y similitud de la formación de un delta de sedimento en la cola de un embalse, utilizando un modelo físico de la bocatoma Tinguiririca.

1.3.2. Objetivos específicos

- Diseñar un modelo físico de la bocatoma Tinguiririca utilizando criterios de escalamiento basados en el análisis dimensional y la teoría de la similitud.
- Caracterizar los deltas de sedimentos utilizando índices morfométricos.
- Analizar la repetibilidad de los ensayos, comparando estadísticamente los índices morfométricos para casos medidos en laboratorio bajo las mismas condiciones.
- Analizar la similitud del delta modelado con el prototipo, mediante la comparación de índices morfométricos.

1.4. Metodología

El motivo de este trabajo corresponde a analizar si es posible repetir la morfología de un delta de sedimento formado en un modelo físico realizando varios ensayos con las mismas condiciones experimentales y de operación. Por otro lado, también se busca analizar si existe similitud entre las morfologías obtenidas en los deltas de sedimentos modelados físicamente y la morfología del delta observado en el prototipo.



La metodología usada para llevar a cabo esta investigación consistió en:

- Diseñar y construir un modelo físico de la bocatoma Tinguiririca, utilizando criterios de escalamiento recomendados por distintos autores.
- Formar 8 deltas de sedimento sobre el modelo físico. Para ello, se repitió el mismo ensayo 8 veces, buscando que los deltas se realizaran bajo las mismas condiciones experimentales y de operación.
- Los deltas modelados fueron caracterizados morfológicamente mediante 6 índices morfométricos. Estos índices fueron seleccionados

de distintos estudios de evolución morfológica de deltas de sedimentos y ríos trenzados.

- Comparar la morfología de los deltas modelados mediante una prueba estadística no paramétrica, utilizando para este proceso los índices morfométricos seleccionados.
- Comparar los índices morfométricos obtenidos de los deltas modelados con los índices morfométricos obtenidos del delta observado en la realidad.



1.5. Estructura del informe

Inicialmente, en este informe se presenta el problema a ser investigado, la hipótesis, los objetivos y la metodología utilizada para la realización de este trabajo. Luego, se procede a realizar una revisión de los estudios realizados en deltas de sedimentos, los índices morfométricos ocupados en distintos trabajos para estudiar la morfología en deltas y ríos trenzados, y la utilización de modelos físicos en el estudio de la formación de deltas de sedimentos en embalses, junto a los criterios de escalamiento y métodos de medición utilizados para la obtención de resultados. Posteriormente, se describen la

instalación experimental y los métodos utilizados para el estudio de la repetibilidad y similitud en la formación de deltas de sedimentos en embalses mediante modelos físicos a escala. A continuación, los principales resultados de la investigación son mostrados, junto a la discusión de los resultados. Finalmente, se resumen las principales conclusiones del presente trabajo.



CAPÍTULO 2: ESTADO DEL ARTE

2.1. Introducción

En este capítulo se presentan los mecanismos de formación y descripción de la estructura de los deltas de sedimento en embalses. Además, se realiza una revisión del estado de arte, centrandó el interés en los métodos de caracterización morfológica mediante índices morfométricos en deltas de sedimento y ríos trezados, como también en la utilización de modelos físicos para el estudio de la formación de deltas de sedimentos en embalses.



2.2. Deltas de sedimentos

Cuando el río ingresa al reservorio, la velocidad del flujo disminuye y, por ende, se reduce la capacidad de transporte de sedimentos. Debido a esto, los sedimentos gruesos que eran transportados empiezan a depositarse gradualmente en la cola del embalse, mientras que los sedimentos finos se depositan en las cercanías al muro. Este proceso genera una formación cónica llamada delta, que se ubica en la cola del embalse y que gradualmente se extiende hacia aguas arriba y hacia aguas abajo hasta su encuentro con el

muro (Morris y Fan, 1998). Tres regiones son identificables en los deltas de sedimentos formados en embalses (Kostic y Parker, 2003), como se muestra en la **Figura 2.1**.

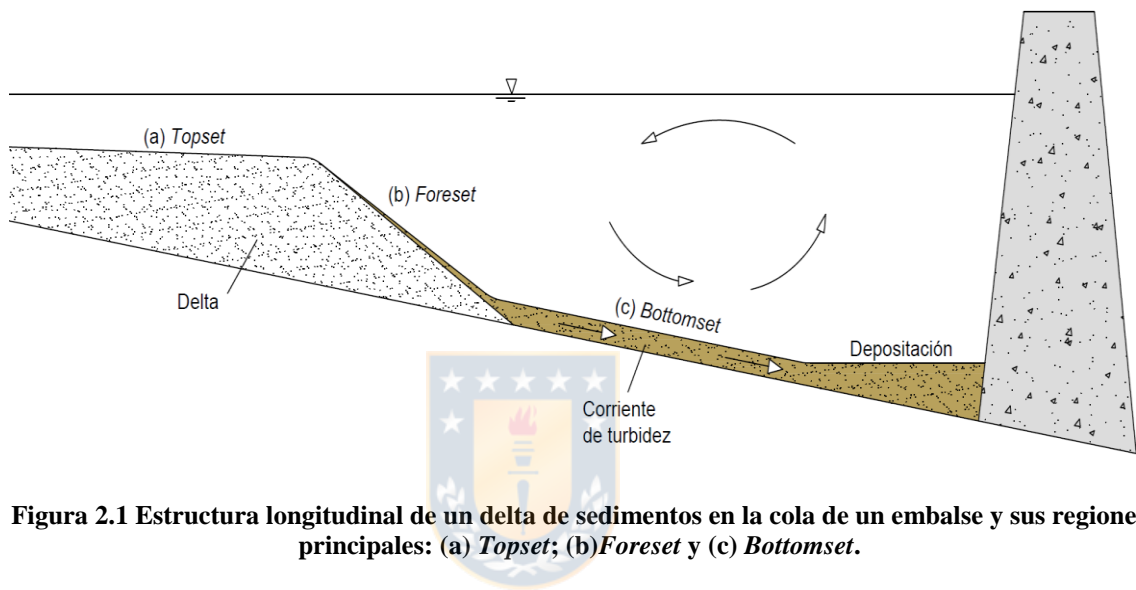


Figura 2.1 Estructura longitudinal de un delta de sedimentos en la cola de un embalse y sus regiones principales: (a) *Topset*; (b) *Foreset* y (c) *Bottomset*.

El *topset* corresponde a la zona aguas arriba del delta. Se caracteriza por sus bajas pendientes y mayor presencia de sedimento grueso, debido a la poca influencia del reservorio y los altos esfuerzos de corte en la zona. El *bottomset* corresponde a la zona aguas abajo del delta y más cercana al muro de la presa. Está formada principalmente de sedimentos finos, los cuales son transportados desde las zonas superiores del delta mediante corrientes de turbidez y se depositan en las cercanías al muro. Por último, el *foreset* corresponde a la cara del delta. Está compuesta por sedimento grueso y fino,

y se caracteriza por sus altas pendientes e inestabilidad del lecho. Esta inestabilidad del lecho provoca fenómenos de avalancha que aportan a la extensión del delta de sedimentos hacia aguas abajo hasta su encuentro con el muro.

Actualmente, los principales mecanismos que contribuyen a la sedimentación de los embalses son bien conocidos, pero aún sigue siendo necesario avanzar en líneas de investigación poco abordadas, como la comprensión de los procesos físicos involucrados en la sedimentación de embalses, la utilización de modelos para su estudio y el estudio de herramientas de mitigación precisas para cada caso (Schleiss *et al.*, 2016).

2.3. Índices morfométricos

Los deltas de sedimento presentan morfologías dinámicas controladas por los caudales líquidos y sólidos afluentes al reservorio, el nivel de operación del embalse y los fenómenos de avulsión. En la literatura, la observación de la red de los canales es imprescindible para predecir la evolución temporal en la morfología de estos deltas, como también para evaluar distintas estrategias

de manejo de sedimentos (Shaw, Mohrig y Whitman, 2013). En particular, la utilización de modelos digitales de elevación y batimetrías han aportado en el estudio de los deltas, permitiendo caracterizar sus canales terminales mediante índices morfométricos y, posteriormente, analizar la evolución morfológica de estos deltas. Algunos índices observados en la literatura para el estudio de la evolución morfológica en deltas son: el número de canales, el ancho de los canales, la profundidad de los canales y la densidad de canales (Olariu y Bhattacharya, 2006; Shaw *et al.*, 2013). Por otro lado, en laboratorios la utilización de modelos físicos a escala ha permitido estudiar estructuras similares a los deltas de sedimentos, como lo son los ríos trezados. Estas investigaciones se han centrado en la evolución de los canales distributarios mediante la caracterización morfológica del lecho, ocupando para este procedimiento las elevaciones de la zona de estudio obtenidas mediante fotogrametría o mediciones LiDAR (del inglés, *Light Detection and Ranging*). Estos análisis se han realizado obteniendo índices morfométricos, los cuales han permitido estudiar los cambios altimétricos y planimétricos de los canales formados sobre los ríos trezados. Algunos de los índices morfométricos utilizados en el estudio de la evolución morfológica en ríos trezados son: el número de canales secos y activos, el

ancho de los canales y la profundidad de los canales (Egozi y Ashmore, 2009; Ettema y Armstrong, 2019; Vesipa, Camporeale y Ridolfi, 2018).

En general, la morfología de los deltas de sedimentos y ríos trenzados sigue siendo investigada, existiendo una falta de acuerdo entre los autores sobre cuáles son los índices morfométricos ideales para estudiar la evolución morfológica de estos procesos. Por otro lado, la formación de deltas de sedimentos son procesos morfodinámicos complejos, siendo difícil encontrar un estado de equilibrio morfológico en ellos. Lo anterior genera dudas respecto a la posibilidad de repetir la morfología de un delta de sedimentos en un modelo físico bajo condiciones controladas, debido a la sensibilidad observada en estos procesos.

2.4. Modelación física

Los modelos físicos, en particular, son una importante herramienta en el estudio de los sistemas fluviales complejos (El Kadi Abderrezzak *et al.*, 2014), los cuales permiten observar relaciones hidráulicas y morfodinámicas que son difíciles de medir en terreno o simular utilizando modelos numéricos

(Baynes *et al.*, 2018; Gorrick y Rodríguez, 2014; Link, Henríquez y Ettmer, 2018). Específicamente, los modelos físicos de lecho móvil permiten estudiar fenómenos de dos fases, en los cuales tanto el fluido como el sedimento del lecho se mueven de forma simultánea, constituyendo una mecánica totalmente inseparable. El diseño de estos modelos de lecho móvil está basado en la teoría de la similitud, buscando conservar los parámetros adimensionales que describen el flujo y el transporte de sedimentos del proceso estudiado. Un modelo físico será completamente similar a su prototipo (realidad) si existe similitud geométrica, cinemática y dinámica entre ellos (El Kadi Abderrezzak *et al.*, 2014; Ettema *et al.*, 2000; Gorrick y Rodríguez, 2014). Una de las principales limitaciones de los modelos físicos es la similitud dinámica, la cual es solo posible de lograr si se mantienen todas las razones de fuerzas obtenidas del análisis dimensional del fenómeno a estudiar (Ettema *et al.*, 2000; Heller, 2011). Lamentablemente, no es posible alcanzar esta similitud sin tener que distorsionar el modelo o cambiar el fluido del prototipo, generando la aparición de efectos de escala que alejan los resultados obtenidos en el modelo físico del proceso medido en la realidad (Ettema *et al.*, 2000; Heller, 2011; Yalin, 1965). Por lo anterior, es necesario utilizar criterios de escalamiento que permitan conservar o relajar las razones

de fuerzas que gobiernan la sedimentación de embalses, con el fin de aproximar el comportamiento morfodinámico del prototipo en el modelo físico construido (Baynes *et al.*, 2018; Gorrick y Rodriguez, 2014).

Algunos autores han utilizado modelos físicos de lecho móvil para estudiar la sedimentación de embalses. Link, Meier y Ettmer (2013) estudiaron técnicas de manejo de sedimentos en un modelo físico del embalse las Juntas, ubicado en el río Duqueco, región del Biobío. Utilizaron un modelo físico no distorsionado de escala 1:60, ocupando como criterios de similitud la conservación del número de Froude y del número de Shields mediante el escalamiento del caudal y la utilización de un sedimento con un diámetro adimensional igual al del prototipo, buscando que la condición de transporte incipiente en el modelo sea similar a la observada en el prototipo. La similitud del número de Reynolds del escurrimiento y la pared fueron relajados, verificando que el régimen de escurrimiento y tipo de pared se mantuviera en rangos similares a los del prototipo. Por último, verificaron que no hubiese efectos de tensión superficial en el modelo, producto del escalamiento vertical del prototipo. Por otro lado, Sindelar *et al.* (2019) utilizaron un modelo físico de lecho móvil para estudiar la evolución temporal de un delta

de sedimentos en la central de pasada del río Mürz, Austria. Simularon las condiciones hidrológicas y sedimentológicas observadas en la realidad para, posteriormente, analizar los cambios de pendiente y distribución de la granulometría a lo largo del delta durante el ensayo. Los resultados fueron medidos mediante una fotogrametría realizada por una cámara de alta resolución, la cual fue montada sobre un sistema de posicionamiento de 3 ejes. Se ubicaron puntos de control a ambos lados de modelo, siendo identificados mediante códigos de barra circular, conociendo sus coordenadas con una precisión de ± 0.1 mm. Mediante el programa Agisoft Metashape 1.5.2 se procesó la fotogrametría realizada, permitiendo construir ortomosaicos y modelos digitales de elevación del lecho.

