



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL

**MODELACIÓN NUMÉRICA PARA EL ESTUDIO DE LA ESTRUCTURA  
INTERNA DE CORRIENTES DE TURBIDEZ AUTO-ACELERANTES**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL

**SOFÍA BELÉN HUICHULEF PADILLA**

PROFESOR GUÍA:  
YARKO NIÑO CAMPOS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
JAVIER GONZÁLEZ SANDOVAL  
ALDO TAMBURRINO TAVANTZIS

SANTIAGO DE CHILE  
2021

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL  
POR: **SOFÍA BELÉN HUICHULEF PADILLA**  
FECHA: 2021  
PROF. GUÍA: YARKO NIÑO CAMPOS

## **MODELACIÓN NUMÉRICA PARA EL ESTUDIO DE LA ESTRUCTURA INTERNA DE CORRIENTES DE TURBIDEZ AUTO-ACELERANTES**

El presente trabajo de título consiste en la modelación numérica de una corriente de turbidez auto-acelerante basada en el estudio experimental de Sequeiros et al. (2018). El software utilizado para la modelación es COMSOL Multiphysics. La hipótesis planteada corresponde a que el software es capaz de modelar numéricamente la corriente de turbidez auto-acelerante reproducida experimentalmente por Sequeiros et al. (2018). Se realiza una amplia revisión bibliográfica sobre las corrientes de turbidez auto-acelerantes y cómo estas influyen en la hidrodinámica de los embalses. También se describen experimentos enfocados en reproducir el fenómeno y algunos de los modelos numéricos desarrollados hasta el momento. Se explican en detalle las características del modelo matemático-numérico COMSOL Multiphysics utilizado para la modelación, junto con las ecuaciones que ocupa. Luego se especifica la metodología para la construcción del modelo y las decisiones que se toman para determinar la cantidad de simulaciones necesarias para lograr el mejor ajuste a los resultados experimentales. Se comparan los resultados obtenidos de perfiles de velocidad y perfiles de concentración en 4 secciones transversales del canal utilizado por Sequeiros et al. (2018). Además, se presentan gráficos de la velocidad media reproducida por el modelo a lo largo del canal en instantes determinados y el cálculo de las tasas de variación del caudal unitario del flujo de sedimentos asociado al modelo que presenta el mejor ajuste con los resultados experimentales. Finalmente, se discuten las similitudes del experimento con respecto al modelo, se analizan los gastos sólidos en suspensión, los flujos de incorporación de sedimento suspendido y se comparan con los datos experimentales de corrientes de densidad reunidos por García & Parker. Se discute la posibilidad de determinar el rango de pendientes en las que se puede producir una corriente de turbidez auto-acelerante. La hipótesis inicial se verifica y los objetivos del trabajo se cumplen. Los resultados tienen incertidumbre debido a que para validar los resultados del modelo se trabaja con resultados experimentales que inevitablemente incluyen errores asociados a la mediciones y a la experiencia de laboratorio. Además, los aspectos de las simulaciones desarrolladas en este trabajo pueden ser mejorados, por ejemplo, mejorando la representación de las condiciones de borde, entendiendo como se simula el punto de inmersión, mejorando la representación de la muestra de sedimentos en el modelo para modificar los perfiles de concentración, o bien, calculando de otra forma las velocidades friccionales del modelo.

*Dedicado a toda persona que tuvo un impacto  
en mi aprendizaje hasta el día de hoy.*

***Gracias***

# Agradecimientos

Si en mi primer año de universidad me hubieran pedido describir cómo sería mi experiencia universitaria de principio a fin, creo que no habría sido capaz de adivinar nada, ni siquiera la cantidad de relaciones que fui capaz de formar y mejorar con el tiempo. Mi yo mechona estaría impactada por la experiencia que he tenido, mientras que mi yo egresada se siente extremadamente agradecida por todo lo vivido.

Nunca imaginé que mis primeros amigos en inducción y en la sección, seguirían siendo mis amigos al final de mis estudios, con ellos disfruté la mayoría de los viernes en la u y casi todos mis almuerzos en los pastitos de principio a fin. Gracias a ellos, plan común fue más cómico que trágico. Mis días de estudio los primeros años, mis peores días y una cantidad inmensa de experiencias increíbles, las viví al lado de ellos y no sé que habría sido de mí sin ustedes. No sé si puedo pagarles por todo con un millón de gracias y amor para todos.

Una persona, que jamás habría planeado conocer, porque nunca pensé que podría merecerlo, pero estoy infinitamente agradecida de haberlo hecho es mi pareja actual. Seba, tú fuiste un pilar para mí en todo momento, ya sabes todo lo que te agradezco, pero quería plasmarlo en este logro para dejar huella. Nunca planeo compartir mi vida como lo hago contigo, y me siento tan afortunada de haber tenido tu apoyo durante todos estos años.

Por supuesto, no puedo olvidar a mis amigos y amigas de civil. Ustedes me mostraron una amistad tan sencilla y tan valiosa, que no hay forma de describir lo agradecida que me siento de haberlos conocido y haber terminado mi último año copucheando con ustedes. Me faltaron más carretes, más papitas, más bienvenidas hidráulicas, más abrazos y risas en el tercer piso con ustedes. Voy a hincharlos para ponernos al día cuando esta pandemia termine. Quiero que sepan que son personas maravillosas y los aprecio demasiado por cómo han sido conmigo, por cómo me han aceptado e incluido.

Finalmente, este trabajo no habría sido posible sin el apoyo constante de mi profesor guía Yarko Niño y de la ayuda de mis profesores de comisión Aldo Tamburrino y Javier González, así que se los agradezco mucho. Pero si soy sincera, tampoco lo habría terminado de no ser por el apoyo incondicional de mi familia. A ellos les debo todo lo que soy hoy en día, les debo mi vida. Mamá, tú me enseñaste de la tolerancia a la frustración. Papá, tú me enseñaste que la perfección puede ser un arma de doble filo. Vicky, tú me enseñaste que las prioridades en la vida definitivamente no son los estudios. Y ustedes tres, me enseñaron que el amor te puede sacar hasta del hoyo más profundo. No sé si algún día mis agradecimientos le harán justicia a todo lo que ustedes han hecho por mí. Los amo.

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	1
1.2. Contenidos del informe . . . . .	3
<b>2. Revisión Bibliográfica</b>	<b>4</b>
2.1. Corrientes de turbidez y su caracter auto-acelerante . . . . .	4
2.2. Corrientes de turbidez en embalses . . . . .	6
2.3. Experimentos que permiten entender el fenómeno . . . . .	8
2.4. Modelos Numéricos desarrollados . . . . .	10
2.5. Conclusiones de la revisión . . . . .	12
2.6. Objetivos . . . . .	13
2.6.1. Objetivo General . . . . .	13
2.6.2. Objetivos Específicos . . . . .	13
<b>3. Software de modelación</b>	<b>14</b>
3.1. Descripción de COMSOL Multiphysics . . . . .	14
3.2. Modelo Numérico . . . . .	14
3.2.1. Mixture Model, Turbulent Flow ( $k - \varepsilon$ ) . . . . .	14
3.3. Ecuaciones del modelo . . . . .	15
3.3.1. Densidad de la mezcla . . . . .	16
3.3.2. Flujo volumétrico de las fases . . . . .	16
3.3.3. Velocidad de la mezcla . . . . .	16
3.3.4. Ecuación de continuidad para la mezcla . . . . .	16
3.3.5. Ecuación de momentum para la mezcla . . . . .	17
3.3.6. Ecuación de transporte para la fracción volumétrica de la fase dispersa . . . . .	18
3.3.7. Sobre la transferencia de masa en la interfaz . . . . .	19
3.3.8. Incorporación de la velocidad de sustentación al modelo de turbulencia . . . . .	19
<b>4. Metodología de trabajo</b>	<b>20</b>
4.1. Familiarización con el software . . . . .	20
4.2. Construcción del modelo . . . . .	21
4.2.1. Definición de geometría . . . . .	22
4.2.2. Definición de materiales . . . . .	22
4.2.3. Definición de condiciones de borde . . . . .	23
4.2.3.1. Entrada . . . . .	23
4.2.3.2. Fondo . . . . .	24
4.2.3.3. Paredes verticales . . . . .	24
4.2.3.4. Superficie libre . . . . .	24

4.2.3.5. Salida . . . . .	24
4.2.4. Definición de condiciones iniciales . . . . .	24
4.3. Modelaciones realizadas . . . . .	25
4.4. Obtención de resultados . . . . .	26
4.5. Análisis de resultados . . . . .	29
<b>5. Resultados</b>	<b>32</b>
5.1. Modelaciones . . . . .	32
5.1.1. Sin condición de borde de arrastre impuesta en el Fondo . . . . .	32
5.1.2. Con condición de borde de arrastre impuesta en el Fondo . . . . .	37
5.2. Mejor modelación . . . . .	42
5.3. Tasa de variación del caudal unitario . . . . .	49
<b>6. Discusión</b>	<b>50</b>
6.1. Comparación Experimento - Modelaciones . . . . .	50
6.2. Conclusiones . . . . .	57
<b>Bibliografía</b>	<b>58</b>

# Índice de Tablas

3.1.	Variables dependientes con las que trabaja el modelo numérico utilizado en COMSOL Multiphysics. . . . .	15
4.1.	Características generales del modelo construido. . . . .	21
4.2.	Características del sedimento utilizado en el experimento de Sequeiros et al. (2018). . . . .	22
4.3.	Características de la sexta prueba experimental realizada por Sequeiros et al. (2018). . . . .	23
4.4.	Condiciones iniciales para el modelo numérico. . . . .	24
4.5.	Parámetros para las modelaciones realizadas sin la condición de arrastre en el Fondo. . . . .	26
4.6.	Parámetros para las modelaciones realizadas con la condición de arrastre en el Fondo. . . . .	26
5.1.	RMSE calculado para los perfiles de velocidad y de concentración en las secciones $x = 10,2$ (m) y $x = 11,5$ (m). . . . .	42
5.2.	RMSE calculado para los perfiles de velocidad y de concentración en las secciones $x = 10,2$ (m) y $x = 11,5$ (m) cuando las modelaciones cambian el valor de la concentración de sedimentos de fondo ( $\phi_{d,f,i}$ ). . . . .	47
5.3.	Parámetros de la modelación 11, que presenta el mejor ajuste a los resultados de Sequeiros et al. (2018). . . . .	47
5.4.	Aceleraciones reportadas para la sexta prueba experimental por Sequeiros et al. (2018). Valores en verde destacan las tasas de variación del caudal unitario positivas. . . . .	49
5.5.	Aceleraciones calculadas a lo largo del canal para la modelación del mejor ajuste. . . . .	49
6.1.	Comparación de los valores de velocidad friccional utilizadas para el modelo y el experimento con los valores predichos según el método de Van Rijn. . . . .	56
6.2.	Aceleraciones calculadas a lo largo del canal para la modelación del mejor ajuste de la Tabla 5.3, pero ahora cambiando la pendiente del canal. . . . .	56

# Índice de Ilustraciones

2.1.	Esquema de la instalación experimental utilizada por Sequeiros et al. (2018). (Adaptado de Sequeiros et al., 2018). . . . .	5
2.2.	Volumen de control I para el fenómeno de inmersión. (Adaptado de Niño, 2019a).	7
2.3.	Volumen de control II para el fenómeno de inmersión. (Adaptado de Niño, 2019a).	8
2.4.	Ejemplo del punto de inmersión reproducido en los experimentos de Sequeiros et al., 2018. (Adaptado de Sequeiros et al. (2018)). . . . .	10
4.1.	Esquematación de los pasos a seguir para crear un modelo en COMSOL Multiphysics. . . . .	20
4.2.	Geometría construida en COMSOL Multiphysics. . . . .	22
4.3.	Esquematación de las condiciones de borde que se deben definir en el modelo.	23
4.4.	Árbol de decisión establecido para realizar las distintas modelaciones. . . . .	25
4.5.	Resultados extraídos del estudio de Sequeiros et al. (2018). . . . .	27
4.6.	Conjuntos de posiciones en el canal a partir de las cuales se obtienen resultados para cada modelo considerando o no el punto de inmersión reportado en el experimento. . . . .	27
5.1.	Velocidades medias a lo largo del canal para las primeras nueve modelaciones sin condición de borde de arrastre impuesta en el Fondo. . . . .	32
5.2.	Perfiles de velocidad para las modelaciones sin condición de borde de arrastre impuesta en el Fondo comparados con los resultados de Sequeiros et al. (2018).	33
5.3.	Perfiles de velocidad adimensional para las modelaciones sin condición de borde de arrastre impuesta en el Fondo comparados con los resultados de Sequeiros et al. (2018). . . . .	34
5.4.	Perfiles de concentración para las modelaciones sin condición de borde de arrastre impuesta en el Fondo comparados con los resultados de Sequeiros et al. (2018).	35
5.5.	Perfiles de concentración adimensionales para las modelaciones sin condición de borde de arrastre impuesta en el Fondo comparados con los resultados de Sequeiros et al. (2018). . . . .	36
5.6.	Velocidades medias a lo largo del canal desde la décima modelación en adelante con condición de borde de arrastre impuesta en el Fondo. . . . .	37
5.7.	Perfiles de velocidad para las modelaciones con condición de borde de arrastre impuesta en el Fondo comparados con los resultados de Sequeiros et al. (2018).	38
5.8.	Perfiles de velocidad adimensional para las modelaciones con condición de borde de arrastre impuesta en el Fondo comparados con los resultados de Sequeiros et al. (2018). . . . .	39
5.9.	Perfiles de concentración para las modelaciones con condición de borde de arrastre impuesta en el Fondo comparados con los resultados de Sequeiros et al. (2018).	40



5.10.	Perfiles de concentración adimensionales para las modelaciones con condición de borde de arrastre impuesta en el Fondo comparados con los resultados de Sequeiros et al. (2018). . . . .	41
5.11.	Velocidades medias a lo largo del canal para las modelaciones variando la concentración de sedimentos de fondo basadas en la modelación 10. . . . .	43
5.12.	Perfiles de velocidad para las modelaciones con distintos valores de concentración de sedimentos de fondo. . . . .	44
5.13.	Perfiles de velocidad adimensionales para las modelaciones con distintos valores de concentración de sedimentos de fondo. . . . .	45
5.14.	Perfiles de concentración para las modelaciones con distintos valores de concentración de sedimentos de fondo. . . . .	46
5.15.	Ocho capturas consecutivas de la animación del campo de velocidades dentro del canal generada por la mejor modelación obtenida. . . . .	48
6.1.	Gráficos de velocidad media en los que se destaca: en rojo un inusual aumento de velocidades al inicio del canal, en negro máximos de velocidad locales y en amarillo un aumento drástico en las velocidades al final del canal. . . . .	50
6.2.	Concentración de sedimentos en suspensión sobre la concentración de referencia como función de $z/H$ con el modelo de Rouse para los datos reportados en cada sección del canal de Sequeiros et al. (2018). . . . .	53
6.3.	Concentración de sedimentos en suspensión sobre la concentración de referencia como función de $z/H$ con el modelo de Rouse para los datos reportados en la última sección del canal de Sequeiros et al. (2018) y los resultados de las últimas secciones en el modelo. . . . .	53
6.4.	El flujo de incorporación partido por la velocidad de sedimentación ( $C_{ref}$ ) como función del adimensional $Z_{uk}$ . La línea azul indica el comportamiento normal de las corrientes de sedimentos según el modelo de García & Parker. Los puntos desde la sección 1 a la 4 corresponden al experimento de Sequeiros et al. (2018), y el punto morado corresponde a la modelación 11. . . . .	54
6.5.	El flujo de incorporación ( $E_s$ ) como función de la relación adimensional de la velocidad friccional partida por la velocidad de sedimentación ( $u'_*/w_s$ ). Los puntos azules son las mediciones de varias corrientes de densidad reunidas por García & Parker (1991). Los puntos color gris y naranja son los determinados por el modelo y el experimento de Sequeiros et al. (2018), respectivamente. . . . .	55

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Motivación

Una corriente de densidad puede describirse como un flujo gravitacional constituido por un líquido o un gas que se desarrolla a través, por debajo o por encima de un fluido de densidad aproximadamente igual. Ejemplos de esto en la atmósfera pueden ser los flujos de material particulado que se producen luego de una erupción volcánica, las tormentas de arena o los frentes fríos generados por los cambios de temperatura en el ambiente. En cambio, en ambientes acuosos estas corrientes, aunque no son observadas por el común de la gente, pueden darse cuando un río de agua dulce desemboca en el mar o cuando un río cargado de sedimentos converge con un embalse de agua clara o un lago (Bell, 1942).

Estudiar estas corrientes es importante debido a que juegan un rol significativo en el masivo transporte de sedimentos que ocurre en la naturaleza. Participan activamente en el ciclo del carbón, abastecen de nutrientes al ecosistema y sus depósitos constituyen el mayor reservorio de petróleo a nivel mundial; así como contienen una importante cantidad de información del pasado geológico de la Tierra (Azpiroz-Zabala et al., 2017). Es más, si el enfoque se reduce a tamaño de granos transportados, puede sorprender que los sedimentos depositados por las corrientes de densidad eólicas alcanzan tamaños mucho más gruesos que los transportados por corrientes de densidad acuosas de características similares. Por ejemplo, las tormentas de polvo o las erupciones volcánicas pueden generar una capacidad de suspensión lo suficientemente grande como para arrastrar y transportar sedimentos relativamente gruesos por largas distancias (Bell, 1942).

Las corrientes de turbidez de flujo turbulento pertenecen a una larga familia de corrientes de densidad y su particularidad es que el peso de los sedimentos suspendidos controla el flujo del fluido que los rodea. En ambientes acuosos estas corrientes representan uno de los principales mecanismos de transporte de sedimentos desde aguas superficiales a ambientes submarinos, lo cual resulta en el desarrollo incremental de depósitos sedimentarios llamados turbiditas (Sequeiros et al., 2018).

En la práctica este tipo de corrientes son difíciles de monitorear, pues su ocurrencia suele ser impredecible sobre todo si suceden en un ambiente submarino. Por esto, la mejor forma que se ha encontrado para estudiar este fenómeno es a través de estudios experimentales a escala de laboratorio (Azpiroz-Zabala et al., 2017).

Cuando un río fluye normalmente por un cauce se puede considerar que está inmerso en una atmósfera de aire. Entonces se entiende que el río es impulsado por una fuerza igual al peso del aire que desplaza. Pero cuando un río entra en un embalse, por ejemplo, la física cambia. En vez de solo aire, el flujo ahora también desplaza agua y consecuentemente es impulsado por una fuerza igual al peso del aire más el del agua. Para entender mejor este caso se supone, por simplificación, que el flujo al entrar en el embalse disipa rápidamente su energía cinética y que, salvo por su carga de sedimentos suspendidos, el agua del río es físicamente igual a la del embalse. En consecuencia la fuerza motriz disponible asociada al agua del río, menos sus sedimentos, es nula. Debido a esto el peso de la carga de sedimentos, que es mayor al del agua que se está desplazando, se encuentra disponible como única fuerza motriz para la generación de una corrientes de turbidez (Bell, 1942).

Aunque las fuerzas motrices que predominan en las corrientes de densidad parezcan insignificantes respecto a las que predominan en los flujos normales de los ríos son suficientes para permitir el transporte de los sedimentos más finos a través de largas distancias. En el caso de los embalses los sedimentos se detienen en estos lugares, pero no lo hacen por falta de energía sino porque no tienen otro lugar al que dirigirse (Bell, 1942).

Se ha demostrado que las corrientes de turbidez en ambientes submarinos pueden alcanzar velocidades de 20 m/s, recorrer cientos de kilómetros, generando flujos que pueden incitar y erosionar los márgenes continentales y causar daños a las estructuras artificiales como los cables de telecomunicaciones en el lecho marino (Hsu et al., 2008). La razón por la cual se generan estas velocidades tan altas es porque las corrientes de turbidez pueden adquirir un carácter auto-acelerante. Esto lo consiguen a medida que la velocidad y concentración de sólidos suspendidos del flujo aumentan en conjunto, debido a un arrastre simultáneo de sedimentos del lecho (Pantin, 1979).

De acuerdo con Middleton (1966) el concepto de corrientes de turbidez tuvo grandes avances gracias a los trabajos realizados por Kuenen a partir de 1950 y desde entonces sus propiedades han sido difíciles de medir con precisión. Con el correr del tiempo y el avance tecnológico las mediciones de laboratorio han mejorado y gracias a ello Sequeiros et al. (2018) lograron reproducir experimentalmente corrientes turbulentas auto-acelerantes midiendo varios parámetros de la estructura interna del flujo. Esto ha permitido el desarrollo de modelos más complejos del fenómeno y, en particular, se ha transformado en la motivación de este trabajo de título para desarrollar un modelo numérico que pueda contribuir al estudio de estas corrientes.

## 1.2. Contenidos del informe

El presente trabajo de título se compone de seis capítulos:

1. **Introducción:** Se describe el fenómeno de corrientes de densidad dentro de las cuales se destaca a las corrientes de turbidez y se especifica su importancia en la naturaleza. Además se explica cómo estas pueden originarse y causar problemas en los embalses, además de adquirir un carácter auto-acelerante.
2. **Revisión Bibliográfica:** Se recopilan estudios que abordan el fenómeno de corrientes de turbidez y en particular sus características autoacelerantes. Se estudia el fenómeno de corrientes de turbidez en embalses y cómo se produce el punto de inmersión. Se detallan experimentos actualizados que han tratado de entender el fenómeno de corrientes de turbidez y su auto-aceleración. Se investiga sobre modelos numéricos desarrollados para reproducir corrientes de turbidez. Finalmente, se introducen los objetivos de este trabajo.
3. **Software de modelación:** Se explican las características principales del software COM-SOL Multiphysics y se presentan las ecuaciones utilizadas por el modelo numérico utilizado.
4. **Metodología:** Se detalla la forma en que se lleva a cabo la modelación de las condiciones de la sexta prueba experimental de Sequeiros et al. (2018). También se explica cómo se generan y se analizan los resultados de las simulaciones a realizar.
5. **Resultados:** Se presentan y analizan los principales resultados de las modelaciones.
6. **Discusión:** Se presentan las principales conclusiones del análisis de resultados y se discute la calidad de los resultados del modelo en comparación con los resultados de Sequeiros et al. (2018).

# Capítulo 2

## Revisión Bibliográfica

### 2.1. Corrientes de turbidez y su caracter auto-acelerante

Considerando los procesos de erosión, depositación y transporte en un cauce natural se pueden identificar, a grandes rasgos, dos clasificaciones de sedimentos: gruesos y finos. Las partículas gruesas son transportadas por el fondo del cauce, dado que las fuerzas gravitacionales cobran mayor importancia que las fuerzas inerciales del flujo. Para el caso de las partículas más finas el efecto gravitacional es mucho menor y, por lo tanto, la turbulencia desarrollada en el cauce permite su transporte en toda la columna de agua, lo cual se conoce como sedimento suspendido (González, 2006).

El proceso de transporte de sedimentos asociado a las corrientes de turbidez es el más importante de nuestro planeta en términos volumétricos, siendo el principal responsable de la formación de extensos depósitos sedimentarios (Azpiroz-Zabala et al., 2017). Es de esperar que estas corrientes se generen cuando los ríos se enfrentan con grandes cuerpos de agua, ya sea océanos, lagos o embalses y que los sedimentos suspendidos que se transportan controlen el flujo del agua en la que se sumergen (Sequeiros et al., 2018).

Cuando un río desemboca en un cuerpo de agua más grande puede ocurrir un fenómeno superficial que frecuentemente acompaña a las corrientes de turbidez. Este se caracteriza por la acumulación de escombros flotantes inmediatamente aguas abajo del lugar donde el agua cargada con sedimentos se sumerge (Bell, 1942). A esta zona se le conocerá como zona de transición en los párrafos siguientes.

En la zona de transición, el proceso de transporte está dominado por la advección y existe una alta energía cinética turbulenta que es suficiente para mantener el flujo de entrada en una mezcla completa. Sin embargo, cuando el flujo comienza a perder momentum a medida que avanza, la fuerza boyante empieza a dominar el transporte, la cual está asociada a la diferencia de densidad entre el flujo de entrada y el gran cuerpo de agua con el que se enfrenta (Niño & Tamburrino, 2004).

Para que estas corrientes ocurran bajo el agua debe cumplirse que la densidad de los sedimentos finos sea mayor a la del cuerpo de agua en el que entran. Cuando el sedimento transportado por el cauce llega a la zona de transición, éste presiona al cuerpo de agua relativamente en reposo hasta el punto donde las fuerzas gravitacionales superan a las inerciales, lo cual se conoce como fenómeno de inmersión (González, 2006). Luego de este punto el sedimento fino se transporta por debajo de la columna de agua, pudiendo recorrer kilómetros y depositarse a lo largo de su trayecto (Balbontín, 2013).

Con las mediciones a escala real realizadas por Hsu et al. (2008), basadas en los desprendimientos de tierra submarinos y corrientes de turbidez asociados a los terremotos de Pingtung de 2006 en la costa suroeste de Taiwán, se logró estimar que las velocidades adquiridas por estas corrientes pueden variar entre 3,7 y 20,0 m/s. Una conclusión importante del estudio, es que la velocidad de las corrientes de turbidez muestra una correlación positiva con la pendiente batimétrica. De acuerdo con Pantin (1979) la facilidad con que estas corrientes pueden alcanzar dichas velocidades puede ser atribuida a la auto-aceleración producida por el incremento de la concentración de sólidos suspendidos gracias a la incorporación de sedimentos finos provenientes del lecho.

Es particularmente difícil medir y monitorear en terreno corrientes de turbidez auto-acelerantes, además su ocurrencia suele ser impredecible. Sin embargo, esto no le quita importancia a las consecuencias que puede tener el fenómeno en la naturaleza, por lo cual entender su comportamiento se transforma en una necesidad y, actualmente, un buena forma de estudiarlos es a través de representaciones a nivel de laboratorio (Azpiroz-Zabala et al., 2017).

Recientemente, Sequeiros et al. (2018) al realizar una serie de ocho pruebas experimentales en un canal de 15 m de largo y una pendiente del 5 % (Figura 2.1) logró reproducir en la sexta y séptima prueba corrientes de turbidez auto-acelerantes. Al finalizar la serie de pruebas la acumulación de sedimentos generada por todas las corrientes inducidas permitió el incremento de la pendiente del lecho en un 0,27 %, sin embargo este aumento se consideró tan pequeño que no fue posible relacionarlo con las aceleraciones registradas en las pruebas. El estudio pone en discusión otros factores relevantes para la generación de corrientes de turbidez auto-acelerantes como son la presencia de un régimen de escurrimiento supercrítico, las condiciones de inmersión, la concentración de sedimentos de entrada y la concentración de finos del lecho aguas abajo del punto de inmersión.