Actualmente, los efectos de escala aún siguen siendo investigados. En la revisión bibliográfica realizada se hace una continua mención de la importancia de reducir los efectos de escala mediante criterios de escalamiento basados en la teoría de la similitud (Baynes *et al.*, 2018; El Kadi Abderrezack *et al.*, 2018; Ettema y Armstrong, 2019; Ettema *et al.*, 2000; Gorrick y Rodriguez, 2014), pero faltando antecedentes respecto a la importancia de estos efectos de escala y si a pesar de ello, es posible formar

un delta de sedimento en el modelo físico con morfología similar al observado en el delta prototipo utilizando criterios de escalamiento basados en la teoría de la similitud durante el diseño.

2.5. Conclusiones

La revisión del estado del arte evidencia algunos vacíos de conocimiento que son de interés estudiar, surgiendo las siguientes preguntas: ¿Qué criterios de escalamiento se pueden utilizar para modelar físicamente la formación de un delta de sedimento en la cola de un embalse en un modelo físico a escala?; ¿es posible lograr repetir la morfología de un delta de sedimento en un modelo físico a escala realizando ensayos bajo las mismas condiciones experimentales y de operación?; ¿qué tan importante son los efectos de escala a la hora de estudiar la similitud entre un delta de sedimento formado en un modelo físico y el delta observado en la realidad? En este trabajo, la similitud y repetibilidad de la formación de un delta de sedimento en la cola de un embalse en un modelo físico a escala es investigado, con la finalidad de responder a las preguntas mencionadas anteriormente.

CAPÍTULO 3: MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Introducción

En este capítulo se presentan los materiales y métodos aplicados para el diseño y construcción del modelo físico de la bocatoma Tinguiririca, como también para la medición de los distintos ensayos de formación de deltas de sedimento realizados sobre el modelo. Posteriormente, se presenta el método utilizado para comparar estadísticamente las características morfológicas de los deltas formado para cada ensayo, como también entre los deltas modelados con el delta observado en la realidad (prototipo). Esta comparación permitió analizar la repetibilidad del ensayo y la similitud entre los deltas modelados y el delta observado en el prototipo.

3.2. Área de estudio

La bocatoma Tinguiririca es una de las dos bocatomas que alimenta la central Confluencias, la cual cuenta con una capacidad instalada de 163 MW. Fue construida en el río Tinguiririca, ubicado en la región del Libertador Bernardo O'Higgins, Chile central. En la **Figura 3.1** se muestra la ubicación

de la bocatoma Tinguiririca y su cuenca aportante de aproximadamente 280 km².

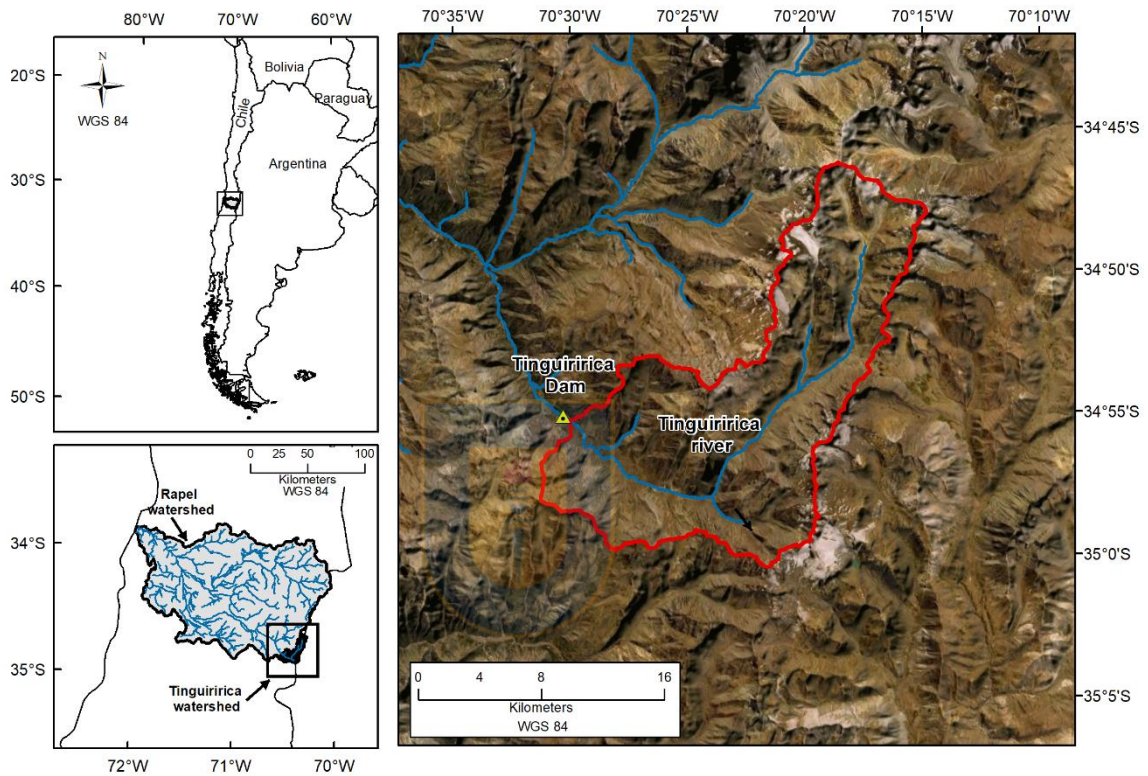



Figura 3.1 Área de estudio.

Fue puesta en operación el año 2010. La bocatoma está formada por una barrera fija de 450 m de largo y 9.2 m de alto, con un volumen de almacenamiento aproximado de 450.000 m³. Al interior del reservorio, se observa la formación de un delta de sedimento debido a las grandes tasas de sedimentos arrastrados desde las altas montañas entre el 2012 y 2018, además

de un flujo hiperconcentrado y dendrítico producido el 25 de marzo de 2017, evento que sedimentó aún más la bocatoma. El sedimento encontrado en la zona de estudio mostro una distribución bimodal, compuesta por una fracción fina entre 0.1 y 2 mm, con un $d_{50} = 0.6$ mm, y una fracción gruesa entre 2 y 80 mm, con un $d_{50} = 17$ mm.

3.3. Diseño experimental

3.3.1. Similitud y escalamiento



La sedimentación y formación de delta de sedimentos en reservorios corresponde a un fenómeno de dos fases, en donde el fluido y el sedimento se mueven de manera simultánea, presentando una mecánica inseparable entre ellos. En la literatura, el fenómeno de dos fases ha sido estudiado mediante modelos físicos de lecho móvil, en donde se ha utilizado el análisis dimensional mediante el teorema de Pi de Buckingham (1914) para determinar los parámetros adimensionales que gobiernan el flujo y el transporte de sedimentos. Por lo tanto, utilizando el análisis dimensional fue posible obtener 7 parámetros adimensionales que explican el

comportamiento del flujo y el transporte de sedimentos en cauces abiertos, como se muestra en la relación funcional de la **Ecuación** (3.1),

$$\Pi_A = f \left(\frac{u}{\sqrt{gh}}, \frac{uh}{v}, \frac{\rho u_*^2}{g(\rho_s - \rho)d}, \frac{u_* d}{v}, \frac{u_*}{w_s}, \frac{h}{d_s}, \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) \quad (3.1)$$

donde el primer término corresponde al número de Froude (Fr), el segundo término corresponde al número de Reynolds del escurrimiento (Re), el tercer término corresponde al parámetro de Shields (θ), el cuarto término corresponde al número de Reynolds de la pared (Re_p), el quinto término corresponde a la relación entre la velocidad de corte y la velocidad de caída del sedimento, el sexto término corresponde a la relación entre la profundidad del flujo y el diámetro del sedimento, y el séptimo término corresponde a la relación entre la densidad específica del sedimento y el densidad del agua.

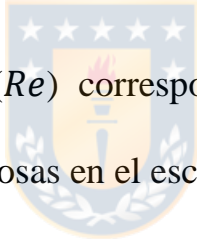
El diseño del modelo físico fue basado en la teoría de la similitud, buscando garantizar la similitud geométrica, cinemática y dinámica entre el modelo y el prototipo. Debido a que no es posible conservar todas las relaciones de fuerzas implicadas en la formación de deltas en embalses, fue necesario

aplicar criterios de escalamiento que permitieron la conservación o relajación de las principales fuerzas que gobiernan el flujo y el transporte de sedimentos, buscando reducir los efectos de escala. En primer lugar, se decidió utilizar una escala horizontal $L_r = 1:65$ buscando maximizar el espacio a ocupar en el área disponible para la construcción del modelo. Los flujos en cauces abiertos están gobernados por las fuerzas gravitacionales, fuerzas inerciales y fuerzas viscosas. Por ello, se decidió conservar el número de Froude (Fr), buscando la similitud en las fuerzas inerciales y gravitacionales que actúan sobre el escurrimiento del prototipo y el modelo físico. Para lograrlo, se supuso la identidad del número de Froude durante la realización del diseño, obteniendo relaciones de escala en las velocidades del escurrimiento y el caudal entrante como se muestra en las **Ecuaciones (3.2 y (3.3,**

$$u_r = \frac{u_m}{u_p} = \sqrt{h_r} \quad (3.2)$$

$$Q_r = \frac{Q_m}{Q_p} = L_r \cdot h_r^{1.5} \quad (3.3)$$

donde u_r representa la escala de la velocidad del flujo, Q_r representa a la escala del caudal, L_r representa la escala de la longitud horizontal y h_r representa la escala de la longitud vertical, donde las escalas están dadas por la razón entre los valores de los parámetros obtenidos en el modelo físico (m) y el prototipo (p). Estas relaciones fueron necesarias de cumplir para mantener idénticas las fuerzas inerciales y gravitacionales entre el prototipo y el modelo.



El número de Reynolds (Re) corresponde a la razón entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas en el escurrimiento. En cauces abiertos, este parámetro es fundamental para conservar el comportamiento del escurrimiento, siendo un parámetro adimensional elemental al momento de realizar el escalamiento del prototipo. Lamentablemente, mantener la similitud entre el número de Froude y el número de Reynolds de forma simultánea no es posible si se utiliza el mismo fluido del prototipo en el modelo físico. A pesar de ello, es posible relajar la similitud de este parámetro, siempre y cuando se verifique que el escurrimiento del modelo se encuentre en un régimen completamente turbulento, como el observado en el prototipo. Esta condición es posible debido al comportamiento invariante del

escurrimiento para rangos del número de Reynolds lo suficientemente grandes (Heller, 2017). Entonces, para lograr mantener un régimen completamente turbulento en el modelo físico, se distorsiono verticalmente el modelo. Se decidió utilizar una escala vertical $h_r = 1:26$, asociado a un factor de distorsión de 2.5. Este criterio de diseño permitió evitar que las profundidades del escurrimiento sobre el modelo fueran pequeñas, logrando que el flujo sobre el modelo sea completamente turbulento y evitando además los efectos de tensión superficiales producidos en escurrimientos poco profundos.



Posteriormente, para conservar la condición de transporte incipiente de los sedimentos observados en el prototipo, fue necesario conservar los parámetros adimensionales que gobiernan el transporte de sedimentos. El número de Reynolds de la pared (Re_p) es la relación entre las fuerzas viscosas y las fuerzas inerciales que actúan sobre las partículas del lecho. De igual manera que el Reynolds del escurrimiento, fue posible relajar la similitud de este parámetro. Para ello, se verifico que el tipo de pared del modelo fuese hidráulicamente rugoso, correspondiente al mismo tipo de pared observada en el prototipo. El número de Shields (θ) corresponde a la relación entre las

fuerzas de corte y las fuerzas gravitacionales que actúan sobre las partículas del lecho, siendo el parámetro adimensional que nos permite caracterizar el transporte incipiente de los sedimentos en el modelo y el prototipo. Para lograr la similitud del número de Shields, fue necesario escalar geoméricamente la fracción gruesa del sedimento, buscando conservar el valor del número de Shields observado en el prototipo en el modelo físico. En la **Ecuación** (3.4) se muestra la relación utilizada para la determinación del diámetro del sedimento a ocupar en el modelo físico, obtenida al considerar la identidad del número de Shields durante el diseño,

$$d_r = \frac{h_r^2}{L_r} \rightarrow d_m = \frac{d_p h_r^2}{L_r} \quad (3.4)$$

donde d_r representa la escala del diámetro del sedimento, que corresponde a la relación entre el diámetro elegido en el modelo físico (m) y el diámetro observado en el prototipo (p). Por lo tanto, como criterio de diseño se seleccionó una arena con un diámetro entre 1 y 2 mm, con un peso específico de 2.65 ton/m³. El sedimento elegido permite que el comportamiento del transporte de sedimentos en el modelo físico sea similar al observado en el

prototipo. Cabe señalar que la fracción fina no fue considerada para la realización de los ensayos, permitiendo ignorar la condición de similitud de la velocidad de caída de la partícula.