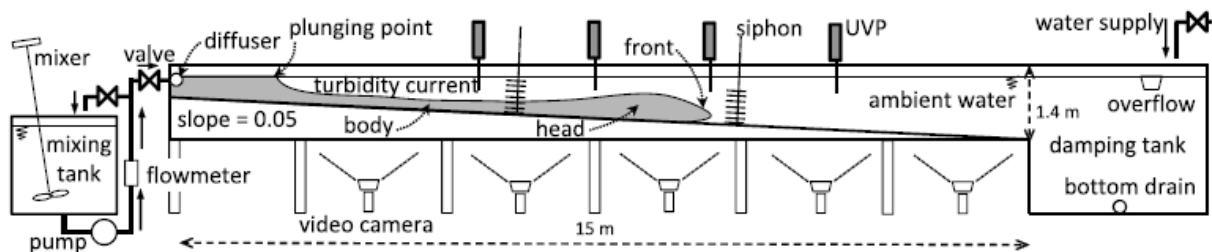


Figura 2.1: Esquema de la instalación experimental utilizada por Sequeiros et al. (2018). (Adaptado de Sequeiros et al., 2018).

## 2.2. Corrientes de turbidez en embalses

Un problema aplicado de las corrientes de turbidez, y en particular auto-acelerantes, corresponde al proceso de transporte de sólidos y sedimentación que ocurre en embalses. De acuerdo a De Cesare et al. (2001), se ha encontrado que concentraciones pequeñas de sedimento fino, del orden de 1 g/L, son suficientes para generar corrientes de turbidez. Por lo cual, entender el comportamiento de este fenómeno es fundamental para comprender los procesos hidrodinámicos en embalses. El transporte de sedimentos suspendidos constituye el principal aporte en el proceso de sedimentación que experimentan estas estructuras y su consecuencia directa es la pérdida de capacidad de almacenamiento. La comprensión de estos procesos permite planificar, evaluar y ejecutar medidas de control con anticipación a las posibles consecuencias (González, 2006).

Una técnica desarrollada para evitar la acumulación excesiva de sedimentos en embalses es la purga, esta consiste en abrir salidas de fondo o de bajo nivel tan pronto como la corriente llega a la presa para pasarla río abajo. Idealmente, el objetivo es ventilar todos los sedimentos contenidos en la corriente de turbidez en caso de ser posible y factible. Este método ayuda a preservar una cierta continuidad del transporte de sedimentos en los ríos obstruidos por las presas. Sin embargo, varios problemas prácticos y teóricos dificultan esta técnica, lo que hace que su uso sea menos común y sus aspectos relativamente desconocidos (Chamoun et al., 2016).

La purga ha sido considerado uno de los medios más económicos y eficaces para disminuir la sedimentación de los embalses. Es importante estudiar las características del movimiento de las corrientes de densidad en los embalses para poder predecir, tanto en la etapa de diseño del proyecto como durante el funcionamiento del embalse, la intensidad de las corrientes de densidad y si podrían o no llegar a la presa (Jiahua, 1986).

El cauce al confluir con un cuerpo de agua más grande comienza a perder capacidad de arrastre dado que las velocidades de escurrimiento disminuyen y por lo tanto también los esfuerzos de corte. El río, que transporta sedimentos gruesos y finos comienza un proceso de depositación. Las partículas más gruesas se depositan antes que los sedimentos finos, formando lo que se conoce como un delta, el cual tiene forma de abanico. Aguas abajo de este delta, dada la acumulación abrupta de sedimentos gruesos, se genera una pendiente fuerte sobre la cual se siguen transportando con menos energía los sedimentos finos. Si la concentración de estos sedimentos es suficientemente alta, es probable que se genere el fenómeno de inmersión y por ende corrientes de turbidez que terminen depositándose en las cercanías del muro del embalse (González, 2006).

En un estudio realizado por Ghomeshi et al. (2013) se logran medir eventos de corrientes de turbidez en el embalse Dez localizado en Irán. En estos se detectó que cuando el caudal afluente al embalse superaba los 1.380 m<sup>3</sup>/s se generaban concentraciones de sedimentos por sobre los 4 g/L y las corrientes de turbidez adquirirían un carácter auto-acelerante que les permitía llegar fácilmente hasta el muro del embalse. Cuando estas corrientes traspasan la zona de generación del delta suelen erosionar el lecho de sedimentos aumentando la concentración de sólidos suspendidos transportados y en consecuencia las alturas de los depósitos de sedimentos cerca del muro aumentan drásticamente.

El fenómeno de inmersión siempre ha sido estudiado en conjunto con el estudio de las corrientes de turbidez. Varios investigadores han presentado relaciones para la profundidad del agua en el punto de inmersión (e.g., Singh y Shah 1971; Jain 1981; Akiyama y Stefan 1984; Farrell y Stefan 1986). Sin embargo, el enfoque más clásico para modelar el proceso es el propuesto por Akiyama y Stefan (1984) (Niño, 2019a). Para intentar describir el comportamiento de las corrientes de turbidez, Parker et al. (1986) utiliza las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en la vertical. Inicialmente el modelo constaba de 3 ecuaciones para el balance de masa del fluido, de masa de sedimentos y de momentum, pero esto no permitía reproducir coherentemente el fenómeno de auto-aceleración. El modelo mejora considerablemente con la incorporación de una cuarta ecuación basada en el balance de la energía turbulenta media, lo cual logra vincular el arrastre de sedimentos del lecho con la energía turbulenta del ambiente. La descripción que logra del intercambio de sedimentos con el lecho permite la posibilidad de modelar una corriente de turbidez auto-acelerante. A pesar de esto, años más tarde, se pudo apreciar que el modelo carecía de términos para representar el fenómeno en su totalidad (González et al. 2008).

Toniolo (2003) hace una corrección al enfoque de Akiyama y Stefan (1984) planteando una aproximación unidimensional que permite modelar corrientes de turbidez con cambios de régimen en un embalse, en la cual los principios de conservación de volumen, masa y momentum son aplicados a los volúmenes de control presentados en las Figuras 2.2 y 2.3<sup>1</sup>. De acuerdo a esto Toniolo discute que la estructura básica del análisis de Akiyama y Stefan (1984), en cuanto a la conservación del volumen, la masa y el momento en el Volumen de control I y la conservación del momento en el Volumen de control II es suficiente para especificar no sólo la relación entre el espesor del subflujo,  $h_d$ , justo después de la inmersión y la profundidad del flujo,  $h_p$ , justo antes de la inmersión, sino también los parámetros densimétricos de Froude,  $Fr_{dp}$  y  $Fr_{dd}$ , justo antes y después de la inmersión, todo ello como funciones de un único parámetro adimensional y que caracteriza la mezcla en el punto de inmersión.

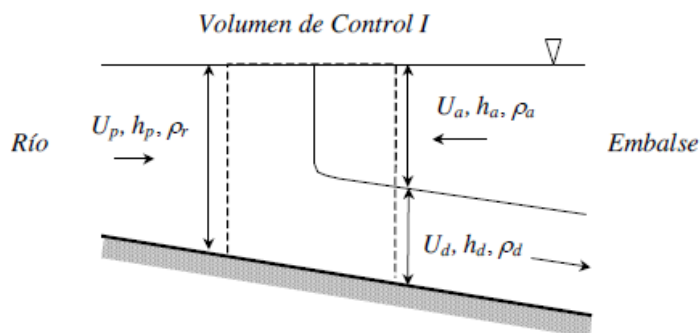


Figura 2.2: Volumen de control I para el fenómeno de inmersión. (Adaptado de Niño, 2019a).

<sup>1</sup> Para entender mejor las Figuras 2.2 y 2.3, el subíndice **p** hace referencia al cauce afluente, el subíndice **a** se refiere a las condiciones del embalse y el subíndice **d** corresponde a las características del flujo sumergido.



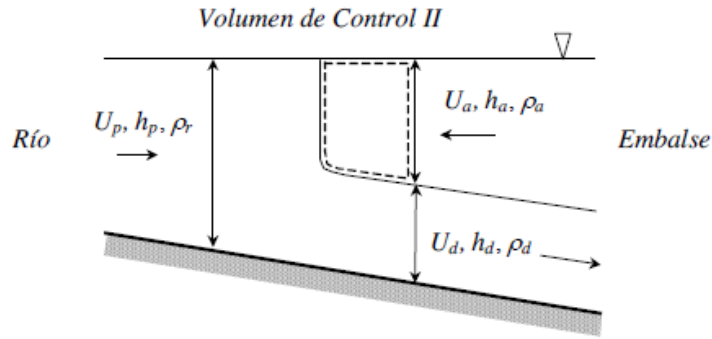


Figura 2.3: Volumen de control II para el fenómeno de inmersión. (Adaptado de Niño, 2019a).

Gracias a las ecuaciones obtenidas a partir de los volúmenes de control anteriores es posible determinar el punto de inmersión que corresponde a una condición de borde importante para la caracterización de las corrientes de turbidez que se generen aguas abajo de esta zona.

En cuanto a la modelación del escurrimiento aguas abajo del punto de inmersión, el análisis que se hace es similar al que se desarrolla para la hidráulica de canales abiertos. La principal diferencia para el análisis de estas corrientes es que se introducen los conceptos de Froude densimétrico y gravedad reducida. A pesar de lo anterior, el comportamiento de las corrientes de turbidez permite identificar escurrimientos críticos y normales, considerando pendiente suaves y fuertes. Por lo mismo, también existe la formación de resaltos hidráulicos lo cuales se pueden dar si la corriente presenta un escurrimiento supercrítico que a su vez se ve influenciada por aguas abajo gracias a la presencia de un obstáculo, que aplicado al caso puede tratarse del muro del embalse (Niño, 2019a,b,c).

Cabe mencionar, que si la corriente alcanza el muro del embalse, se podrá generar un resalto hidráulico debido a la condición de borde impuesta por el muro, donde los flujos supercríticos y subcríticos corresponderán a la corriente de turbidez. Existen artículos que evidencian corrientes de turbidez permanentes, o bien, durante largos periodos de tiempo, en lagos y embalses que alcanzan esta configuración (Kostic y Parker 2003a, b).

### 2.3. Experimentos que permiten entender el fenómeno

La literatura sobre experimentos de laboratorio que se hayan enfocado en reproducir corrientes de turbidez auto-acelerantes es bastante acotada. A continuación se presentan y discuten algunos ejemplos de ellos. Adicionalmente, para poder comparar condiciones de instalaciones experimentales se pretende considerar estudios más actuales, entiéndase, desde los años 2000 en adelante.

El primer estudio encontrado corresponde al de Alves et al. (2008) que en particular se centra en el análisis de los puntos de inmersión para la generación de corrientes de turbidez en embalses. En él se describe la generación de corrientes de turbidez unidimensionales impulsadas por sedimentos uniformes no cohesivos (harina de sílice) en un canal de 16,5 m de largo, 0,3 m de ancho y 0,75 m de alto. Se simula el río entrante a un embalse con una

pendiente de  $0,8^\circ$  (equivalente a  $0,12\%$ ) y un largo de  $4,04$  m; luego de este punto ocurre un abrupto cambio de pendiente a través de una rampa de  $30^\circ$  representando la zona de generación del delta. Más aguas abajo se extiende un canal de  $8$  m de largo con una pendiente de  $0,8^\circ$  y un horizonte final de  $3,75$  m de extensión, que en su conjunto representan al embalse y en el cual se desarrollan las corrientes de turbidez. Las mediciones de los perfiles de velocidad se obtienen a través de  $7$  sensores usando el sistema de Perfilado de Velocidad Ultrasónica (Ultrasonic Velocity Profile, UVP). Los perfiles de concentración de sedimentos en suspensión se obtuvieron a través de dos estaciones de medición, mediante el filtrado de muestras obtenidas a partir de un sifón y recogidas a diferentes alturas sobre el lecho, las variables anteriores en conjunto con las distribuciones de tamaño de los granos proporcionaron información relevante sobre la evolución espacial de la estructura de las corrientes de turbidez.

Si bien, el estudio anterior no se enfoca en la medición de corrientes de turbidez auto-acelerantes, posee una instalación experimental y una metodología de medición similar a los experimentos que si se encargan de reproducir dicho fenómeno.

Uno de los primeros experimentos que logra reproducir corrientes de turbidez con carácter auto-acelerante es el de Sequeiros et al. (2009). En este estudio se realizan varias pruebas de generación de corrientes de turbidez y en algunos casos se alcanza la auto-aceleración. Las corrientes se generan con partículas plásticas ligeras que van de  $20$  a  $200 \mu\text{m}$  con una densidad específica entre  $1,3$  y  $1,5$ . Estas partículas eran no cohesivas o ligeramente cohesivas. Los experimentos se realizaron en un canal de  $15$  m de largo con una pendiente inferior a  $5\%$ . Para generar el fenómeno de inmersión se probaron dos mecanismos de liberación. El primero se basó en iniciar la corriente desde un difusor situado en el fondo del canal. El segundo consistía en liberar la corriente cerca de la superficie del agua y dejarla caer al fondo del canal más abajo. Las mediciones de velocidad se realizaron a través del análisis de imágenes obtenidas de grabaciones con cámaras de video localizadas en  $5$  puntos distintos a lo largo del canal y la concentración del sedimento suspendido fue obtenido a partir de  $4$  sifones localizados a distintas distancias del canal. Con las mediciones anteriores se detectan diferentes etapas de la evolución de la cabeza de la corriente de turbidez, dentro de las cuales se logra documentar la autoaceleración.

El trabajo experimental más actual, en el cual se reproducen las corrientes de turbidez auto-acelerantes, corresponde al estudio realizado por Sequeiros et al. (2018). En él se documentan la generación de corrientes de turbidez compuestas de partículas plásticas no cohesivas que van de  $20$  a  $200 \mu\text{m}$  con una densidad específica de  $1,5$ . Los experimentos se realizaron en un canal de  $15$  m de largo con una pendiente inferior del  $5\%$ . Durante los experimentos se logró la auto-aceleración del frente y el cuerpo de una de las corrientes generadas en el estudio y se documentó utilizando tanto grabaciones de vídeo como tecnología UVP, que permitieron generar los perfiles de velocidad dentro del canal. La señal de retrodispersión de los UVP fue calibrada con muestras físicas y utilizada para estimar los perfiles de concentración de sedimentos en suspensión. Para generar las corrientes, al inicio del canal lleno de agua se inyectaba una mezcla de agua y sedimentos, previamente almacenada en un tanque de mezcla, y con ayuda de un difusor se aseguraba que el flujo más denso se incorporara uniformemente en el ancho del canal. Dado lo anterior, el mecanismo de inmersión era inducido (Figura 2.4) y desempeñó un papel principal durante los experimentos al evacuar el flujo de material en suspensión.

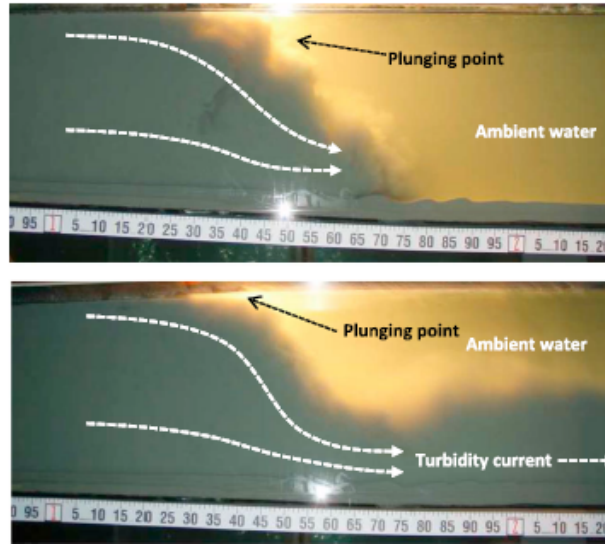


Figura 2.4: Ejemplo del punto de inmersión reproducido en los experimentos de Sequeiros et al., 2018. (Adaptado de Sequeiros et al. (2018)).

De los tres experimentos descritos, se observan similitudes en el largo del canal utilizado para reproducir las corrientes de turbidez. En el experimento de Alves et al. (2008) la pendiente del canal es bastante pequeña, y como se ha discutido anteriormente, quizá es por esta razón que no se hayan observado características autoacelerantes en sus pruebas, dado que las velocidades de las corrientes han demostrado tener una dependencia con la pendiente del lecho (Bell, 1942; Hsu et al., 2008). Por otro lado, el estudio de Sequeiros et al. (2009) sí logra reproducir el fenómeno, considerando una pendiente de canal del 5 %, pero no utiliza la tecnología UVP para estimar los perfiles de velocidad, por lo que los resultados presentan una incertidumbre mayor en comparación. Finalmente, Sequeiros et al. (2018) mejora la calidad de medición de velocidades de su estudio anterior e incluso compara los dos métodos, obteniendo resultados menos inciertos. De esta manera el análisis desarrollado en el estudio constituye el primer experimento de laboratorio que permite comprender con mayor detalle la estructura interna de las corrientes de turbidez auto-acelerantes. Por esta razón, es que el presente trabajo considera esta última publicación como base para modelar numéricamente estas corrientes.

## 2.4. Modelos Numéricos desarrollados

Encontrar estudios de modelación numérica enfocada específicamente a representar las corrientes de turbidez auto-acelerantes en distintas plataformas de programación es desafiante. Sin embargo, existen varios estudios de aplicación a casos reales en los que se modelan numéricamente corrientes de turbidez y en algunos casos se logran obtener características auto-acelerantes. A continuación se discuten algunos estudios que permiten comparar el trabajo que se plantea en la presente memoria.

Uno de los primeros trabajos exitosos en modelar numéricamente las corrientes de turbidez es el de Kassem & Imran (2001), los cuales se apoyaron en un robusto solucionador

de la dinámica de fluidos a nivel computacional (FLUENT, 1998), entiéndase también como tecnología CFD, para simular el experimento a escala de laboratorio realizado por Lee and Yu en 1997 que, al igual que en otros experimentos de la época, carecía de mediciones detalladas respecto a las características del punto de inmersión y de la parte frontal de la corriente. Por otro lado se destaca que el modelo resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds junto con las ecuaciones de conservación de sedimentos.

Un par de años más tarde, Huang et al. (2005) logra reproducir, a través de un modelo numérico, la evolución de corrientes de turbidez generados por tres trabajos experimentales de García (1993). El modelo amplía el trabajo de Choi y García (2002) incluyendo el arrastre y la depositación de sedimentos, lo que permite que se adapte a escurrimientos sobre diferentes formas de fondo, y resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds con el método de los volúmenes finitos.

Huang et al. (2008) ocupa su modelo desarrollado en años anteriores con un enfoque multifásico para validarlo con otros tres grupos de datos experimentales en los que se ocupan tres mecanismos distintos de descarga repentina para generar corrientes de turbidez: descarga en profundidad, descarga a media altura y bidispersión. Luego, el modelo es aplicado para estudiar estas corrientes a gran escala considerando descargas repentinas y/o flujos sostenidos. Del estudio se destaca la predicción de un flujo auto-acelerante para un caso de simulación a gran escala con descarga repentina y una pendiente moderada del 8,7%. Esto fue predicho solo teóricamente pues debido a limitaciones de escala esto no se ha demostrado a través de pruebas experimentales.

Yam et al. (2011) utiliza el modelo de mezcla incorporado en FLUENT (2006), cuyo principal atractivo es la ecuación de momentum de la fase dispersa, que se reduce a una relación algebraica de arrastre hidrodinámico que expresa un equilibrio entre la fuerza de arrastre de la partícula y la fuerza de gravedad ejercida sobre ella. El objetivo del estudio es evaluar la exactitud y validez del modelo algebraico de arrastre en la predicción de la evolución de las corrientes de turbidez. Los experimentos de Gladstone et al. (1998) se utilizan como base para simular corrientes monodispersas y bidispersas. El modelo predice relativamente bien la depositación de las corrientes que transportan partículas gruesas, pero sobreestima la tasa de depositación en las corrientes que transportan partículas finas. La incorporación de la dispersión turbulenta del modelo Simonin (1991) al modelo original reduce la tasa de depositación de sedimentos pero incurre en una fuerza de dispersión excesiva. Aún así, se incorpora otro modelo de simulación para la turbulencia, pero solo se observan pequeños cambios en los resultados. La conclusión principal es que modelos de dispersión turbulenta más precisos podrían mejorar los resultados de las simulaciones.

Hu et al. (2012) desarrolla un modelo numérico basado en las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en la vertical y acopla los términos asociados con el intercambio de sedimentos en las ecuaciones de conservación de masa y momentum de la mezcla. El estudio defiende las ecuaciones utilizadas, ya que el modelo acoplado considera explícitamente las interacciones entre la corriente, el transporte de sedimentos y el cambio morfológico. A diferencia de los modelos desacoplados (e.g., Parker et al., 1986; Sequeiros et al., 2009) que tienen en cuenta, en parte, estas interacciones. El modelo está bien balanceado y, por tanto, es aplicable tanto a las topografías irregulares como a las regulares. Se simulan dos eventos de corrientes de

turbidez en el embalse de Xiaolangdi, China, y se demuestra que es una herramienta viable para determinar la ubicación del frente de la corriente y, por lo tanto, el momento adecuado de operar las salidas de fondo, lo que es fundamental para una gestión eficaz de los sedimentos del embalse. Además, dado que los sedimentos son considerados un constituyente activo en el modelo, es posible reproducir corrientes de turbidez auto-acelerantes como lo dejó demostrado Hu & Cao (2009).

Una característica común de los estudios mencionados es basar las simulaciones del modelo numérico en resultados experimentales, para tener un punto de comparación. Además, usar las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds suele ser el enfoque más común para simular corrientes de turbidez y, a partir de ahí, incorporar modelos adicionales dependiendo de los objetivos del estudio. Huang et al. (2008) destaca entre los modelos numéricos desarrollados, ya que su modelo, exitosamente validado por varios experimentos, pudo predecir corrientes de turbidez auto-acelerantes en una de sus simulaciones a gran escala. Sin embargo este último resultado no se ha validado, pues experimentalmente existen limitaciones para demostrarlo. Por otro lado, Hu et al. (2012) no queda atrás con la habilidad de su modelo para desarrollar corrientes de turbidez auto-acelerantes.

Para este trabajo se dispone del programa COMSOL Multyphysics, que posee una interfaz gráfica fácil de usar e interactiva para modelar numéricamente una gran cantidad de problemas en el mundo de la ingeniería. Dentro de la literatura asociada al programa destacan estudios donde se desarrolla una relación entre las viscosidades, presiones y velocidades de flujo dentro de los sistemas de redes de agua (Mahmoud et al., 2012); se modelan deformaciones en las pendientes debido a distintos procesos de depositación (Katsman, 2013); e incluso se logra simular y optimizar procesos de sedimentación en embalses (Tulus & Marpaung, 2018). Lo anterior constata la versatilidad del software para la simulación de distintas situaciones relacionadas con la hidrodinámica y transporte de sedimentos, de lo cual se intuye que también permitirá modelar corrientes de turbidez auto-acelerantes. En el capítulo 3 se describirán las características generales del programa y se destallarán las ecuaciones del modelo numérico escogido para las simulaciones del presente estudio.

## 2.5. Conclusiones de la revisión

Como principal conclusión de esta revisión bibliográfica es que los estudios disponibles en torno a las corrientes de turbidez son numerosos; incluso no se incluyen todo ellos en este trabajo, por lo que se infiere que existe un gran interés por entender la hidrodinámica de este fenómeno a nivel mundial.

La principal problemática asociada a las corrientes de turbidez es la gran cantidad de sedimentos que transportan a los embalses, donde se depositan y acumulan con el tiempo. Esto limita la capacidad de estas estructuras y puede ser perjudicial en el largo plazo.

Aunque la técnica de purga es un ejemplo de solución para atenuar los crecientes depósitos de sedimentos que se forman inevitablemente en los embalses, existe la preocupación de que no se esté entendiendo en su totalidad los procesos hidrodinámicos que ocurren en dicho ambiente para poder elaborar un plan de manejo más efectivo.

La generación de corrientes de turbidez es un tema comprendido bastante bien y en detalle para el caso de los embalses. Sin embargo, cuando estas corrientes adquieren un carácter auto-acelerante tanto su comportamiento y la descripción de su propia estructura es un tema mucho menos detallado en la literatura.

Gracias a los experimentos desarrollados por Sequeiros et al (2009 y 2018) ha sido posible obtener una descripción más concreta del comportamiento de estas corrientes y su estructura. Por consiguiente, nace el interés de desarrollar modelos numéricos que permitan reproducir las condiciones de estos experimentos, con el fin de generar una herramienta amigable que permita dar paso a la predicción y prevención de problemas asociados a este tipo de corrientes.

Por lo tanto, según la información recabada en torno al uso de tecnologías CFD para modelar corrientes de turbidez, y en particular utilizando la herramienta COMSOL multiphysics, se elabora la siguiente hipótesis del presente trabajo de título: "COMSOL multiphysics es una herramienta capaz de modelar numéricamente una corriente de turbidez auto-acelerante con el objetivo de reproducir el trabajo experimental de Sequeiros et al. (2018)".

## **2.6. Objetivos**

Para poder vincular la revisión bibliográfica con los objetivos de este trabajo, es pertinente mencionar al embalse Rapel que, debido a su antigüedad, existe una gran información de datos sobre su sedimentación (Lecaros, 2011). Estos procesos se simularon considerando corrientes de turbidez a través del modelo numérico MOSSEM (González, 2006) y luego estos estudios se modificaron para conocer mejor los procesos de sedimentación (Balbontín, 2013).

Con este estudio se espera contribuir al entendimiento de las corrientes de turbidez y su carácter auto-acelerante, para que el conocimiento sea aplicado a problemas asociados a la depositación en embalses. Además, considerando la necesidad de entender los procesos hidrodinámicos en los que se ven involucradas las corrientes de turbidez, los principales objetivos del presente trabajo se detallan a continuación.

### **2.6.1. Objetivo General**

El objetivo general es realizar una modelación numérica para estudiar la estructura interna de corrientes de turbidez auto-acelerantes, basada en los resultados experimentales de Sequeiros et al. (2018).

### **2.6.2. Objetivos Específicos**

1. Utilizar el software de modelación COMSOL Multiphysics para modelar el fenómeno.
2. Simular las condiciones del experimento base para reproducir las corrientes de turbidez auto-acelerantes.
3. Analizar la validez de los resultados de la modelación y evaluar la posibilidad de aplicar el modelo en la determinación de pendientes para las cuales las corrientes de turbidez son auto-acelerantes.

# Capítulo 3

## Software de modelación

### 3.1. Descripción de COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics es un software comercial que se puede utilizar para simular diseños, dispositivos, y cualquier proceso en todos los ámbitos de la ingeniería, industria de manufacturación e investigación científica. Corresponde a una plataforma de simulación que abarca todos los pasos necesarios en el proceso de modelación, esto es, desde la definición de una geometría, las propiedades del material y la elección del modelo numérico que describirá a los fenómenos en específico, incluyendo el proceso de resolución de las ecuaciones y modelos de post-procesamiento para generar resultados más precisos y confiables.

Además, el software otorga la oportunidad de desarrollar problemas en cualquier área de la ingeniería contando con un único ambiente de trabajo, lo cual lo convierte en una herramienta cómoda. Incluso, los resultados obtenidos pueden adaptarse a otras herramientas computacionales de trabajo lo que lo convierte en una plataforma flexible.

### 3.2. Modelo Numérico

Como el objetivo es modelar una corriente de turbidez auto-acelerante es necesario contar con un modelo que considere una mezcla de fases, que permite hacer la diferencia entre agua y sedimentos. Adicionalmente, dadas las características del experimento de Sequeiros et al. (2018), se debe trabajar con la presencia de turbulencia. De acuerdo a esto, el modelo numérico escogido corresponde a *Mixture Model, Turbulent Flow ( $k - \varepsilon$ )* y se describe a continuación.