3.3.2. Instalación y procedimientos experimentales

El experimento fue realizado en el laboratorio de Ingeniería Hidráulica y Ambiental de la Universidad de Concepción. Se construyó un modelo físico de la bocatoma Tinguiririca de 17.7 m de largo y 12.5 m de ancho, el cual fue alimentado mediante un circuito cerrado compuesto por una bomba sumergible. Esta bomba impulsó el flujo de forma constante desde un sumidero ubicado en el extremo aguas abajo del modelo, pasando a través de las tuberías hacia un estanque de alimentación ubicado aguas arriba del modelo (**Figura 3.2**). El caudal fue controlado mediante la abertura de la válvula y un sensor de profundidad, ajustando un caudal constante de alimentación mediante una curva de descarga construida en ensayos previos y verificando cada 1 minuto la magnitud del caudal mediante mediciones de profundidad en el estanque de alimentación.

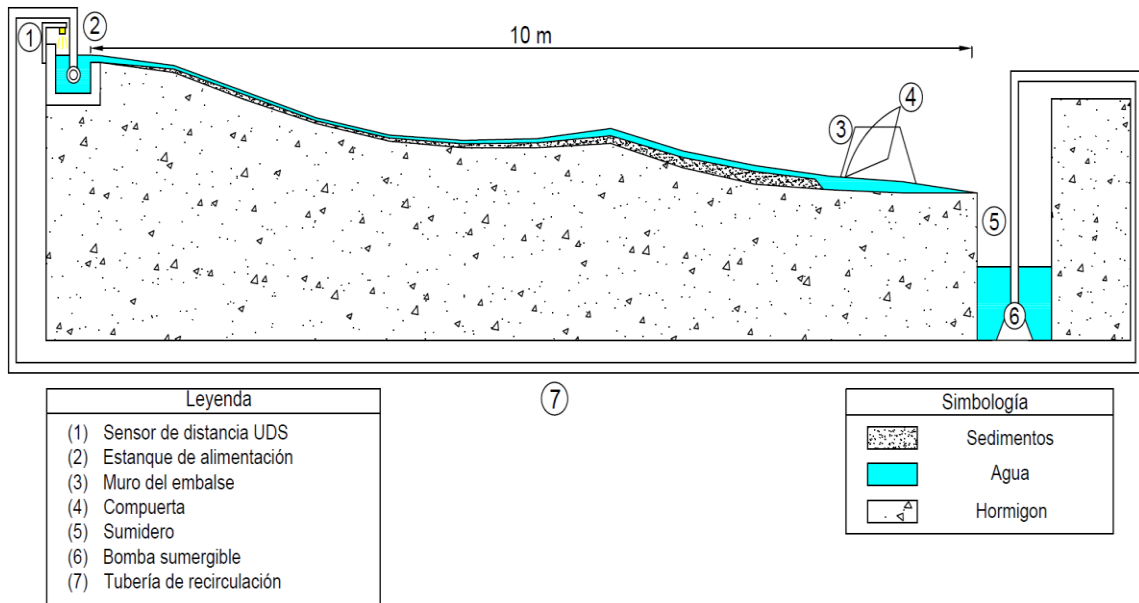


Figura 3.2 Esquema longitudinal de la instalación experimental.

A lo largo del ensayo, el sedimento fue agregado de forma manual al modelo en las cercanías al estanque de alimentación, buscando que fuera transportado de forma natural por el flujo hacia el reservorio del embalse. Para lograr la similitud del transporte incipiente entre el modelo y el prototipo, en los ensayos se utilizó una arena de diámetro entre 1 a 2 mm, con un peso específico de 2.65 ton/m^3 . Se completo un total de 8 ensayos bajo las mismas condiciones experimentales y operacionales. Estos ensayos fueron realizados utilizando un caudal constante de 3.5 l/s , valor que al ser escalado equivale a un caudal de $30.2 \text{ m}^3/\text{s}$ en el prototipo, correspondiente a una crecida que ocurre a lo menos 3 veces al año. Todos los ensayos tuvieron una duración

de 6 horas, permitiendo la formación y desarrollo de un delta de sedimentos en la cola del embalse producto de la acumulación de sedimentos en el reservorio, como también el desarrollo de canales principales y secundarios sobre el lecho del delta, como se muestra en la **Figura 3.3**.

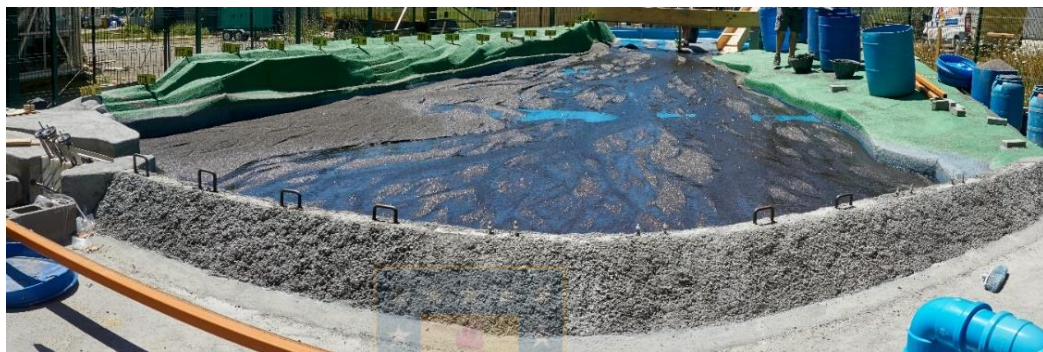


Figura 3.3 Vista lateral del delta de sedimentos formado en el modelo físico.

Los ensayos fueron realizados con las compuertas del modelo físico completamente abiertas, buscando un estado de equilibrio en la cota de operación del embalse durante la formación de los deltas de sedimento sobre el modelo.

3.3.3. Técnicas de medición

Se obtuvieron imágenes digitales de la superficie del modelo y, en específico, de la superficie del lecho. La medición de los ensayos se realizó con el lecho

previamente secado, con el fin de prevenir distorsiones en las fotografías por efecto del agua durante las mediciones. Para la captura de las fotografías, se utilizó un dron DJI Phantom 4 con una cámara de alta resolución y un estabilizador integrado. Se realizó un plan de vuelo sobre el modelo físico, permitiendo abarcar la superficie total del modelo escala y capturar fotografías de forma perpendicular al lecho, con un tamaño de 5462x3648 píxeles cada una. Se obtuvieron un promedio de 269 fotografías para cada ensayo, alcanzando un traslape entre fotografías cercano al 80%. Este porcentaje fue variable a lo largo de la extensión del modelo físico, debido a que el desplazamiento del dron presentó velocidades variables durante su vuelo manual, producto de la imposibilidad de realizar un vuelo automático al no contar con una señal GPS (del inglés, *Global Positioning System*) estable en la ubicación del modelo. Las fotogrametrías obtenidas fueron procesadas mediante el programa Agisoft Photoscan 1.4, el cual utiliza el método *Structure from Motion* (Javernick, Brasington y Caruso, 2014; Leduc, Peirce y Ashmore, 2019) para convertir cada fotogrametría realizada en ortomosaicos y Modelos Digitales de Elevación (MDEs) de alta resolución. Para georreferenciar la fotogrametría del modelo físico se

marcaron 18 puntos de control sobre la superficie seca del modelo, como se observa en la **Figura 3.4**.

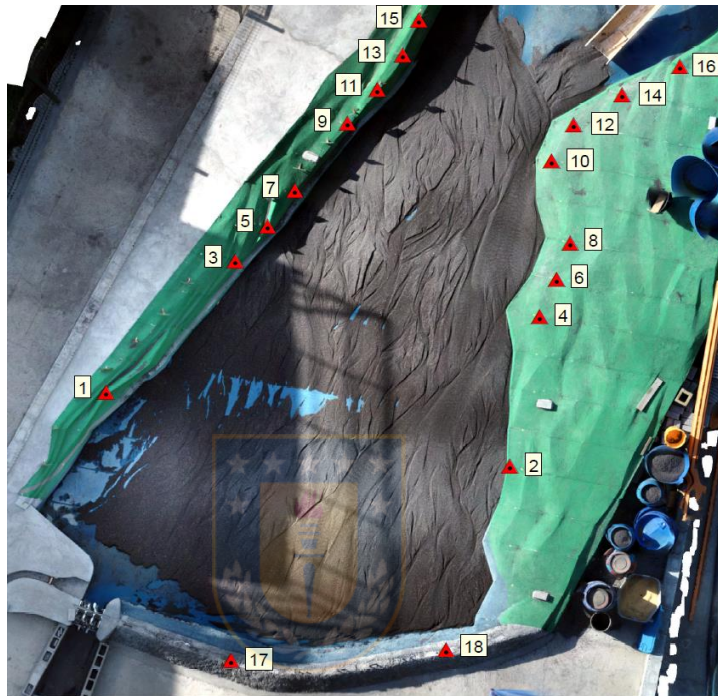


Figura 3.4 Puntos de control sobre el modelo físico.

La posición de los puntos de control fueron medidas mediante una estación total Foretech NTS-325 con un sistema de coordenadas locales centrado en el instrumento, obteniendo una precisión altimétrica y planimétrica de ± 1 mm y ± 10 mm, respectivamente. Estos puntos de control fueron localizados manualmente en el programa Agisoft Photoscan 1.4, añadiendo sus coordenadas (x,y,z) respectivas dentro del sistema de referencia local creado. Se construyeron 8 MDEs y ortomosaicos de los 8 ensayos realizados,

los cuales fueron reescalados geoméricamente a las proporciones del prototipo para ser posteriormente comparados. Las precisiones altimétrica y planimétrica de cada MDE dependen de los errores generados durante la construcción de los MDEs con el programa Agisoft Photoscan 1.4 y los errores de medición de los puntos de control sobre el modelo físico. Por lo anterior, las precisiones planimétricas y altimétricas para cada uno de los MDEs obtenidos fueron calculadas utilizando la propagación de errores.

3.4. Determinación de los índices morfométricos

En los ortomosaicos y modelos digitales de elevación fueron generadas 14 secciones transversales sobre el sistema de referencia local, con un espaciamiento de 39 m entre ellos. Utilizando el programa ArcGIS 10.5 se digitalizaron las elevaciones en cada una de las secciones transversales, con la finalidad de medir distintos índices morfométricos sobre los deltas formados en el reservorio del modelo físico. Del mismo modo, se obtuvieron los perfiles longitudinales de los deltas entre el pie del embalse y el inicio de la planicie deltaica, siendo utilizados para estimar la pendiente longitudinal del delta al finalizar cada ensayo.

Las 14 secciones transversales digitalizadas en cada ensayo fueron analizadas con un código MATLAB, detectando todos los canales que cruzan cada una de estas secciones. Para lograrlo, se identificaron los cambios de gradiente entre los puntos de elevación de cada perfil previamente suavizados, permitiendo aislar cada canal detectado y, posteriormente, determinar la profundidad y el ancho de cada canal con respecto al nivel de referencia en donde fue encontrado el cambio de curvatura del perfil. Los perfiles longitudinales fueron analizados mediante regresión lineal, buscando obtener la pendiente longitudinal del delta al finalizar cada uno de los ensayos.

Se identificaron un total de 6 índices morfométricos sobre los deltas de sedimentos formados en cada ensayo, siendo considerados como buenos indicadores para caracterizar la morfología de deltas en embalses. Estos índices tienen su fundamento en las variables posibles de obtener de los MDEs construidos y en base a distintos autores que han estudiado la evolución morfológica de ríos trenzados y deltas de sedimentos mediante datos de terreno y en modelos físicos a escala.

El primer índice morfométrico utilizado corresponde al número de canales (Egozi y Ashmore, 2009; Ettema y Armstrong, 2019; Olariu y Bhattacharya, 2006; Vesipa *et al.*, 2018). El segundo índice corresponde al ancho de los canales (Olariu y Bhattacharya, 2006; Vesipa *et al.*, 2018). El tercer índice corresponde a la profundidad de los canales (Olariu y Battacharya, 2006; Vesipa *et al.*, 2018). El cuarto índice corresponde a la razón ancho-profundidad de los canales, la cual está definida por la **Ecuación (3.5)**,

$$WD = \frac{w}{d} \quad (3.5)$$



donde WD corresponde a la razón ancho-profundidad del canal, w es el ancho del canal y d es la profundidad del canal. El quinto índice corresponde a la densidad de canales (Olariu y Battacharya, 2006), siendo definido como la razón entre el número de canales y el ancho del delta en la sección transversal analizada, como se muestra en la **Ecuación (3.6)**,

$$D_c = \frac{N}{W} \quad (3.6)$$

donde D_c corresponde a la densidad de canales, N es el número de canales y W es el ancho del delta en la sección transversal analizado. Por último, el sexto índice utilizado es la pendiente longitudinal del delta (Sindelar *et al.*, 2019), siendo definida como la razón entre la diferencia de cota y la longitud medida entre el pie del embalse y el inicio de la planicie del delta, como se muestra en la **Ecuación (3.7)**,

$$\Delta = \frac{\Delta z}{L} \quad (3.7)$$



donde Δ corresponde a la pendiente del delta, Δz es la diferencia de elevación y L es la longitud del delta medida entre el pie del embalse y el inicio de la planicie del delta.