#### 3.2.1. Mixture Model, Turbulent Flow ( $k - \varepsilon$ )

El modelo numérico *Mixture Model* contiene la física de interfaces para modelar tanto flujos laminares como turbulentos de líquidos que presentan una fase dispersa, que puede ser de burbujas, gotas de otro líquido, o bien, partículas sólidas, y una fase continua que por lo general es agua.

Las interfaces del modelo escogido, considerando un flujo turbulento, se utilizan para modelar flujos multifásicos dispersos a altos números de Reynolds, y además adquieren el supuesto de que las fases dispersas siempre viajan en su velocidad terminal.

Particularmente, cuando el modelo de turbulencia utilizado es  $k - \varepsilon$ , se resuelve el set de ecuaciones de Navier-Stokes para el momentum de la mezcla, la distribución de presiones se calcula a partir de la ecuación de continuidad promediada de mezcla y la velocidad de la fase dispersa se describe mediante un modelo de arrastre hidrodinámico. Además, la fracción volumétrica de la fase dispersa se rastrea resolviendo una ecuación de transporte para la fracción de volumen. Finalmente, los efectos de la turbulencia se modelan utilizando el modelo  $k - \varepsilon$  estándar de dos ecuaciones, donde  $k$  representa la energía cinética turbulenta y  $\varepsilon$  corresponde a la tasa de disipación de energía cinética turbulenta. Adicionalmente, el flujo cercano a las paredes se modela usando funciones atribuidas previamente a ellas.

### 3.3. Ecuaciones del modelo

Las variables dependientes con las que trabaja el modelo numérico se muestran en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1: Variables dependientes con las que trabaja el modelo numérico utilizado en COMSOL Multiphysics.

<b>Variables dependientes del modelo numérico</b>	<b>Símbolo de identificación en el software</b>
Velocidad	j
Componentes de velocidad (x, y, z)	ju, jv, jw
Presión	P
Fracción volumétrica de la fase dispersa	phid
Velocidad de deslizamiento al cuadrado	slip vel
Energía cinética turbulenta	k
Tasa de disipación turbulenta	ep

Las suposiciones que adopta el modelo numérico son las siguientes (COMSOL, 1998-2018).

- La densidad de cada fase es aproximadamente constante.
- Ambas fases comparten el mismo campo de presiones.
- El tiempo de relajación de las partículas es corto comparado con las escalas de tiempo del flujo macroscópico.

El sistema de ecuaciones que abarca el modelo numérico se detalla a continuación (COMSOL, 1998-2018).



### 3.3.1. Densidad de la mezcla

La densidad de la mezcla está dada por la ecuación 3.1:

$$\rho = \phi_c \rho_c + \phi_d \rho_d \quad (3.1)$$

donde:

- $\phi_c$  y  $\phi_d$  denotan la fracción volumétrica de la fase continua y dispersa en ( $m^3/m^3$ ), respectivamente.
- $\rho_c$  es la densidad de la fase continua en ( $kg/m^3$ ), y
- $\rho_d$  es la densidad de la fase dispersa en ( $kg/m^3$ ).

Y, además, las fracciones volumétricas están relacionadas según la ecuación 3.2:

$$\phi_c = 1 - \phi_d \quad (3.2)$$

### 3.3.2. Flujo volumétrico de las fases

El flujo volumétrico de cada fase están dados por las ecuaciones 3.3 y 3.4:

$$j_d = \phi_d u_d \quad (3.3)$$

$$j_c = \phi_c u_c \quad (3.4)$$

donde:

- $u_c$  y  $u_d$  son los vectores de velocidad de las fases continua y dispersa en (m/s), respectivamente.

### 3.3.3. Velocidad de la mezcla

En versiones anteriores a la 5.4 de COMSOL Multiphysics se usaba la velocidad de la mezcla promediada en la masa,  $u$  en (m/s), definida en la ecuación 3.5:

$$u = \frac{\phi_c \rho_c u_c + \phi_d \rho_d u_d}{\rho} \quad (3.5)$$

La velocidad de la mezcla, para versiones mayores o iguales a las 5.4, corresponde a la densidad del flujo promediada en el volumen o, directamente, la velocidad de la mezcla promediada en el volumen  $j$  en (m/s), definida en la ecuación 3.6:

$$j = j_d + j_c \quad (3.6)$$

### 3.3.4. Ecuación de continuidad para la mezcla

La ecuación de continuidad para la mezcla se muestra en la ecuación 3.7:

$$\rho_t + \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (3.7)$$

En este modelo se supone que las densidades de ambas fases,  $\rho_d$  y  $\rho_c$ , son constantes y, por lo tanto, la ecuación 3.8 se considera una alternativa a la ecuación de continuidad de la mezcla:

$$\nabla \cdot j = 0 \quad (3.8)$$

### 3.3.5. Ecuación de momentum para la mezcla

La ecuación de momentum para la mezcla se presenta en la ecuación 3.9:

$$\rho j_t + \rho(j \cdot \nabla)j + \rho_c \delta(j_{slip} \cdot \nabla)j = -\nabla p - \nabla \cdot \tau_{Gm} + \rho g + F - \nabla \cdot [\rho_c(1 - \phi_c \delta)u_{slip} j_{slip}^T] - \rho_c \delta[(j \cdot \nabla)j_{slip} + (\nabla \cdot (D_{md} \nabla \phi_d) - \frac{m_{dc}}{\rho_d})] \quad (3.9)$$

donde:

- $j$  es el vector velocidad en (m/s).
- $\rho$  es la densidad en ( $kg/m^3$ ).
- $p$  es la presión en (Pa).
- $\delta$  es la diferencia de densidad reducida en (kg/kg).
- $u_{slip}$  es el vector de velocidad relativa de arrastre entre las dos fases en (m/s).
- $j_{slip}$  es el flujo por arrastre en (m/s).
- $\tau_{Gm}$  es la suma de esfuerzos viscosos y turbulentos en ( $kg/(m \cdot s^2)$ ).
- $D_{md}$  es el coeficiente de dispersión turbulento en ( $m^2/s$ ).
- $m_{dc}$  es la tasa de transferencia de masa de la fase dispersa a la continua en ( $kg/(m^3 \cdot s)$ ).
- $g$  es el vector gravedad en ( $m/s^2$ ).
- $F$  es cualquier fuerza de volumen adicional en ( $N/m^3$ ).

La diferencia de densidad reducida se encuentra definida en la ecuación 3.10:

$$\delta = \frac{\rho_d - \rho_c}{\rho_c} \quad (3.10)$$

El flujo por arrastre se define convenientemente como se indica en la ecuación 3.11:

$$j_{slip} = \phi_d \phi_c u_{slip} \quad (3.11)$$

Aquí,  $u_{slip}$  denota la velocidad relativa entre las dos fases. Esta puede o no considerarse al momento de la modelación, pero cuando se considera se utiliza el modelo Schiller-Naumann que, de acuerdo a con la literatura, funciona bien para partículas sólidas en un líquido.

Cuando se incluye la velocidad relativa de arrastre se ocupa la relación de la ecuación 3.12:

$$\frac{3}{4} \frac{C_d}{d_d} \rho_c |u_{slip}| u_{slip} = -\frac{(\rho - \rho_d)}{\rho_c} (-j_t - (j \cdot \nabla)j + g + \frac{F}{\rho}) \quad (3.12)$$

donde:

- $C_d$  es el coeficiente de arrastre de la partícula, que también se puede interpretar como la relación entre las fuerzas de arrastre viscoso y las fuerzas boyantes actuando en la fase dispersa.

El modelo de Schiller-Naumann modela el coeficiente de arrastre de acuerdo a la expresión 3.13:

$$C_d = \begin{cases} \frac{24}{Re_p} (1 + 0,15 Re_p^{0,687}) & Re_p < 1000 \\ 0,44 & Re_p > 1000 \end{cases} \quad (3.13)$$

donde:

- $Re_p$  es el Reynolds de la partícula y se define según la ecuación 3.14:

$$Re_p = \frac{d_d \rho_c |u_{slip}|}{\mu} \quad (3.14)$$

La suma de los esfuerzos viscosos y turbulentos se expresa como indica la ecuación 3.15:

$$\tau_{Gm} = (\mu + \mu_T) [\nabla j + \nabla j^T] \quad (3.15)$$

donde:

- $\mu$  es la viscosidad de la mezcla en (Pa·s)
- $\mu_T$  es la viscosidad turbulenta también en (Pa·s).

El coeficiente de dispersión turbulento se define según la ecuación 3.16:

$$D_{md} = \frac{\mu_T}{\rho \sigma_T} \quad (3.16)$$

donde:

- $\sigma_T$  es el número de Schmidt para una partícula turbulenta (adimensional).

### 3.3.6. Ecuación de transporte para la fracción volumétrica de la fase dispersa

La ecuación de transporte para la fracción volumétrica de la fase dispersa se indica en la ecuación 3.17:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\phi_d \rho_d) + \nabla \cdot (\phi_d \rho_d u_d) = \nabla \cdot (\rho_d D_{md} \nabla \phi_d) - m_{dc} \quad (3.17)$$

### 3.3.7. Sobre la transferencia de masa en la interfaz

La tasa de transferencia de masa depende del área de interfaz entre ambas fases. Para determinar el área de la interfaz es necesario resolver la ecuación para el número de densidad de la fase dispersa ( $\eta$  en  $(1/m^3)$ ), adicional a la fracción volumétrica de la fase. El modelo numérico, Mixture Model, supone que las partículas pueden decrecer o crecer en tamaño, pero no pueden desaparecer, mezclarse entre sí o dividirse. Entonces la ecuación de conservación del número de densidad corresponde a la ecuación 3.18, cuyo resultado permite obtener el área de la interfaz por unidad de volumen ( $a$  en  $(m^2/m^3)$ ) dada por la ecuación 3.19:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + j \cdot \nabla \eta + \nabla \cdot (\eta \phi_c u_{slip}) = \nabla \cdot (D_{md} \nabla \eta) \quad (3.18)$$

$$a = (4\eta\pi)^{1/3} (3\phi_d)^{2/3} \quad (3.19)$$

### 3.3.8. Incorporación de la velocidad de sustentación al modelo de turbulencia

Cuando se incorpora la velocidad sustentación a la ecuación 3.17 como un término difusivo, esta se tranforma en la ecuación 3.20:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\phi_d) + j \cdot \nabla \cdot (\phi_d) + \nabla \cdot (j_{slip}) = \nabla \cdot (D_{md} \nabla \phi_d) - \frac{m_{dc}}{\rho_d} \quad (3.20)$$

La inclusión de la velocidad de sustentación en la ecuación 3.17 modifica el flujo de la fase dispersa, por lo tanto, se tienen flujos de fase dispersa ( $j_{d,eff}$ ) y velocidad ( $u_{d,eff}$ ) efectivos definidos en las ecuaciones 3.21 y 3.22.

$$j_{d,eff} = j_d - D_{md} \nabla \phi_d \quad (3.21)$$

$$u_{d,eff} = u_d - \frac{D_{md}}{\phi_d} \nabla \phi_d \quad (3.22)$$

# Capítulo 4

## Metodología de trabajo

### 4.1. Familiarización con el software

Para comenzar la familiarización con el software se establece conexión remota, a través de la aplicación AnyDesk, con el computador que contaba con la licencia del software de modelación a utilizar: COMSOL Multiphysics, versión 5.4.0.246.

Se consultan videos tutoriales que explican cómo utilizar las herramientas de COMSOL Multiphysics. La información básica reunida para crear un modelo numérico se explica a continuación y también se resume en el esquema de la Figura 4.1.

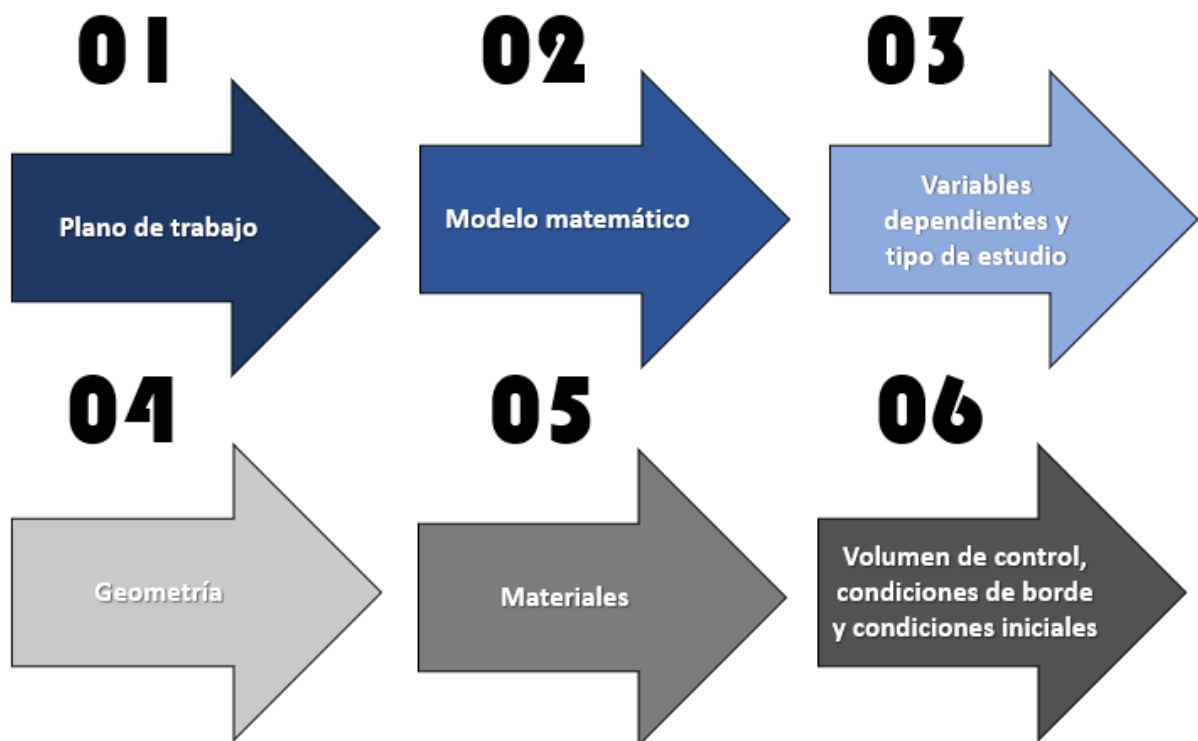


Figura 4.1: Esquemización de los pasos a seguir para crear un modelo en COMSOL Multiphysics.

Tal como se enumera en la Figura 4.1 para crear un modelo en la plataforma primero se debe escoger un **plano de trabajo**, esto es, elegir entre las siguientes opciones: un plano puntual (sin dimensiones), un plano unidimensional, un plano unidimensional con simetría axial, un plano bidimensional, un plano bidimensional con simetría axial o un plano tridimensional.

Posteriormente se debe escoger el **modelo matemático**, el cual contiene el conjunto de ecuaciones capaz de simular el fenómeno de interés. En general, la plataforma contiene una variedad de modelos matemáticos dedicados al amplio mundo de la ingeniería y la ciencia. Para efectos de este trabajo de título los modelos de interés se encuentran en la sección de Fluidos, específicamente, en la subdivisión de Flujos Multifásicos.

Si los pasos anteriores se llevan a cabo, a continuación el software informará las **variables dependientes** con las que trabajará y luego se deberá escoger el **tipo de estudio** que se desea ocupar, es decir, si la modelación será estacionaria o dependiente del tiempo.

Los siguientes pasos a realizar integran decisiones más específicas dentro de las cuales es necesario **definir la geometría** del modelo, **los materiales** a utilizar, el **volumen de control** del estudio, las **condiciones de borde** y las **condiciones iniciales**. Los valores definidos dentro de estas etapas pueden cambiar tanto por las modelaciones que se quieran llevar a cabo como por los objetivos que se quieran cumplir durante el desarrollo de las pruebas.

## 4.2. Construcción del modelo

El modelo numérico se construye basándose en el esquema representado en la sección anterior y la información del experimento reportada por Sequeiros et al. (2018) . En la Tabla 4.1 se muestran las características generales del modelo construido mientras que las elecciones específicas se explican en detalle en las siguientes subsecciones.

Tabla 4.1: Características generales del modelo construido.

<b>Paso de construcción</b>	<b>Elección</b>
1. Plano de trabajo	Bidimensional (2D)
2. Modelo Matemático	Mixture Model, Turbulent Flow, $k - \varepsilon$
3. Tipo de estudio	Dependiente del tiempo

### 4.2.1. Definición de geometría

La geometría del modelo se construye utilizando tres figuras geométricas, como se indica en la Figura 4.2, las cuales permiten constituir un canal con una altura inicial de 0,45 (m), una pendiente del 5%, una longitud horizontal de 15 (m) y finalmente un estanque cuadrado de 1,8 (m).

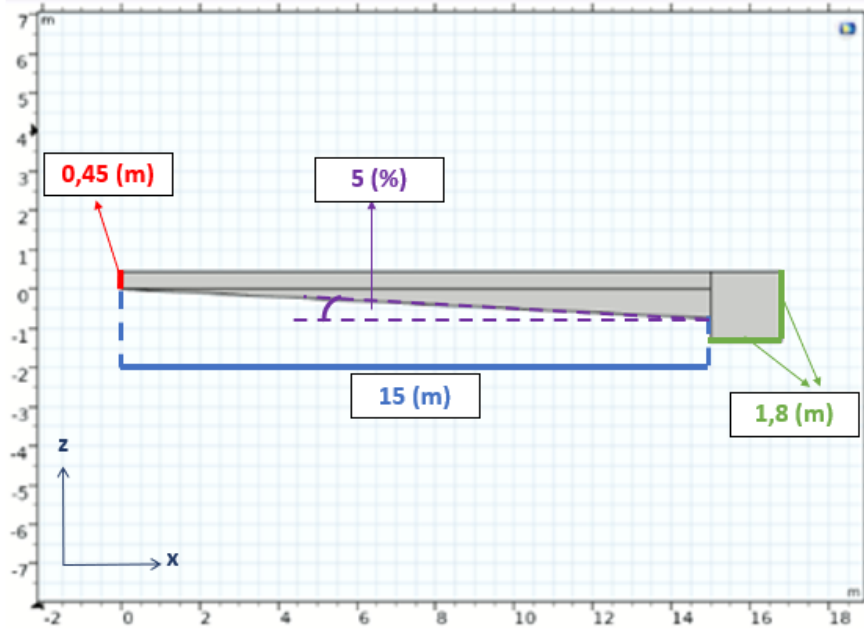


Figura 4.2: Geometría construida en COMSOL Multiphysics.

### 4.2.2. Definición de materiales

Los materiales utilizados en la modelación son dos: el agua, como fase continua, y el sedimento, como fase dispersa. El agua se encuentra predefinida como material en el software, mientras que el sedimento se debe incorporar como un nuevo material de densidad ( $\rho_{s,1}$ ) 1.530 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ). El diámetro característico ( $d_s$ ) también se incorpora en el modelo, pero como característica de la mezcla bifásica. Toda la información de los sedimentos utilizados por Sequeiros et al. (2018) se muestran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Características del sedimento utilizado en el experimento de Sequeiros et al. (2018).

Tipo de Sedimento	Gravedad Específica	d50 ( $\mu\text{m}$ )	d84 ( $\mu\text{m}$ )	d16 ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma = \sqrt{d84/d16}$ (-)
Plástico	1,53	57	77	42	1,37

### 4.2.3. Definición de condiciones de borde

Las condiciones de borde a definir en el modelo se señalan gráficamente en la Figura 4.3 y se explican a continuación.

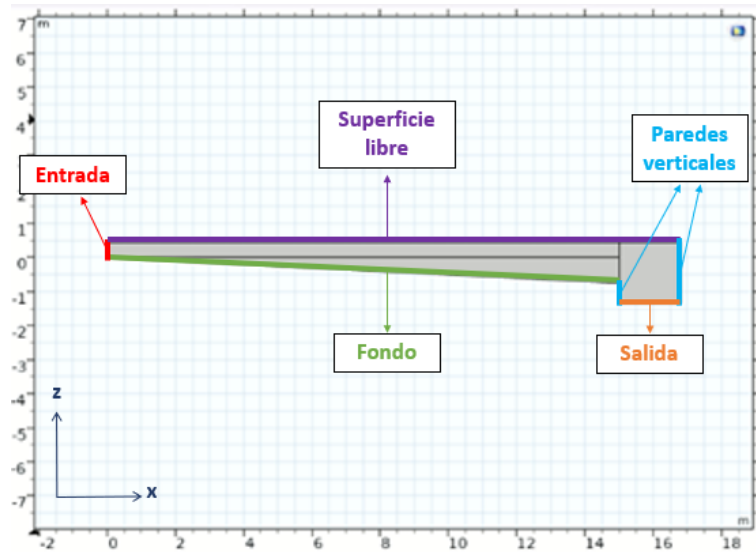


Figura 4.3: Esquemización de las condiciones de borde que se deben definir en el modelo.

#### 4.2.3.1. Entrada

La **Entrada** identifica el lugar por donde el flujo ingresa y para definirlo correctamente en el modelo se deben incorporar los siguientes datos:

1. La velocidad normal del flujo de entrada,  $J_0$  en (m/s).
2. La fracción volumétrica de la fase dispersa inyectada,  $\phi_{d,0}$  adimensional.

La velocidad normal del flujo ( $J_0$ ) se obtiene de considerar que el ancho del canal y la altura de escurrimiento son de 0,45 (m) cada uno y el caudal de entrada ( $Q$ ) es de 1,8 (L/s) de acuerdo a las características del experimento presentadas en la Tabla 4.3<sup>1</sup>. La fracción volumétrica de la fase dispersa ( $\phi_{d,0}$ ) es de un 2% y se obtiene a partir de la misma Tabla.

Tabla 4.3: Características de la sexta prueba experimental realizada por Sequeiros et al. (2018).

$Q_0$ (L/s)	$C_0$ (kg/m <sup>3</sup> ) (%)	$T_{in}$ (°C)	$T_{aw}$ (°C)	$\rho_0$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\rho_{aw}$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\Delta\rho/\rho_0$ (-)	Punto de inmersión (m)
1,80	31 2,0	19,0	18,5	1.009,1	998,1	0,0105	1,3

<sup>1</sup> La información de la Tabla 4.3 presenta las características generales de la sexta prueba experimental realizada por Sequeiros et al. (2018), en la cual se registra una corriente de turbidez auto-acelerante. El punto de inmersión se midió respecto al inicio del canal



#### 4.2.3.2. Fondo

Para el **Fondo** se impone la presencia de fase dispersa en una concentración específica ( $\phi_{d,f,i}$ ) y se prueba inicialmente con dos valores escogidos arbitrariamente en 0,005 y 0,008 adimensional, pues Sequeiros et al. (2018) no reporta la medición de ese valor. Adicionalmente, en las modelaciones que se realizan se evalúa la diferencia entre dos condiciones de borde distintas asociadas con el arrastre hidrodinámico que se puede producir entre el flujo y la superficie de contacto con sedimentos. Por lo tanto, un grupo de modelaciones presentará los resultados con la condición de que haya arrastre y el otro los presentará en el caso de que esto no ocurra, lo cual simulará a su vez si hay o no arrastre de sedimentos, respectivamente.

#### 4.2.3.3. Paredes verticales

Para el caso de las **paredes verticales** se impone nula presencia de fase dispersa y una condición de borde de no deslizamiento.

#### 4.2.3.4. Superficie libre

Para simular una **superficie libre** las condiciones impuestas corresponden a la nula presencia de fase dispersa y la condición de deslizamiento.

#### 4.2.3.5. Salida

Para la **Salida**, ubicada aguas abajo del canal, se imponen como condiciones que la presión de salida del flujo sea atmosférica, el tipo de recirculación del flujo sea nula y que haya presencia de fase dispersa pero sin concentración específica.

### 4.2.4. Definición de condiciones iniciales

Las condiciones iniciales corresponden al estado del canal antes de inyectar la mezcla de agua con sedimentos. Estas son la temperatura del experimento, el campo de velocidad inicial dentro del canal lleno de agua, la presión inicial y la concentración inicial de la fase dispersa dentro del canal (Tabla 4.4).

Tabla 4.4: Condiciones iniciales para el modelo numérico.

Parámetro	Valor
Temperatura (K)	293,15
Velocidad en x (m/s)	0
Velocidad en z (m/s)	0
Presión (Pa)	101.325
$\phi_{d,0}$ (-)	0

### 4.3. Modelaciones realizadas

La forma en que se determinan las distintas características de las modelaciones a realizar se sistematiza a través de un árbol de decisiones esquematizado en la Figura 4.4. La primera modelación corresponde al punto de partida y los cambios nacen de la necesidad de perfeccionar los primeros resultados, empezando por ingresar un valor más preciso para la velocidad de escurrimiento del flujo.

Los siguientes parámetros que se modifican son la concentración del Fondo ( $\phi_{d,f,i}$ ), el diámetro característico de los sedimentos ( $d_s$ ) y su densidad ( $\rho_{s,k}$ ). El primero es un parámetro desconocido y por calibrar, mientras que la segunda variable pasa de un  $d_{50}$  a un  $d_{84}$  con la intención de sumar momentum a la corriente de sedimentos que se intenta modelar, pues, en teoría, esto debería favorecer el aumento de las velocidades y disminuir la cantidad de sólidos en suspensión dentro de la corriente. Por último, la densidad del sedimento se considera variable, porque se busca evaluar el comportamiento de los resultados considerando un valor de densidad más cercano al de la arena, que es considerada fina y suele ser parte de los sólidos suspendidos en el transporte de sedimentos que ocurre en los ríos.

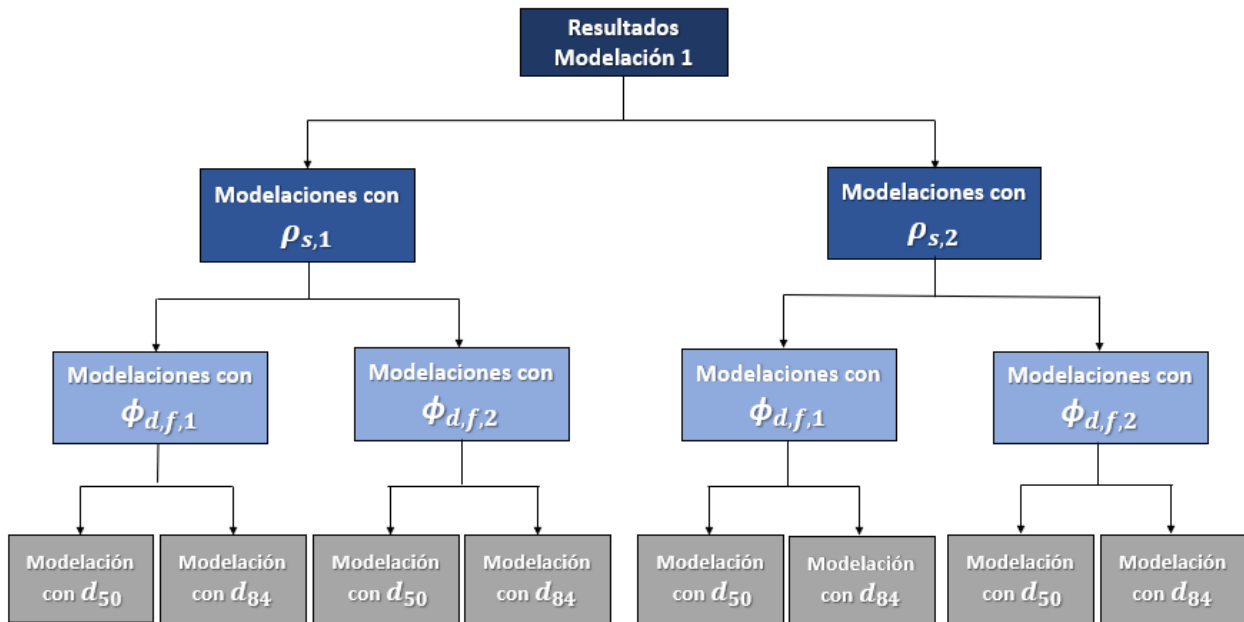


Figura 4.4: Árbol de decisión establecido para realizar las distintas modelaciones.