3.5. Propagación de errores

La precisión de cada MDE construido depende de los errores generados durante la medición de los deltas de sedimentos formados sobre el modelo físico. Por lo tanto, la precisión altimétrica y planimétrica de los MDEs dependerá de los errores generados durante la medición de los puntos de

control y la construcción de los MDEs utilizando las fotogrametrías obtenidas, proceso que fue realizado con el programa Agisoft Photoscan 1.4. Debido a lo anterior, la precisión planimétrica y altimétrica de cada MDE fue determinada mediante la propagación de errores, siguiendo la expresión mostrada en la **Ecuación (3.8)**,

$$e_{MDE} = \pm \sqrt{(e_{pc})^2 + (e_c)^2} \quad (3.8)$$

Donde e_{MDE} corresponde a las precisiones altimétricos o planimétricas obtenidas para cada MDE construido, e_{pc} son los errores altimétricos o planimétricos generados durante la medición de los puntos de control y e_c son los errores altimétricos o planimétricos generados durante la construcción de los MDEs mediante el programa Agisoft Photoscan 1.4.

Debido a las precisiones obtenidas, resulto de interés cuantificar la incertidumbre en los índices morfométricos obtenidos. La expresión general para el cálculo del error de propagación para una variable a , dependiente de múltiples variables $b, c \dots, x$ e y , está definida por la expresión mostrada en la **Ecuación (3.9)**,

$$\delta a = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial b} \delta b\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial c} \delta c\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial x} \delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \delta y\right)^2} \quad (3.9)$$

donde δb , δc , δx e δy corresponden a los errores en las variables b , c , x e y , respectivamente. Por lo tanto, utilizando la expresión anterior fue posible determinar el error de los 6 índices morfométricos medidos sobre los deltas de sedimentos formados en el modelo físico. El primer índice analizado correspondió al ancho de los canales, cuyo error asociado es igual a la precisión planimétrica del MDE. El segundo índice analizado correspondió a la profundidad de los canales, cuyo error asociado es igual a la precisión altimétrica del MDE. El tercer índice analizado correspondió al número de canales, índice que fue obtenido mediante un programa MATLAB y siendo verificado sus resultados, posteriormente, mediante inspección visual. Para estudiar el caso más desfavorable, se supuso un error de ± 1 canales, producto de la sensibilidad del código para identificar estos canales en cada una de las secciones transversales suavizadas.

Los índices morfométricos restantes corresponden a la densidad de canales, la razón ancho-profundidad y la pendiente longitudinal del delta. El error de estos índices morfométricos fue determinado mediante la **Ecuación** (3.9), debido a que estos índices dependen de más de 1 variable. La densidad de canales depende del número de canales y el ancho del delta. Por ende, la expresión del error de este índice va a estar definida por la **Ecuación** (3.10),

$$\delta D_C = \pm \sqrt{\left(\frac{1}{W} \delta N\right)^2 + \left(-\frac{N}{W^2} \delta W\right)^2} \quad (3.10)$$

Donde δN corresponde al error en el número de canales y δW es el error en el ancho del delta, siendo este último término igual a la precisión planimétrico del MDE. En el caso de la razón ancho-profundidad, esta relación depende del ancho y la profundidad de los canales. Por lo tanto, la expresión del error de este índice estará definido por la **Ecuación** (3.11),

$$WD = \pm \sqrt{\left(\frac{1}{d} \delta w\right)^2 + \left(-\frac{w}{d^2} \delta d\right)^2} \quad (3.11)$$

donde δw corresponde al error en la medición del ancho de los canales, siendo este término igual a la precisión planimétrica del MDE y δd es el error en la medición de la profundidad de los canales, siendo este término igual a la precisión altimétrico del MDE. Por último, la pendiente longitudinal del delta depende de la diferencia entre las cotas de elevación y la longitud del perfil longitudinal entre el pie del embalse y el inicio de planicie del delta. Por lo tanto, el error de la pendiente longitudinal estará definida como se muestra en la **Ecuación (3.12)**,

$$\Delta = \pm \sqrt{\left(\frac{1}{L} \delta z\right)^2 + \left(-\frac{z}{L^2} \delta L\right)^2} \quad (3.12)$$

donde δz corresponde al error en la diferencia de elevación del delta, siendo este término igual a la precisión altimétrico del MDE y δL es el error en la longitud del perfil longitudinal, siendo este término igual a la precisión planimétrico del MDE.

Para observar la incertidumbre sobre cada índice morfométrico, fue necesario calcular el error relativo asociado, el cual corresponde a la razón entre el error

absoluto del índice calculado y los valores reales del índice en cada sección transversal analizada, siendo este expresado en porcentaje, como se muestra en la **Ecuación** (3.13,

$$e_r (\%) = \frac{|e_a|}{X_i} \cdot 100 \quad (3.13)$$

donde e_r corresponde al error relativo del índice morfométrico, e_a corresponde al error absoluto del índice morfométrico y X_i corresponde al valor real del índice morfométrico observado. Mediante el error relativo se analizó la incertidumbre de cada índice en cada uno del ensayo realizado, con el fin de observar qué índices son más imprecisos de obtener de los modelos digitales de elevación construidos.

3.6. Análisis estadístico

3.6.1. Repetibilidad de ensayos

Para estudiar la repetibilidad del ensayo realizado se formaron 8 deltas de sedimentos sobre el modelo físico utilizando el mismo procedimiento

experimental y la misma técnica de medición descritas en los **Capítulos 3.3.2 y 3.3.3**. La repetibilidad fue estudiada comparando los índices morfométricos determinados en cada uno de los ensayos. Los índices comparados fueron el ancho de canales, la profundidad de los canales y la razón ancho-profundidad. Estos 3 índices fueron idóneos para la realización de la comparación debido a que, en cada sección transversal analizada, el número de datos obtenidos para cada uno de estos índices era igual al número de canales identificados en la sección, permitiendo generar grupos de datos por índice lo suficientemente grandes para poder ser comparado mediante pruebas estadísticas. Cabe mencionar que los grupos de datos construidos corresponden a los valores de un índice morfométrico en una de las secciones transversales analizadas, para un delta de sedimentos determinado. En otras palabras, se tendrán 8 grupos de valores para cada uno de los 3 índices (uno grupo por cada ensayo), en cada una de las secciones transversales. La prueba estadística elegida para realizar la comparación estadística fue la prueba no paramétrica Kruskal-Wallis, debido a que los grupos obtenidos no presentaron distribuciones normales, teniendo menos de 20 valores en cada grupo y siendo estos grupos independientes entre sí. Por lo tanto, la prueba Kruskal-Wallis fue idónea para la comparación de estos grupos, debido al

menor número de restricciones necesarios para su aplicación. La prueba consiste en agrupar los grupos en una misma población, cambiando los valores observados por rangos y permitiendo comparar más de 2 grupos de datos, con la finalidad de encontrar diferencias entre estos. La hipótesis nula de la prueba establece que las distribuciones de los grupos de la población son iguales, en contra de la hipótesis alternativa que establece que a lo menos dos grupos de la población presentan distribuciones significativamente diferentes. Otra interpretación de la prueba puede realizarse cuando los grupos presentan formas de distribución similares, permitiendo establecer como hipótesis nula que las medianas de los grupos de la población son iguales, en contra de la hipótesis alternativa, que establece que a lo menos dos grupos de la población presentan medianas significativamente diferentes. La prueba estadística fue trabajada con un nivel de significancia de 0.05, valor recomendado para la utilización de la prueba Kruskal-Wallis.

3.6.2. Similitud con el prototipo

Para poder estudiar la similitud de la morfología en deltas de sedimentos en embalses, se decidió comparar las características morfológicas de los deltas

formados sobre el modelo físico con el delta de sedimentos observado en el área de estudio. Se utilizaron una serie de 5 imágenes satelitales obtenidas de *Google Earth*, las cuales permitieron observar la morfología del delta en 5 instantes distintos entre los años 2013 y 2016, años anteriores al evento de flujo hiperconcentrado y dendrítico que sufrió el embalse (

Figura 3.5). Estas imágenes satelitales presentaron una resolución de 0.5 m/píxel, permitiendo observar los canales primarios y secundarios formados sobre el delta. Fue posible obtener de estas imágenes satelitales 3 índices morfométricos en cada una de las 14 secciones transversales generadas previamente sobre el modelo físico, secciones que tuvieron que ser georreferenciados en el sistema de coordenadas de las imágenes satelitales. Los índices morfométricos posibles de medir utilizando las imágenes satelitales disponibles fueron el número de canales, el ancho de canales y la densidad de canales. Cabe mencionar que no fue posible obtener modelos digitales de elevación para estas cinco fechas específicas, lo cual imposibilitó la obtención de los índices restantes: la profundidad de los canales, la razón ancho-profundidad y la pendiente longitudinal del delta.

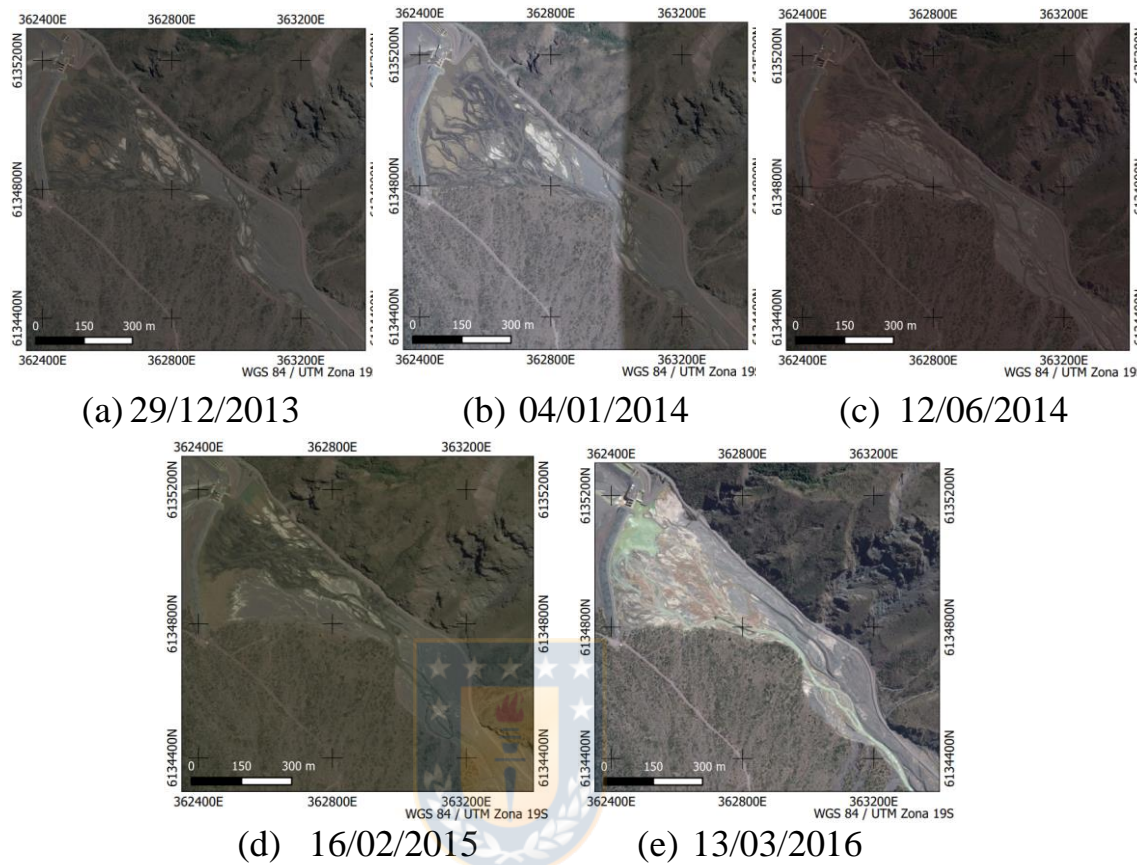


Figura 3.5 Imágenes satelitales obtenidas de Google Earth desde diciembre de 2013 a marzo de 2016.

3.7. Conclusiones

En este capítulo, el modelo físico de la bocatoma Tinguiririca es diseñado mediante criterios de escalamiento y recomendaciones entregadas por diversos autores que han estudiado procesos similares en modelos físicos a escala. Estos criterios permitieron conservar los adimensionales de Froude y

Shields, siendo fundamental para aproximar comportamiento del flujo y el transporte de sedimento del prototipo en el modelo físico construido.

Se ideó un procedimiento experimental que permitió realizar varias veces un mismo ensayo en el modelo físico construido. Esto permitió formar deltas de sedimentos en cada ensayo, cuya morfología fue posible de medir utilizando una cámara de alta resolución montada en un dron. Fueron seleccionados 6 índices morfométricos para caracterizar la morfología de los deltas modelados y el delta observado en la realidad, debido a que son fáciles de obtener en modelos digitales de elevación y son utilizados en por distintos autores en estudios similares.

Para analizar repetibilidad del ensayo, se procedió a comparar la morfología entre cada delta modelado mediante una prueba estadística no paramétrica, mientras que el análisis de similitud fue realizado comparando la morfología de los deltas modelados con la morfología del delta observado en la realidad, siendo esta última obtenida de imágenes satelitales. Se propone realizar estas comparaciones utilizando los índices morfométricos seleccionados para caracterizar morfológicamente los deltas en este trabajo.