A partir del árbol de decisiones de la Figura 4.4 se genera un conjunto de ocho modelaciones adicionales a la primera modelación. Todas estas se realizan considerando la condición de borde sin arrastre en el Fondo. En consecuencia, este conjunto de modelaciones se debe repetir con la condición de arrastre en el Fondo y, por lo tanto, se generan 16 modelaciones distintas, sin considerar a la primera. Los valores de los parámetros modificados para ambos conjuntos de modelaciones se muestran en las Tablas 4.5 y 4.6.

Tabla 4.5: Parámetros para las modelaciones realizadas sin la condición de arrastre en el Fondo.

Parámetro	Modelaciones sin condición de arrastre								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$J_0$ (m/s)	0,01	0,0089	0,0089	0,0089	0,0089	0,0089	0,0089	0,0089	0,0089
$Q$ (L/s)	2,0	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
$\phi_{d,f,i}$ (-)	0,005	0,005	0,008	0,008	0,005	0,005	0,005	0,008	0,008
$d_s$ ( $\mu m$ )	57 (d50)	57 (d50)	57 (d50)	77 (d84)	77 (d84)	57 (d50)	77 (d84)	57 (d50)	77 (d84)
$\rho_{s,k}$ (kg/m <sup>3</sup> )	1530	1530	1530	1530	1530	2530	2530	2530	2530

Tabla 4.6: Parámetros para las modelaciones realizadas con la condición de arrastre en el Fondo.

Parámetro	Modelaciones con condición de arrastre								
	10	11	12	13	14	15	16	17	
$J_0$ (m/s)	0,0089	0,0089	0,0089	0,0089	0,0089	0,0089	0,0089	0,0089	
$Q$ (L/s)	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8	
$\phi_{d,f,i}$ (-)	0,005	0,005	0,008	0,008	0,005	0,005	0,008	0,008	
$d_s$ ( $\mu m$ )	57 (d50)	77 (d84)	57 (d50)	77 (d84)	57 (d50)	77 (d84)	57 (d50)	77 (d84)	
$\rho_{s,k}$ (kg/m <sup>3</sup> )	1530	1530	1530	1530	2530	2530	2530	2530	

## 4.4. Obtención de resultados

Los resultados principales obtenidos de cada simulación corresponden a los perfiles de velocidad y de concentración en cuatro instantes y secciones distintas equivalentes a los presentados por Sequeiros et al. (2018). Alrededor de 30 y 18 datos se extraen para los perfiles de velocidad y de concentración, respectivamente, de cada gráfico del artículo de Sequeiros et al. (2018) y se traspasa manualmente a un archivo de texto con el objetivo de facilitar las comparaciones. En la Figura 4.5 se observan los resultados extraídos del estudio.

Con el fin de estudiar diferencias entre el comportamiento de los resultados simulados y los del experimento, los perfiles de velocidad y de concentración se adimensionalizan en ambos ejes. Para los gráficos de velocidad el eje z se divide por la altura inicial de escurrimiento (0,45 m) y el eje x se divide por la velocidad máxima del perfil. Para los gráficos de concentración el eje z también se divide por la altura inicial de escurrimiento y el eje x se divide por la densidad correspondiente.

Adicionalmente, se obtienen las velocidades medias del flujo de sedimentos a lo largo del canal en un instante determinado para evaluar su variación espacial en el eje x.

## Resultados de Sequeiros et al. (2018)

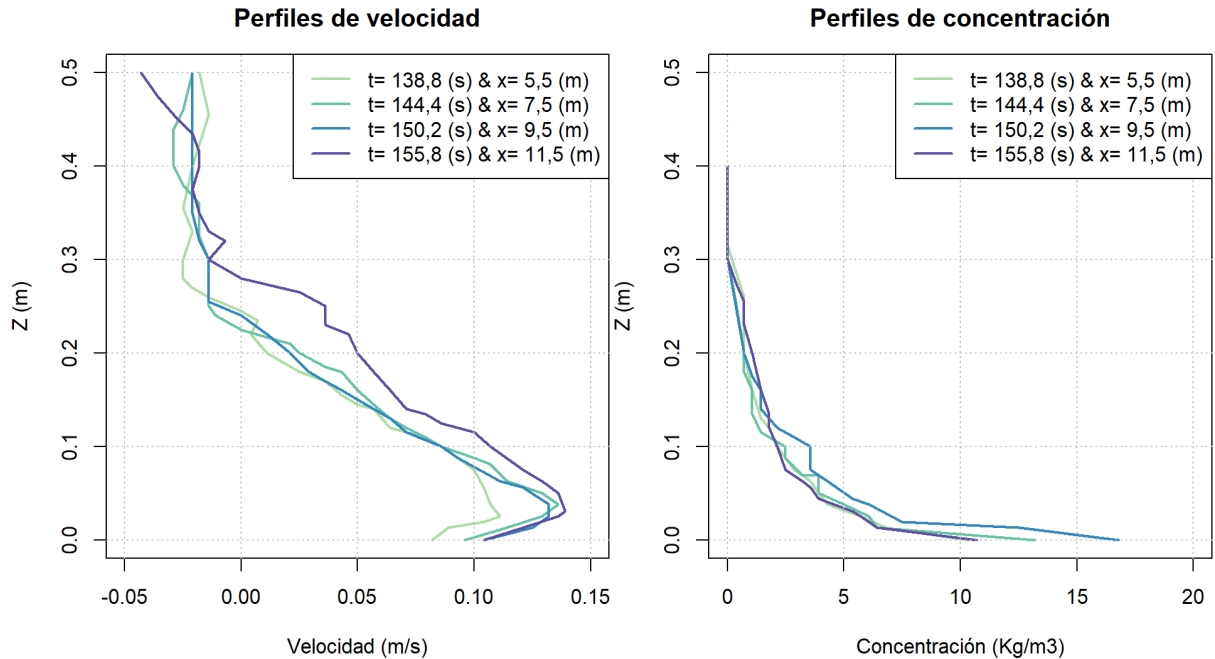


Figura 4.5: Resultados extraídos del estudio de Sequeiros et al. (2018).

Los resultados del experimento se obtienen para las secciones del canal en  $x = (5,5; 7,5; 9,5; 11,5)$  (m) y en las mismas posiciones se obtienen los resultados del modelo, pero eventualmente se busca incluir indirectamente el efecto del punto de inmersión que según la Tabla 4.3 ocurre a los 1,3 (m) desde el inicio del canal durante el experimento y, por lo tanto, los resultados del modelo también se obtienen para las secciones del canal en  $x = (4,2; 6,2; 8,2; 10,2)$  (m), considerando que el punto de inmersión en el modelo ocurre justo en  $x = 0$  (m). La diferencia entre secciones se señala visualmente en la Figura 4.6.

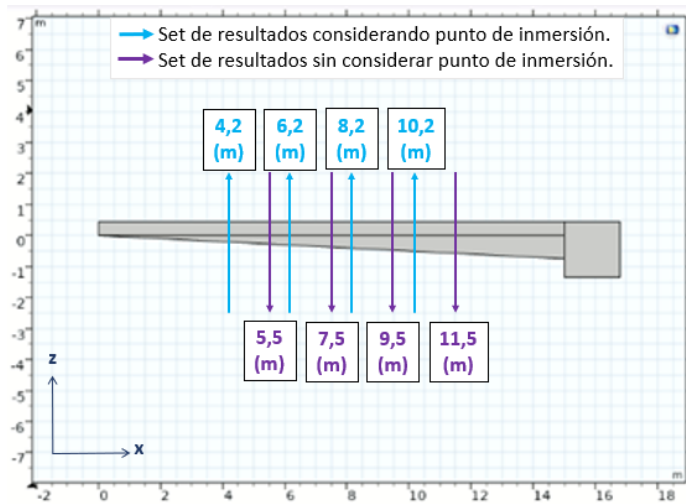


Figura 4.6: Conjuntos de posiciones en el canal a partir de las cuales se obtienen resultados para cada modelo considerando o no el punto de inmersión reportado en el experimento.

Los perfiles de velocidad y de concentración obtenidos para cada modelación se comparan con los resultados de la Figura 4.5 a través del cálculo de la raíz del error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés) según la ecuación 4.1:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \hat{x}_i)^2}{N}} \quad (4.1)$$

donde,

- $N$  es la cantidad de datos comparados.
- $x_i$  son los resultados experimentales de la variable  $i$ , que puede ser velocidad o concentración.
- $\hat{x}_i$  son los resultados simulados de la variable  $i$ , que puede ser velocidad o concentración.

La modelación con mejor ajuste es aquella que presenta los menores valores de RMSE en perfiles de velocidad y en perfiles de concentración. Para verificar que la modelación escogida es adecuada se genera otro conjunto de modelaciones, variando la concentración de sedimentos de fondo ( $\phi_{d,f,i}$ ) de 0,001 a 0,008 en intervalos de 0,001 y se vuelven a calcular los RMSE para escoger definitivamente la mejor modelación.

Finalmente, al identificar la modelación que genera el mejor ajuste con los resultados experimentales se genera una animación de cómo evoluciona la corriente de sedimentos en el tiempo. Además, se extraen perfiles de velocidad separados por pequeños intervalos de tiempo y con ellos se calculan tasas de variación de caudal unitario para distintas secciones del canal. Estos valores son comparables con los resultados presentados por Sequeiros et al. (2018), los cuales son referidos como valores de "aceleración". La tasa de variación de caudal unitario del flujo de sedimentos se calcula como se indica en la ecuación 4.2:

$$\frac{dUh}{dt} = \int_{z=0}^{z(u=0)} \frac{u(t+dt) - u(t-dt)}{2dt} dz \quad (4.2)$$

donde,

- $U$  es la velocidad promediada en la vertical.
- $h$  es el espesor de la corriente de turbidez, considerada como la elevación  $z$  donde la velocidad  $u$  es igual a cero.
- $u(t+dt)$  es la velocidad en la elevación  $z$  evaluada en un tiempo  $t+dt$ .
- $u(t-dt)$  es la velocidad en la elevación  $z$  evaluada en un tiempo  $t-dt$ .

## 4.5. Análisis de resultados

Los resultados del modelo se guardan en formato de archivo de texto y son procesados en el software de programación Open Source RStudio.

Para profundizar el análisis se revisa material relacionado con el transporte hidráulico de sólidos en suspensión y se busca comparar los resultados con datos experimentales de distintas corrientes de densidad obtenidos por García & Parker (1991).

A partir de los perfiles de concentración que correspondan se estudian los gastos sólidos en suspensión del modelo y el experimento. Para ello se construye un gráfico de concentraciones partido por la concentración de referencia ( $C_{ref}$ ) como función de la relación  $z/H$ . La concentración de referencia ( $C_{ref}$ ) se define como la concentración que hay a una altura equivalente al 5 % de la altura total de escurrimiento ( $H$ ), que se conoce como altura de referencia.

Posteriormente se construye el gráfico de la concentración de referencia como función de la variable adimensional  $Z_u$  que se calcula según la ecuación 4.3 utilizando la extensión de sedimento no uniforme de García & Parker (1991), y aunque si bien el sedimento del experimento es considerado uniforme, la corrección de este método se considera pequeña e igual de representativa. Lo anterior sirve para estudiar las características del flujo de incorporación de sedimento en suspensión.

$$Z_u = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n Z_{mk} = \frac{u'_*}{w_{sk}} R_{pk}^{0,6} \left( \frac{d_{sk}}{D_{50}} \right)^m \quad (4.3)$$

donde,

- $n$  es la cantidad de diámetros característicos del sedimento.
- $u'_*$  es la velocidad friccional en ausencia de formas de fondo.
- $w_{sk}$  es la velocidad de sedimentación.
- $R_{pk}$  es un número adimensional de la partícula.
- $d_{sk}$  es el diámetro  $k$ -ésimo del sedimento.
- $D_{50}$  es el diámetro del 50 %.
- $m$  es un parámetro que vale 0,2.

Para estimar la velocidad friccional en el caso de los datos experimentales se trabaja con los esfuerzos de corte de Shields<sup>2</sup> ( $\tau_*$  ecuación 4.4) reportados por Sequeiros et al. (2018) para la sección del canal a los 5,5 (m) y a los 11,5 (m), y que corresponden a la séptima prueba de laboratorio que también reproduce una corriente de turbidez auto-acelerante, por lo tanto, se realiza el supuesto de que dichos datos son similares a los que ocurren durante la sexta prueba de laboratorio y de la cual se reportan todos los resultados en el artículo. Para el

<sup>2</sup> Sequeiros et al. (2018) obtiene la velocidad friccional a partir del ajuste de la ley logarítmica en los perfiles de velocidad medidos en la séptima prueba experimental. De estos valores luego se estiman los esfuerzos de corte de Shields correspondientes.

caso del modelo, la velocidad friccional se obtiene directamente como uno de los resultados, y aunque no se permite la medición en el punto exacto se asume que el valor calculado es representativo:

$$\tau_* = \frac{u_*'^2}{gRd_s} \quad (4.4)$$

donde,

- $g$  es la aceleración de gravedad.
- $R$  es la densidad reducida conocida como  $\rho_s/\rho_w - 1$ .
- $d_s$  corresponde al diámetro del 90 %.