Adicionalmente, la utilización de drones para medir la morfología de deltas de sedimentos en modelos físicos aún no ha sido aplicada en estudios similares, siendo de interés observar con que precisiones se pueden medir la morfología de los deltas modelados.



CAPÍTULO 4: RESULTADOS

4.1. Introducción

En este capítulo se presentan los modelos digitales de elevación de cada delta formado y sus precisiones asociadas. Los deltas resultantes fueron caracterizados morfológicamente mediante índices morfométricos, siendo estos índices comparados para analizar la repetibilidad y similitud de la formación deltas de sedimentos en un modelo físico a escala. Finalmente, se obtuvieron los errores relativos de cada índice morfométrico, considerando las precisiones obtenidas en cada modelo digital de elevación construido.

4.2. Modelos digitales de elevación

Fueron construidos un total de 8 modelos digitales de elevación, utilizando las fotogrametrías realizadas sobre los deltas de sedimentos formados al término de los 8 ensayos realizados bajo las mismas condiciones (

Figura 4.1). Estas presentan resoluciones que van a 5 a 10 cm/píxel, permitiendo identificar los canales primarios y secundarios desarrollados sobre los deltas a lo largo de cada ensayo.

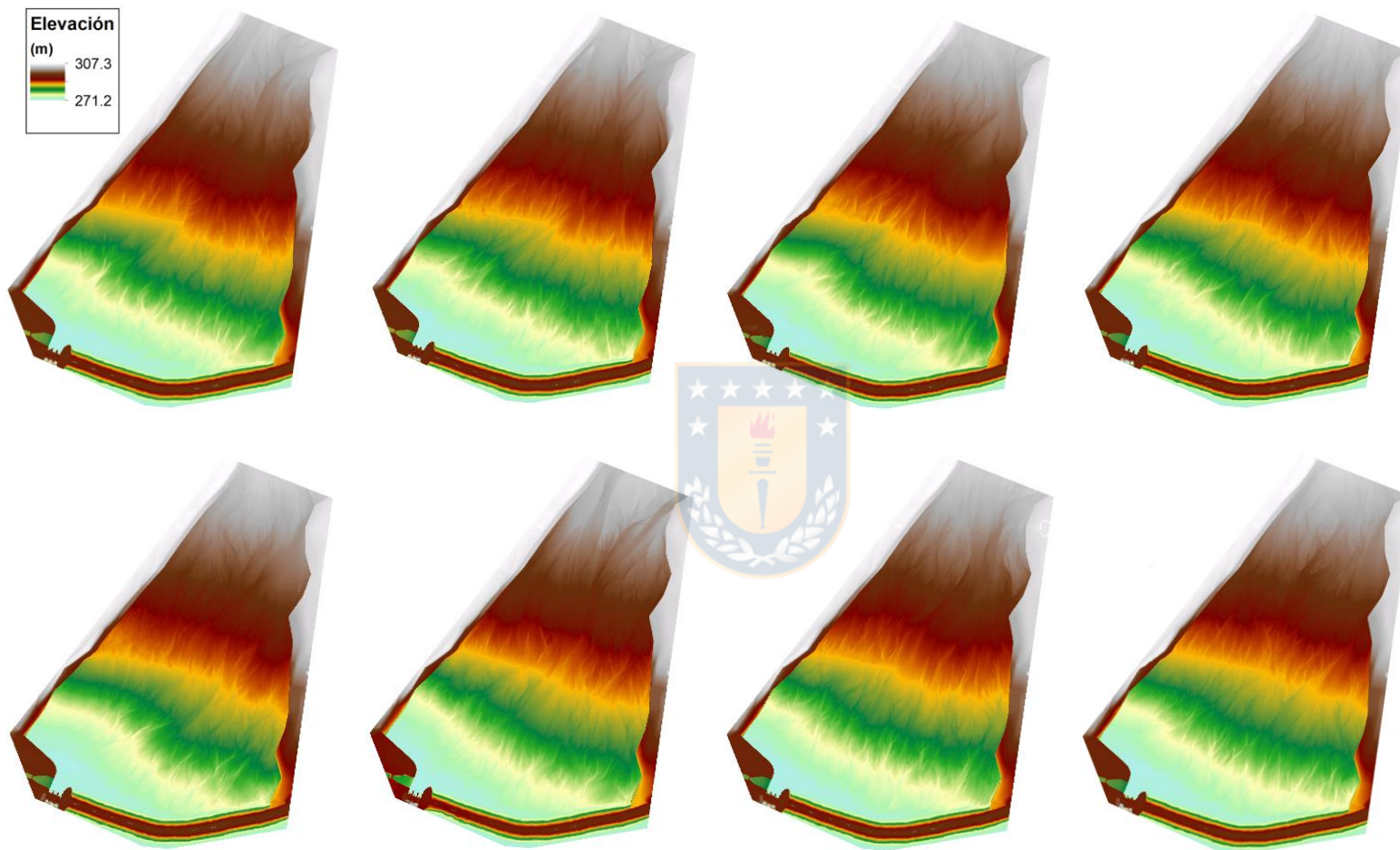


Figura 4.1 Modelos digitales de elevación de los 8 ensayos realizados bajo mismas condiciones experimentales y de operación.

En la **Tabla 4.1** se muestran las precisiones altimétricas y planimétricas obtenidas para los MDE de los 8 deltas de sedimentos formados al finalizar cada ensayo, en las dimensiones del modelo y a escala real, junto a la media y desviación estándar de los resultados.

Tabla 4.1 Precisiones planimétricas y altimétricas de los 8 ensayos realizados bajo mismas condiciones experimentales y de operación, en dimensiones del modelo y a escala real.

Ensayo	Modelo		A escala real	
	Precisión planimétrica (mm)	Precisión altimétrica (mm)	Precisión planimétrica (m)	Precisión altimétrica (m)
1	15.8	5.7	1.03	0.15
2	16.9	6.0	1.10	0.16
3	16.1	5.2	1.04	0.14
4	16.3	6.6	1.06	0.17
5	16.2	5.3	1.05	0.14
6	16.5	5.0	1.07	0.13
7	16.8	5.4	1.09	0.14
8	16.7	5.5	1.08	0.14
Promedio	16.4	5.6	1.07	0.15
Desviación estándar	0.4	0.5	0.02	0.01

4.3. Análisis de repetibilidad

4.3.1. Número de canales

En la **Figura 4.2** se muestra el gráfico de caja de los números de canales medidos en las 14 secciones transversales, para los 8 deltas de sedimentos formados durante los ensayos.

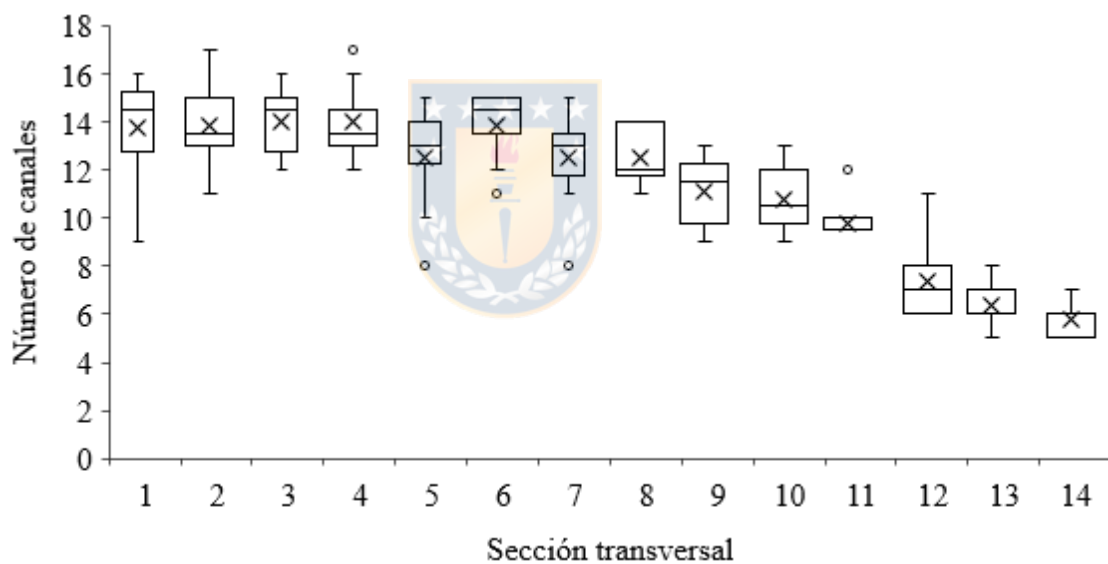


Figura 4.2 Gráfico de caja del número de canales en cada sección transversal del delta para los 8 ensayos realizados.

Notar que la sección transversal 14 corresponde a la sección más alejada al muro de la presa, la cual se encuentra a 595 m de distancia al pie del muro del embalse. Mientras que la sección transversal 1 corresponde a la sección más cercana al muro, encontrándose a 88 m de distancia al pie del muro del

embalse. Se puede observar que la media en el número de canales aumenta gradualmente hacia aguas abajo desde la sección transversal 14 hasta la sección 8 (595 a 361 m de distancia al pie del muro), de 6 a 13 canales. Mientras que, en las secciones cercanas al muro, entre las secciones transversales 7 y 1 (322 m a 88 m de distancia al pie del muro), se observa una estabilización de la media en el número de canales, con valores que van entre 13 y 14 canales. Además, se aprecia que las dispersiones en el número de canales son mayores en estas secciones más cercanas al muro, observando desviaciones estándar que van entre 1.4 y 2.2 canales, mientras que en las secciones más aguas arriba se observan dispersiones menores, con desviaciones estándar que van entre 0.7 y 1.7 canales.

4.3.2. Densidad de canales

En la **Figura 4.3** se muestra el gráfico de caja de las densidades de canales obtenidas en las 14 secciones transversales, para los 8 deltas de sedimentos formados durante los ensayos.

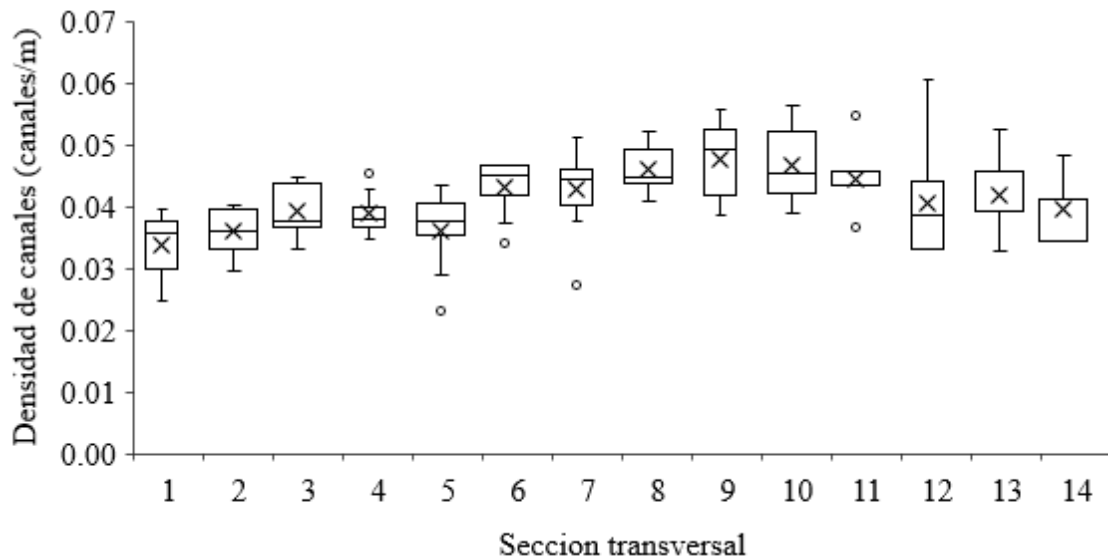


Figura 4.3 Gráfico de caja de la densidad de canales en cada sección transversal del delta para los 8 ensayos realizados.

Se puede apreciar un aumento gradual, hacia aguas abajo, en la densidad de canales media desde la sección transversal 14 hasta la sección 9 (565 a 400 m de distancia al pie del muro), de 0.040 a 0.048 canales/m, observando además una mayor dispersión en la densidad de canales de estas secciones, con desviaciones estándar que van entre 0.005 y 0.009 canales/m. Mientras que, desde la sección transversal 8 a la sección 1 (361 a 88 m de distancia al pie del muro), se observó la disminución gradual, hacia aguas abajo, de la densidad de canales media para cada sección, obteniendo valores que van de 0.046 a 0.034 canales/m. Además, se aprecian dispersiones menores a las observadas en las secciones aguas arriba del delta, con desviaciones estándar

que van entre 0.003 y 0.007 canales/m. Cabe mencionar que el aumento gradual de la densidad de los canales entre las secciones 14 y 9 es debido al aumento en el número de canales hacia aguas abajo y al reducido incremento en el ancho del delta en estas secciones. Mientras que entre las secciones 8 y 1, el número de canales se estabiliza y el ancho del delta aumenta gradualmente hacia aguas abajo, provocando la disminución gradual en la densidad de canales.

4.3.3. Ancho de canales



En la **Figura 4.4** se muestra el gráfico de caja del ancho de los canales promedio obtenidos en las 14 secciones transversales, para los 8 deltas de sedimentos formados durante los ensayos. Se observa que, entre las secciones transversales, la media en el ancho de los canales promedio varía entre 8.4 y 13.8 m, apreciando que las secciones transversales 5 y 14 presentan valores de ancho de canales promedio mayores a los observados en las demás secciones del delta. Además, se puede apreciar que el ancho de los canales promedio, entre las secciones, presenta desviaciones estándar que van entre 1.1 y 3.9 m, observando las mayores dispersiones en el ancho de los canales

en las secciones más alejadas al muro de la presa, entre las secciones 14 y 8 (595 a 361 m de distancia al muro) específicamente.

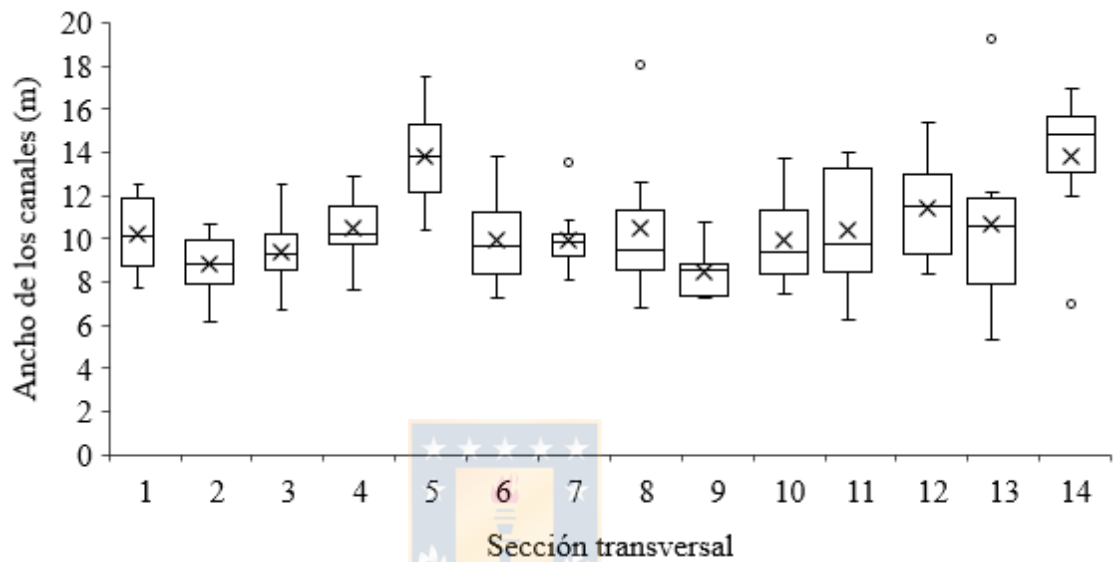


Figura 4.4 Gráfico de caja del ancho de los canales promedio en cada sección transversal del delta para los 8 ensayos realizados.

En la **Tabla 4.2** se muestran los resultados de la prueba estadística no paramétrica Kruskal-Wallis, realizada mediante la comparación del ancho de los canales obtenidos, en las 14 secciones transversales medidas, entre los deltas de sedimentos formados durante los ensayos.

Tabla 4.2 Prueba Kruskal-Wallis para los anchos de los canales obtenidos en cada sección transversal, comparando los 8 ensayos realizados.

Sección transversal	Prueba Kruskal-Wallis	
	Chi-cuadrado	Valor de p ($>\alpha$)
1	8.26	0.31
2	9.61	0.21
3	10.94	0.14
4	5.94	0.55
5	8.57	0.28
6	7.98	0.33
7	10.43	0.17
8	10.80	0.15
9	7.86	0.35
10	9.37	0.23
11	7.26	0.40
12	7.45	0.38
13	14.05	0.05
14	5.97	0.54

Se puede apreciar que los valores de p, en las 14 secciones transversales comparadas, son mayores al nivel de significancia propuesto para la prueba estadística ($\alpha = 0.05$). Por lo tanto, no existe evidencia para rechazar la hipótesis nula, la cual establece que la distribución de los 8 grupos (uno por cada ensayo) con valores de anchos de canales, al ser comparados las 14 secciones transversales entre los 8 deltas de sedimentos formados, son iguales entre ellos.

4.3.4. Profundidad de canales

En la **Figura 4.5** se muestra el gráfico de caja de las profundidades de canales promedio obtenida en las 14 secciones transversales, para los 8 deltas de sedimentos formados durante los ensayos.

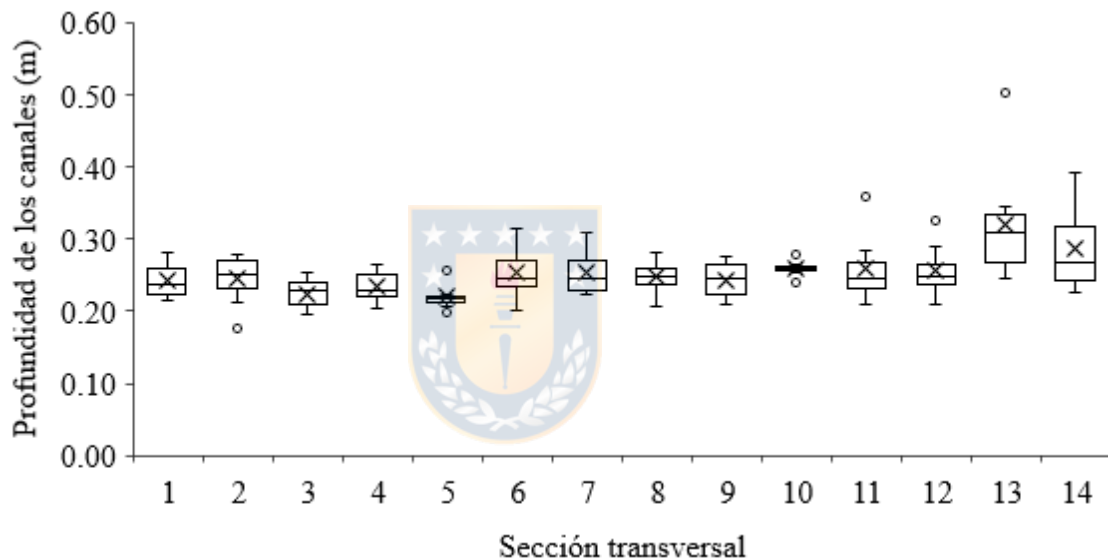


Figura 4.5 Gráfico de caja de la profundidad de los canales promedio en cada sección transversal del delta para los 8 ensayos realizados.

Se aprecia que las profundidades de canales promedios obtenidas en los ensayos presentan una mayor dispersión entre las secciones transversales 14 y 11 (595 a 478 m de distancia al pie del muro), observando desviaciones estándar que van de 0.04 a 0.08 m, con profundidades medias que van entre 0.25 y 0.32 m. Mientras que entre las secciones transversales 10 y 1 (439 a

88 m de distancia al pie del muro), se observa una menor dispersión entre las profundidades obtenidas en cada ensayo, con desviaciones estándar que van de 0.01 a 0.04 m y profundidades medias que van entre 0.22 y 0.26 m. En la **Tabla 4.3** se muestra los resultados de la prueba estadística no paramétrica Kruskal-Wallis, realizada mediante la comparación de las profundidades de canales obtenidas, en las 14 secciones transversales medidas, entre los deltas de sedimentos formados durante los ensayos.

Tabla 4.3 Prueba Kruskal-Wallis para las profundidades de los canales obtenidas en cada sección transversal, comparando los 8 ensayos realizados.

Sección transversal	Prueba Kruskal-Wallis	
	Chi-cuadrado	Valor de p ($>\alpha$)
1	7.78	0.35
2	7.19	0.41
3	6.81	0.45
4	9.87	0.20
5	2.55	0.92
6	11.54	0.12
7	8.58	0.28
8	10.16	0.18
9	5.35	0.62
10	0.72	1.00
11	8.38	0.30
12	7.91	0.34
13	5.17	0.64
14	5.85	0.56

Nuevamente, se puede apreciar que los valores de p, en las 14 secciones transversales comparadas, son mayores al nivel de significancia propuesto

para la prueba estadística. Por lo tanto, no existe evidencia para rechazar la hipótesis nula, la cual establece que la distribución de los 8 grupos (uno por cada ensayo) con valores de profundidad de canales, al ser comparados las 14 secciones transversales entre los 8 deltas de sedimentos formados, son iguales entre ellos.

4.3.5. Razón ancho-profundidad

En la **Figura 4.6** se muestra el gráfico de caja de la razón ancho-profundidad obtenida en las 14 secciones transversales, para los 8 deltas de sedimentos formados durante los ensayos. Se observa una dispersión similar a la observada en el ancho de los canales, debido a la directa relación que tienen estos índices morfométricos. Se obtienen desviaciones estándar que van de 5.1 a 11.2 m/m, observando medias en la razón ancho-profundidad de cada sección que van entre 36.2 y 63.2 m/m. Se puede apreciar que la sección transversal 5 presenta razones ancho-profundidad mayores a las observadas en las demás secciones transversales analizadas, siendo además la sección con mayor dispersión a lo largo del delta.

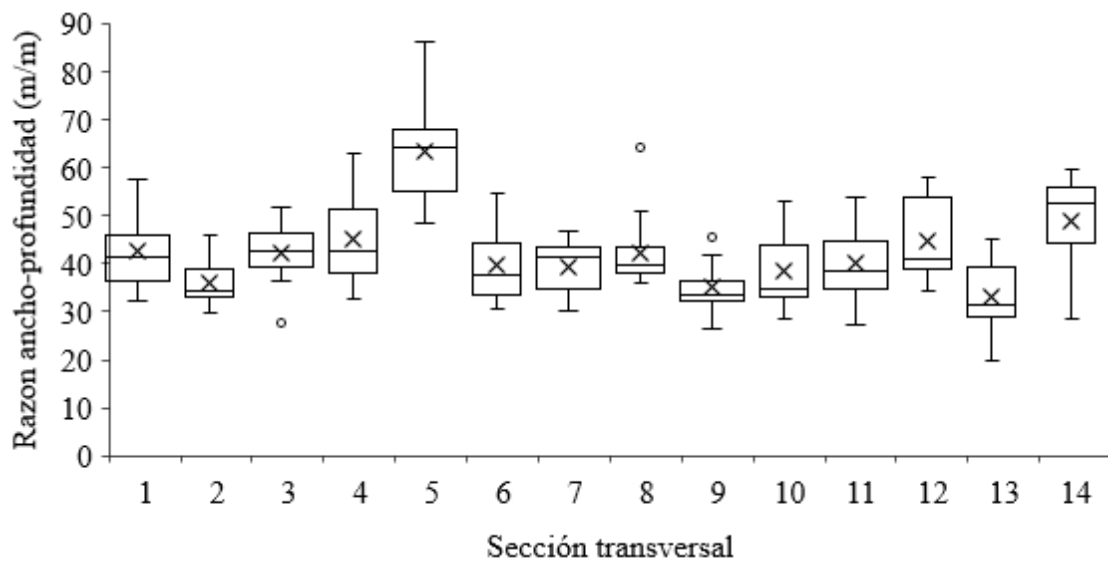


Figura 4.6 Gráfico de caja de la razón ancho-profundidad promedio en cada sección transversal del delta para los 8 ensayos realizados.

En la **Tabla 4.4** se muestra los resultados de la prueba estadística no paramétrica Kruskal-Wallis, realizada mediante la comparación de las razones ancho-profundidad obtenidas, en 14 secciones transversales medidas, entre los deltas de sedimentos formados durante los ensayos.

Tabla 4.4 Prueba Kruskal-Wallis para las razones ancho-profundidad obtenidas en cada sección transversal, comparando los 8 ensayos realizados.

Sección transversal	Prueba Kruskal-Wallis	
	Chi-cuadrado	Valor de p ($>\alpha$)
1	6.48	0.48
2	9.16	0.24
3	10.09	0.18
4	10.67	0.15
5	7.93	0.34
6	10.54	0.16
7	6.39	0.50
8	10.62	0.16
9	9.57	0.21
10	10.88	0.14
11	7.18	0.41
12	6.39	0.50
13	11.55	0.12
14	4.73	0.69

Al igual que en el ancho y la profundidad de los canales, se puede apreciar que los valores de p, en las 14 secciones transversales comparadas, son mayores al nivel de significancia propuesto para la prueba estadística. Por lo tanto, no existe evidencia para rechazar la hipótesis nula, la cual establece que la distribución de los 8 grupos (uno por cada ensayo) con valores de razón ancho-profundidad, al ser comparados las 14 secciones transversales entre los 8 deltas de sedimentos formados, son iguales entre ellos.

4.3.6. Pendiente longitudinal

En la **Tabla 4.5** se muestra la pendiente longitudinal obtenida en cada uno de los deltas formados, en los 8 ensayos realizados. No se observan grandes diferencias en las pendientes, obteniendo una pendiente longitudinal media de 0.056 m/m, con una desviación estándar de 0.001 m/m.

Tabla 4.5 Pendiente longitudinal del delta formado en los 8 ensayos realizados.

Ensayo	Pendiente longitudinal (m/m)
1	0.056
2	0.056
3	0.055
4	0.057
5	0.057
6	0.054
7	0.056
8	0.058
Max	0.058
Min	0.054
Promedio	0.056
Desviación estándar	0.001

4.4. Similitud con el prototipo

En la **Figura 4.7** se muestra el gráfico de caja perteneciente al número de canales observados en cada sección transversal, para los 8 deltas de

sedimentos formados durante los ensayos y para las 5 imágenes satelitales del delta de sedimentos observado en el prototipo, entre los años 2013 y 2016.

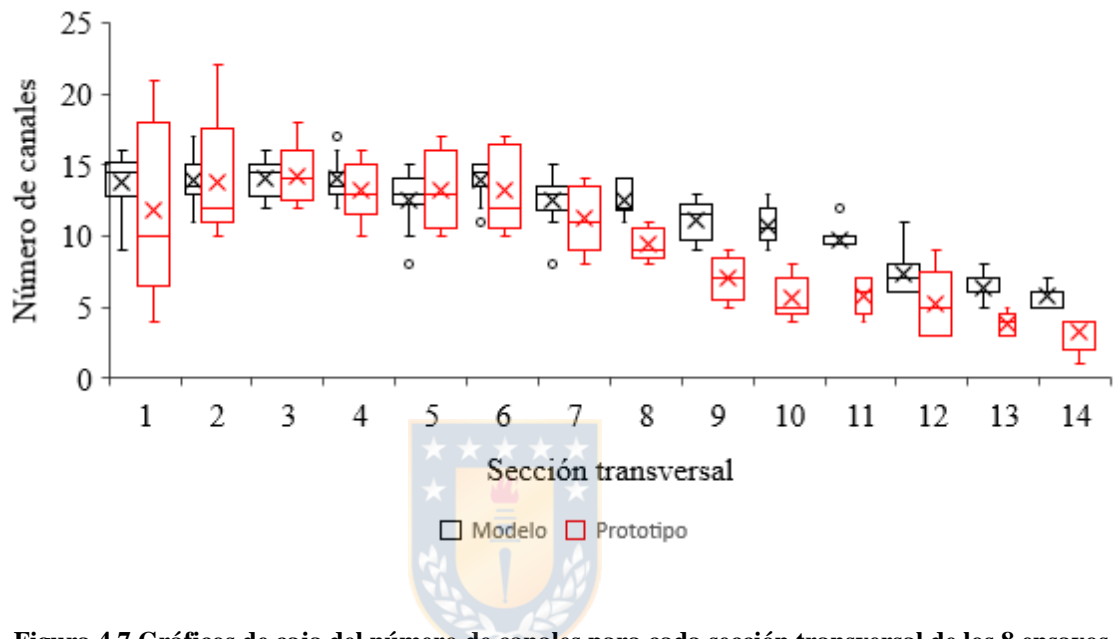


Figura 4.7 Gráficos de caja del número de canales para cada sección transversal de los 8 ensayos realizados sobre el modelo físico (negro) y las 5 imágenes satelitales obtenidas del prototipo (rojo).

Se puede apreciar que, en ambos casos, existe una tendencia al crecimiento en el número de canales desde la sección 14 hasta la sección 6 (595 a 283m de distancia al pie del muro), para luego mantenerse constante la media del número de canales entre 12 a 14 canales. Desde la sección 7 hacia aguas abajo (322 a 88 m de distancia al pie del muro), se observa que los valores de número de canales obtenidos en los deltas formados sobre el modelo físico están dentro de la dispersión de los valores de número de canales observados en las imágenes satelitales del prototipo, presentando medias similares con

diferencias que van entre 0 y 2 canales. En el caso del número de canales observados en el prototipo, estos presentaron una mayor dispersión en las secciones más cercanas al muro y en general, una mayor dispersión en todas las secciones transversales medidas, cuando son comparadas con los resultados obtenidos en los ensayos sobre el modelo físico.

En la **Figura 4.8** se muestra el gráfico de caja perteneciente al ancho de canales promedio obtenido en cada sección transversal, para los 8 ensayos realizados y las 5 imágenes satelitales del prototipo. Se puede observar que los anchos promedios medidos en las imágenes satelitales del prototipo presentan una menor dispersión, en general, que los anchos promedios de los canales medidos en los 8 deltas formados sobre el modelo físico. Además, se observó que el ancho de canales promedio obtenidos en los deltas modelados son mayores a los observados en el prototipo, encontrando las mayores diferencias en las secciones transversales 5, 4 y 3. No se observó una tendencia clara en los anchos de los canales medidos sobre los deltas de sedimentos formados en el modelo físico, como también a lo largo del delta del prototipo, pero es posible afirmar que el ancho promedio de los canales del prototipo, obtenidas de las imágenes satelitales, presenta menores

diferencias entre sus secciones transversales que los resultados de los ensayos realizados en el modelo físico.

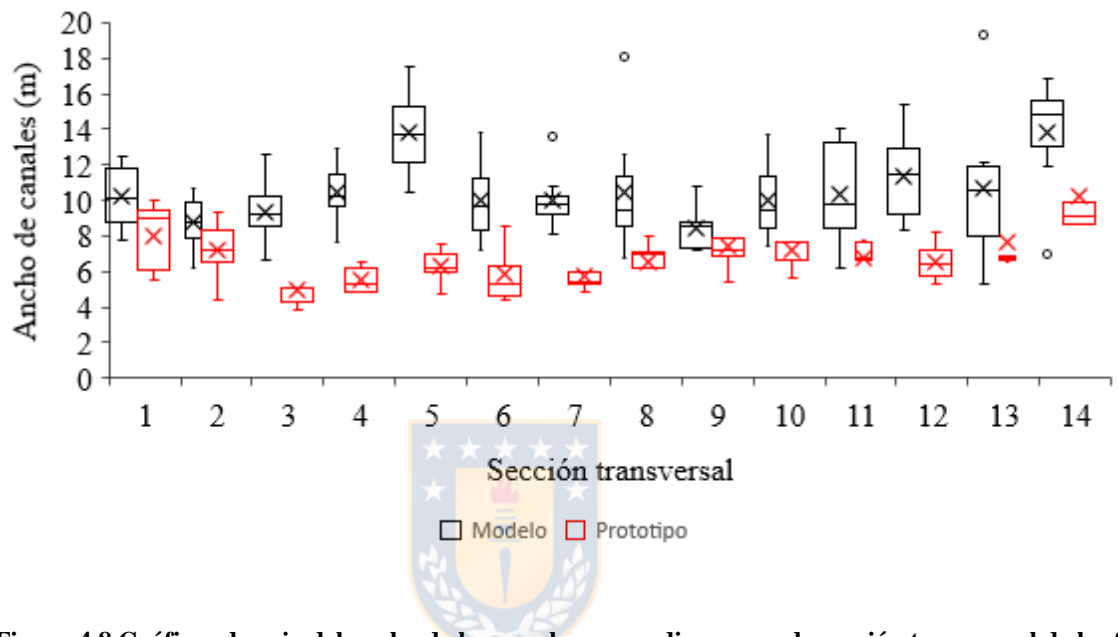


Figura 4.8 Gráficos de caja del ancho de los canales promedio para cada sección transversal de los 8 ensayos realizados sobre el modelo físico (negro) y las 5 imágenes satelitales obtenidas del prototipo (rojo).

En la **Figura 4.9** se muestra el gráfico de caja perteneciente a la densidad de canales obtenido en cada sección transversal, para los 8 ensayos realizados y las 5 imágenes satelitales del prototipo.

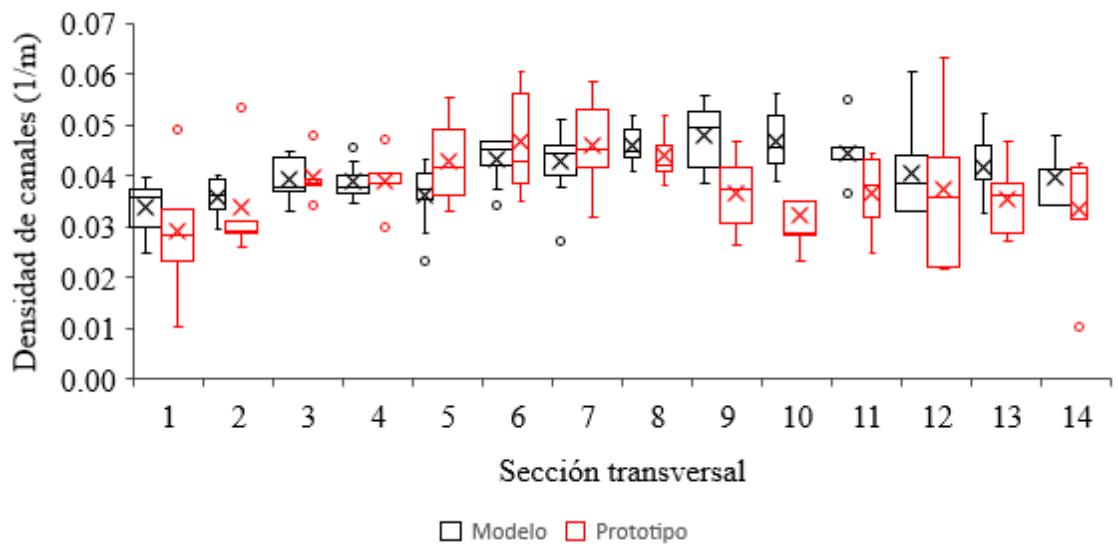


Figura 4.9 Gráficos de caja de la densidad de canales para cada sección transversal de los 8 ensayos realizados sobre el modelo físico (negro) y las 5 imágenes satelitales obtenidas del prototipo (rojo).

Es posible apreciar, para ambos casos, que la densidad de canales aumenta desde la sección más aguas arriba del delta hasta la sección transversal 8 (595 a 361 m de distancia al muro), debido al reducido ensanchamiento del delta en esas secciones y al aumento gradual en el número de canales hacia aguas abajo. Luego, desde la sección 7 a la sección 1 (322 a 88 m de distancia al muro) disminuye la densidad de canales en ambos casos, debido al ensanchamiento gradual del delta y la estabilización del número de canales en las cercanías al embalse. En general, se observa una mayor dispersión en la densidad de canales obtenidas de las imágenes satelitales del prototipo, observando desviaciones estándar entre las secciones 14 y 11 (595 a 478 m

de distancia al muro) que van de 0.008 a 0.014 m/m. Es posible apreciar que los valores de densidad de canales obtenidos en los deltas modelados están, en la mayoría de las secciones transversales, dentro de la dispersión de los valores de densidades de canales obtenida de las imágenes satelitales, observando las mayores diferencias en las densidades de canales medias entre las secciones 11 y 9, al comparar los resultados obtenidos en el modelo físico con los observados en las imágenes satelitales del prototipo.

4.5. Análisis de incertidumbre

En la **Tabla 4.6** se muestran los errores relativos para cada índice morfométrico medido en los 8 ensayos realizados. Se puede apreciar que los errores relativos asociados a la profundidad de los canales y a la razón ancho profundidad varían entre 31.9 a 83.9% y 32.4 a 84.3%, respectivamente. Por otro lado, la pendiente longitudinal presentó errores relativos entre 28.4 y 33.6%. Los errores relativos anteriores se debieron principalmente a las precisiones altimétricas obtenidas en los MDEs construidos (± 0.13 a 0.17 m).

Por otro lado, es posible observar que el error relativo asociado al número de canales, la densidad de canales y el ancho de canales varían entre 5.9 a 20.0%, 5.9 a 20.0% y 5.7 a 20.5%, respectivamente. El error relativo en el número y la densidad de canales presentaron magnitudes mayores en las secciones más alejadas de la presa, debido al menor número de canales observados en esa zona. Los errores relativos anteriores están asociados a las presiones planimétricas obtenidas durante la construcción de los MDEs (± 1.03 a 1.10 m), las cuales, a pesar de ser mayores a las precisiones altimétricas logradas, fueron menos importantes al momento de considerarlas en los valores de número, densidad y ancho de canales obtenidos en cada ensayo.

Tabla 4.6 Errores relativos de los índices morfométricos para cada ensayo.

Ensayo / Errores relativos	Número de canales (%)		Densidad de canales (%)		Ancho de los canales (%)		Profundidad de los canales (%)		Razón ancho- profundidad (%)		Pendiente longitudinal (%)
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	
Ensayo 1	6.3	20.0	6.3	20.0	6.7	13.3	41.7	69.5	42.3	70.7	31.2
Ensayo 2	5.9	20.0	5.9	20.0	5.7	13.2	31.9	77.1	32.4	77.5	32.7
Ensayo 3	5.9	16.7	5.9	16.7	6.1	16.9	34.7	77.8	35.4	79.6	28.7
Ensayo 4	7.1	16.7	7.2	16.7	6.0	14.6	54.7	83.9	55.3	84.3	33.6
Ensayo 5	6.3	16.7	6.3	16.7	7.2	15.8	49.4	65.3	50.5	65.8	28.4
Ensayo 6	7.7	20.0	7.7	20.0	7.9	15.4	45.2	65.1	45.9	65.8	28.9
Ensayo 7	6.3	16.7	6.3	16.7	8.1	20.5	49.7	66.8	50.7	68.0	30.0
Ensayo 8	6.7	16.7	6.7	16.7	6.8	14.4	40.5	71.5	41.1	72.5	29.5

4.6. Discusión de resultados

Los resultados de la prueba Kruskal-Wallis no permite rechazar la hipótesis nula, la cual afirma que las distribuciones de los grupos de valores de estos índices morfométricos obtenidos en 14 secciones transversales son iguales entre ellos. Ciertamente, afirmar esta igualdad en la distribución de los índices morfométricos obtenidos en los deltas modelados no es posible, debido a la dispersión observada en el ancho, la profundidad y la razón ancho-profundidad de los canales en las **Figura 4.4, Figura 4.5 y Figura 4.6**. Aun así, la prueba estadística permitió rechazar la hipótesis alternativa, descartando con ello que al menos dos distribuciones de los grupos de índices comparados fueran significativamente diferentes entre ellos. Esto muestra que, si bien las distribuciones de los índices comparados entre los 8 deltas formados bajo las mismas condiciones experimentales no son iguales, no muestran diferencias significativas entre ellas, permitiendo encontrar similitudes en la morfología de los deltas modelados físicamente, a pesar de la propia variabilidad morfológica del proceso.

Los resultados obtenidos de la comparación entre los deltas modelados físicamente con las imágenes satelitales del prototipo entre los años 2013 y 2016, mediante los índices morfométricos obtenidos, muestran una clara similitud en el número y la densidad de canales, tanto en su tendencia a lo largo del delta, como también en los valores obtenidos en cada una de las secciones transversales analizadas. Esta similitud fue más fuerte en las secciones más cercanas al muro, pero presentando mayores diferencias en las secciones más alejadas del muro, en especial, en el número de canales, siendo estos levemente sobreestimados por el modelo físico. Por otro lado, el ancho de los canales no presentó valores similares entre modelo y prototipo, observando en los deltas modelados canales más anchos en la mayoría de las secciones transversales analizadas. Como se mencionó en el **Capítulo 3.3.1**, el modelo físico de la bocatoma Tinguiririca fue diseñado conservando el número de Froude y el parámetro de Shields entre el prototipo y el modelo físico, a su vez que se relajó la similitud de Reynolds del flujo y la pared. Por lo tanto, los resultados muestran que es posible modelar un delta de sedimento siguiendo los criterios de escalamiento mencionados anteriormente, obteniendo similitud en el número y la densidad de canales, pero presentando efectos de escala sobre el ancho de los canales.

La utilización de un dron para capturar la superficie del modelo fue una ventaja al momento de medir un modelo físico construido en un área considerable ($215 m^2$), permitiendo tomar fotografías de forma rápida y ordenada, evitando con ello los efectos que puede provocar el cambio de color del sedimento del lecho, al secarse gradualmente. También permitió alcanzar un traslape entre fotografías cercano al 80%, porcentaje que no fue constante a lo largo del delta producto de la velocidad variable del dron, pero que no generó grandes variaciones en las precisiones de los MDEs construidos, como se observa en la **Tabla 4.1**. Además, los puntos de control fueron medidos mediante una estación total, obteniendo buenas precisiones planimétricas y altimétricas. Aun así, a pesar de tomar las precauciones mencionadas anteriormente, al momento de realizar la fotogrametría y construcción de los MDEs de los deltas formados durante los ensayos, los errores encontrados en los índices morfométricos que dependen de las precisiones altimétricas fueron significativos, presentando mayor importancia en la profundidad y razón ancho-profundidad de los canales, con errores relativos de hasta un 83.9 y 84.3%, respectivamente. Por otro lado, errores relativos en los índices restantes fueron significativos pero menores a los observados en la profundidad y la razón ancho-profundidad de los

canales, solo resaltando la pendiente longitudinal del delta con errores relativos de hasta un 33.6%. Estos errores se atribuyen a las precisiones altimétricas obtenidas en los MDEs de los deltas de sedimentos formados sobre el modelo físico, los cuales, a pesar de ser bastante buenos, son importantes al momento de considerarlos en los índices morfométricos obtenidos.

4.7. Conclusiones

En este capítulo los modelos digitales de elevación y los índices morfométricos obtenidos para cada delta de sedimento formado en el modelo físico son presentados.

La comparación estadística realizada con la prueba no paramétrica Kruskal-Wallis muestra que la distribución de los valores de ancho, profundidad y razón ancho-profundidad de canales no presentan diferencias significativas entre ellos, indicando que es posible repetir la morfología de un delta de sedimentos formados en un modelo físico, al realizar ensayos bajo las mismas condiciones experimentales.

Se comparó el número, la densidad y el ancho de los canales de los deltas modelados con los mismos índices morfométricos obtenidos del delta observado en la realidad. Se observaron valores y tendencias similares en el número y densidad de canales, mientras que el ancho de canales presentó efectos de escala, obteniendo en los deltas modelados ancho de canales mayores a los observados en la realidad.

Finalmente, se obtuvieron los errores relativos de los índices morfométricos medidos en los deltas modelados. Los errores fueron significativos en los índices morfométricos que dependen de la precisión altimétrica en las mediciones, encontrando errores relativos de hasta un 83.9% y 84.3% en la profundidad y razón ancho profundidad de los canales, respectivamente. Por otro lado, los índices que dependen de las precisiones planimétricas presentaron errores significativos pero menores al ser comparados con los índices anteriores, encontrando errores relativos en el número, ancho y densidad de canales de hasta un 20.0, 20.0 y 20.5 %, respectivamente. La pendiente longitudinal también presentó errores significativos, obteniendo errores relativos de hasta un 33.6%.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES

Se diseñó y construyó un modelo físico de la Bocatoma Tinguiririca a escala 1:26 vertical y 1:65 horizontal, respectivamente. Los criterios de escalamiento permitieron conservar los adimensionales de Froude y Shields, además de poder relajar el número de Reynold del flujo y la pared durante el diseño.

La caracterización de los 8 deltas modelados bajo mismas condiciones experimentales y de operación se realizó con los modelos digitales de elevación construidos, mientras que la caracterización del prototipo fue realizada mediante 5 imágenes satelitales capturadas entre los años 2013 y 2016. De la caracterización morfológica de los deltas se obtuvieron 6 índices morfométricos mediante la medición de 14 secciones transversales y un perfil longitudinal. Los índices medidos fueron: el número, la densidad, el ancho, la profundidad y la razón ancho-profundidad de los canales, y la pendiente longitudinal del delta.

Los modelos digitales de elevación obtenidos mostraron precisiones planimétricas y altimétricas promedio de ± 1.07 y ± 0.15 m, respectivamente. Estas precisiones fueron significativas a la hora de ser consideradas en los índices morfométricos obtenidos. La profundidad y la razón ancho-profundidad de los canales presentaron errores relativos de hasta un 83.9 y 84.3 %, respectivamente. Por otro lado, el número, la densidad y el ancho de canales presentaron errores relativos de hasta un 20.0, 20.0 y 20.5 %, respectivamente. Por último, la pendiente longitudinal presentó errores relativos de hasta un 33.6%. Se encontró que los índices que dependen de las precisiones altimétricas fueron los más afectados al momento de ser medidos, mientras que los índices que dependen solamente de las precisiones planimétricas presentaron errores significativos, pero aceptables para este tipo de mediciones. Por lo tanto, se observa que el método ocupado para medir de la morfología de los deltas presenta limitaciones al realizar mediciones detalladas en modelo físicos.

Los resultados muestran que es posible repetir el ancho, profundidad y razón ancho-profundidad de los canales en la morfología de un delta de sedimento formado en un modelo físico a pesar de la variabilidad propia del proceso.

Lo anterior es un resultado relevante en la modelación física de deltas de sedimentos, mostrando que no es necesario realizar múltiples pruebas de un mismo ensayo para verificar que se puede repetir la morfología de los deltas formados en cada ellas.

Se comparo la morfología los deltas modelados con el delta observado en la realidad, encontrando número y densidad de canales similares. Por otro lado, los deltas modelados presentaron ancho de canales mayores a los observados en el delta prototipo, siendo esta diferencia producida por los efectos de escala. Esta similitud en el número y la densidad de canales se consiguió producto de la conservación de los adimensionales de Froude y Shields del prototipo, demostrando la importancia de mantener la identidad de estos parámetros al momento de modelar la morfología de un delta de sedimento en la cola de un embalse mediante un modelo físico.

A partir del trabajo presentado, se propone continuar esta línea de investigación realizando estudios similares con otros modelos físicos a escala, incorporando los índices morfométricos que no pudieron ser comparados en este trabajo. Además, se propone que los métodos de

medición sean mejorados, permitiendo reducir los errores de los índices morfométricos medidos.



REFERENCIAS

- Annandale, G., Randle, T., Langendoen, E. y Hotchkiss, R. (2018). Reservoir Sedimentation Management: A Sustainable Development Challenge. *HydroLink*, 3, 72-75.
- Baynes, E., van de Lageweg, W., McLelland, S., Parsons, D., Aberle, J., Dijkstra, J. ... y Moulin, F. (2018). Beyond equilibrium: Re-evaluating physical modelling of fluvial systems to represent climate changes. *Earth-Science Reviews*, 181, 82-97.
- Buckingham, E. (1914). On physically similar systems; Illustrations of the use of dimensional equations. *Physical Review*, 4(4), 345-376.
- Constantine, M. (2018). Reservoir Sedimentation Modelling and Prediction of Project Lifetime. *Journal of the Nigerian Academy of Engineering*, 1, 28-41.
- Egozi, R. y Ashmore, P. (2009). Experimental analysis of braided channel pattern response to increased discharge. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 114, 1-15.
- El Kadi Abderrezzak, K., Die Moran, A., Mosselman, E., Bouchard, J., Habersack, H. & Aelbrecht, D. (2014). A physical, movable-bed model for non-uniform sediment transport, fluvial erosion and bank failure in rivers. *Journal of Hydro-Environment Research*, 8(2), 95-114.
- Ettema, R., Arndt, R., Roberts, P. y Wahl, T. (2000). *Hydraulic Modeling: Concepts and Practice*. Virginia: American Society of Civil Engineers.
- Ettema, R. y Armstrong, D. (2019). Bedload and channel morphology along a braided, sand-bed channel: insights from a large flume. *Journal of Hydraulic Research*, 57(6), 822-835.
- García, M. (2008). *Sedimentation engineering. Processes, Measurements, Modeling, and Practice*. Virginia: American Society of Civil Engineers.

- Gorrick, S. y Rodríguez, J. (2014). Scaling of sediment dynamics in a laboratory model of a sand-bed stream. *Journal of Hydro-Environment Research*, 8(2), 77-87.
- Heller, V. (2011). Scale effects in physical hydraulic engineering models. *Journal of Hydraulic Research*, 49(3), 293-306.
- Heller, V. (2017). Self-similarity and Reynolds number invariance in Froude modelling. *Journal of Hydraulic Research*, 55(3), 293-309.
- International Commission on Large Dams (2009). *Sedimentation and Sustainable Use of Reservoirs and River Systems*. Paris: Autor
- Javernick, L., Brasington, J. y Caruso, B. (2014). Modeling the topography of shallow braided rivers using Structure-from-Motion photogrammetry. *Geomorphology*, 213, 166-182.
- Kawashima, S., Jondrow, T., Annandale, G. y Shah, F. (2003). *Reservoir conservation: The RESCON approach, Vol. II*. Washington: The International Bank for Reconstruction and Development.
- Kostic, S. y Parker, G. (2003). Progradational sand-mud deltas in lakes and reservoirs. Part 1. Theory and numerical modeling. *Journal of Hydraulic Research*, 41(2), 127-140.
- Leduc, P., Peirce, S. y Ashmore, P. (2019). Short communication: Challenges and applications of structure-from-motion photogrammetry in a physical model of a braided river. *Earth Surface Dynamics*, 7, 97-106.
- Link, O., Henríquez, S. y Ettmer, B. (2018). Physical scale modelling of scour around bridge piers. *Journal of Hydraulic Research*, 57(2), 227-237.
- Link, O., Meier, C. y Ettmer, B. (2013). Gestión de la sedimentación en el embalse las juntas. Trabajo presentado en XXI Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica, Concepción.
- Morris, G. y Fan, J. (1998). *Reservoir sedimentation handbook*. New York: Mc Graw Hill.

- Olariu, C. y Bhattacharya, J. (2006). Terminal Distributary Channels and Delta Front Architecture of River-Dominated Delta Systems. *Journal of Sedimentary Research*, 76, 212-233.
- Schleiss, A. J., Franca, M. J., Juez, C. y De Cesare, G. (2016). Reservoir sedimentation. *Journal of Hydraulic Research*, 54(6), 595-614.
- Shaw, J., Mohrig, D. y Whitman, S. (2013). The morphology and evolution of channels on the Wax Lake Delta, Louisiana, USA. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 118(3), 1562-1584.
- Sindelar, C., Gold, T., Reiterer, K., Schobesberger, J., Lichtneger, P. ... y Habersack, H. (2019). Delta formation in reservoir of run-of-river hydropower plants in gravel bed rivers – experimental studies with nonuniform sediments. Trabajo presentado en 38th IAHR World Congress, Panama.
- Vesipa, R., Camporeale, C. y Ridolfi, L. (2018). Hydraulics of braided river dynamics. Insights from flume experiments. *E3S Web of Conferences*, 40, 1-8.
- Yalin, M. (1965). *Similarity in Sediment Transport by Currents*. London: Hydraulic Research Station.