Para calcular la velocidad de sedimentación se resuelve el sistema compuesto por las ecuaciones 4.5 y 4.6 (Yen, 1992):

$$w_{sk} = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{gRd_{sk}}{C_D}} \quad (4.5)$$

$$C_D = \frac{24}{Re_p} (1 + 0,15Re_p^{1/2} + 0,017Re_p) - \frac{0,208}{1 + 10^4 Re_p^{-1/2}} \quad (4.6)$$

donde,

- $Re_p$  es el Reynolds de la partícula y se calcula como  $Re_p = w_{sk}d_{sk}/\nu$ .
- $\nu$  es la viscosidad cinemática del agua.

En el caso del  $R_{pk}$  la expresión se calcula según la ecuación 4.7.

$$R_{pk} = \frac{\sqrt{gRd_{sk}^3}}{\nu} \quad (4.7)$$

Adicionalmente, se grafica directamente el flujo de incorporación de sedimentos en suspensión ( $E_s$  ecuación 4.8) como función de la relación adimensional  $u_*'/w_s$  en conjunto con los valores experimentales de las corrientes de sedimentos estudiadas por García & Parker (1991):

$$E_s = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n E_{sk} = w_{sk} \frac{A(\lambda Z_{mk})^5}{1 + \frac{A}{0,3} (\lambda Z_{mk})^5} \quad (4.8)$$

donde,

- $A = 1,3 \times 10^{-7}$ .
- $\lambda = 1 - 0,288 \sigma_\phi$
- $\sigma_\phi$  está relacionada con la desviación estándar geométrica  $\sigma_g = 2^{\sigma_\phi}$ .

Para evaluar si los valores de las velocidades friccionales son razonables se vuelven a calcular con el método de Van Rijn que se basa en las ecuaciones 4.9 y 4.10:

$$u'_* = \left(\frac{g^{0,5}}{C'}\right) \cdot U_m \quad (4.9)$$

$$C' = 18 \cdot \log\left(\frac{12R_h}{3d_s}\right) \quad (4.10)$$

donde,

- $U_m$  es la velocidad media de la corriente de densidad.
- $R_h$  es el radio hidráulico, calculado con la altura de la columna del agua en la posición  $x$  que se está evaluando.
- $d_s$  corresponde al diámetro del 90 %.

Por último, se abre paso a la discusión de si tiene sentido o no predecir a través de la tecnología CFD el rango de pendientes que pueden influenciar en la generación de corrientes de turbidez auto-acelerantes. Las tasas de variación de caudal unitario en este caso también son calculadas con la ecuación 4.2 para las pendientes entre el 0,25 % y 5 %.



# Capítulo 5

## Resultados

### 5.1. Modelaciones

A continuación se presentan las 17 modelaciones clasificadas según la condición de borde impuesta en el Fondo. Las primeras nueve modelaciones están desarrolladas sin la condición de arrastre, mientras que desde la décima en adelante se desarrollan con la condición de arrastre.

#### 5.1.1. Sin condición de borde de arrastre impuesta en el Fondo

Las velocidades medias a lo largo del canal para las primeras nueve modelaciones se muestran en la Figura 5.1. Los perfiles de velocidad originales y en su formato adimensional se presentan en las Figuras 5.2 y 5.3, respectivamente. Los perfiles de concentración originales y adimensionales se muestran en las Figuras 5.4 y 5.5, en orden.

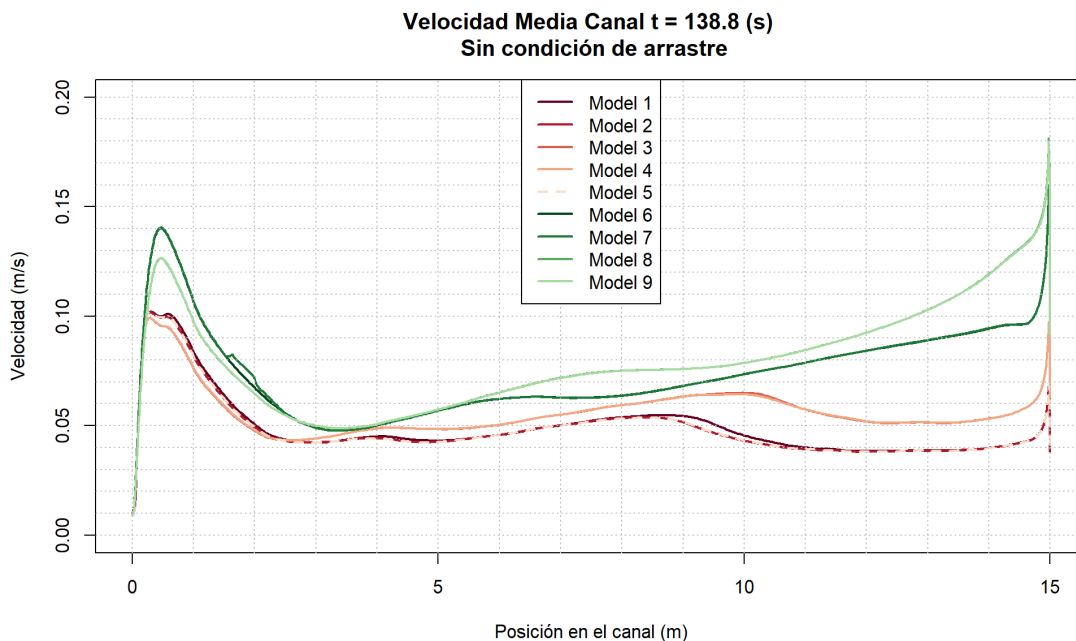


Figura 5.1: Velocidades medias a lo largo del canal para las primeras nueve modelaciones sin condición de borde de arrastre impuesta en el Fondo.

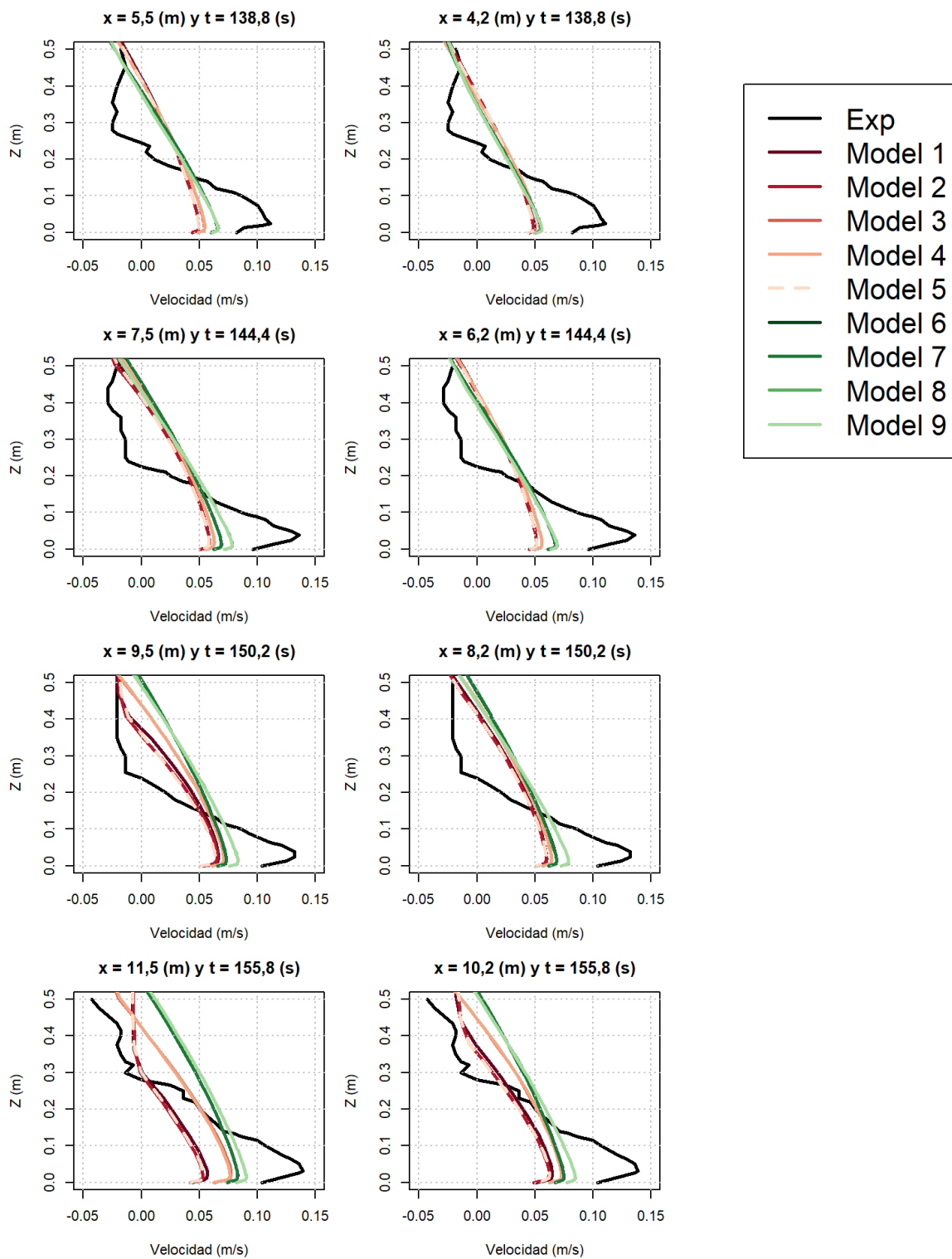


Figura 5.2: Perfiles de velocidad para las modelaciones sin condición de borde de arrastre impuesta en el Fondo comparados con los resultados de Sequeiros et al. (2018).

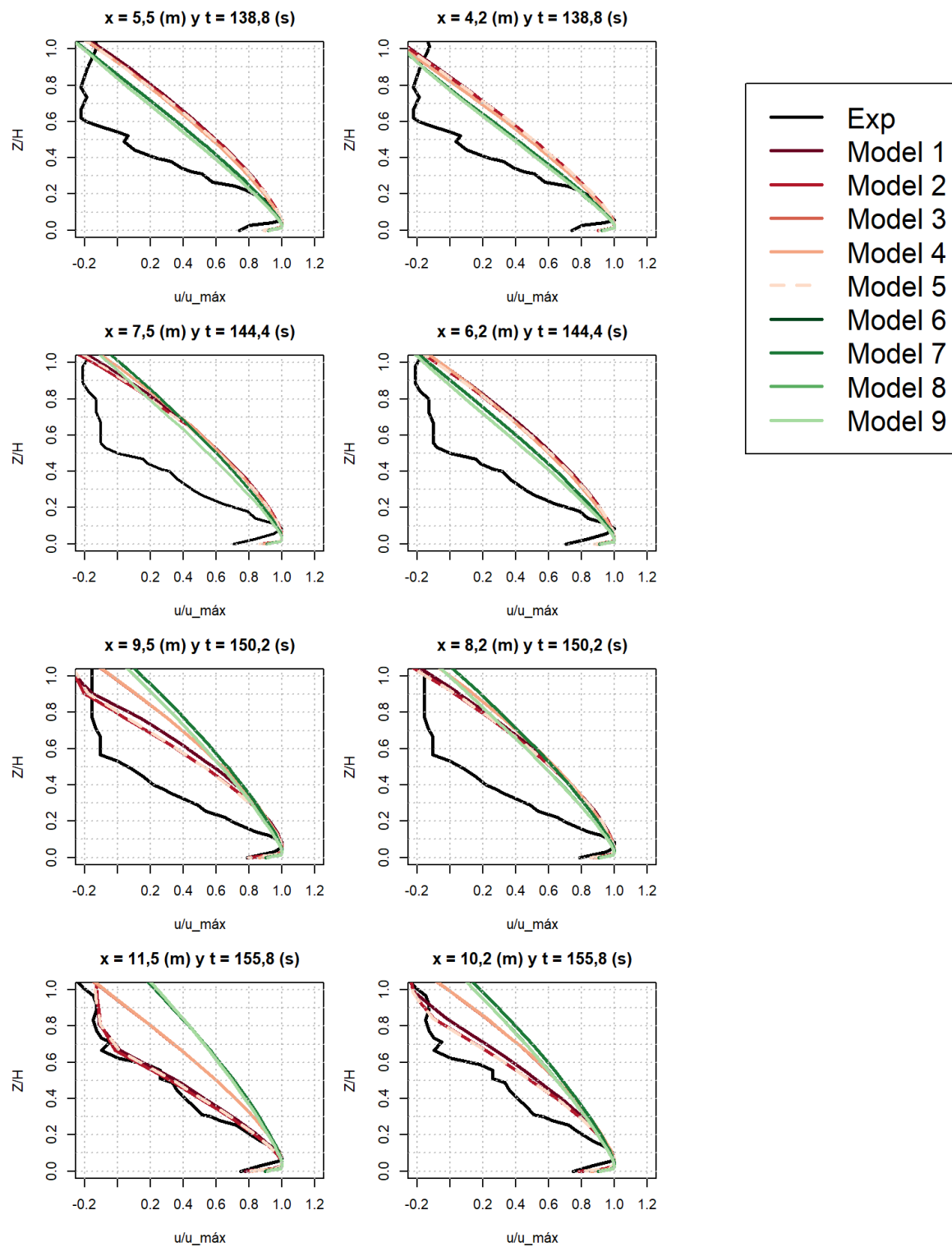


Figura 5.3: Perfiles de velocidad adimensional para las modelaciones sin condición de borde de arrastre impuesta en el Fondo comparados con los resultados de Sequeiros et al. (2018).

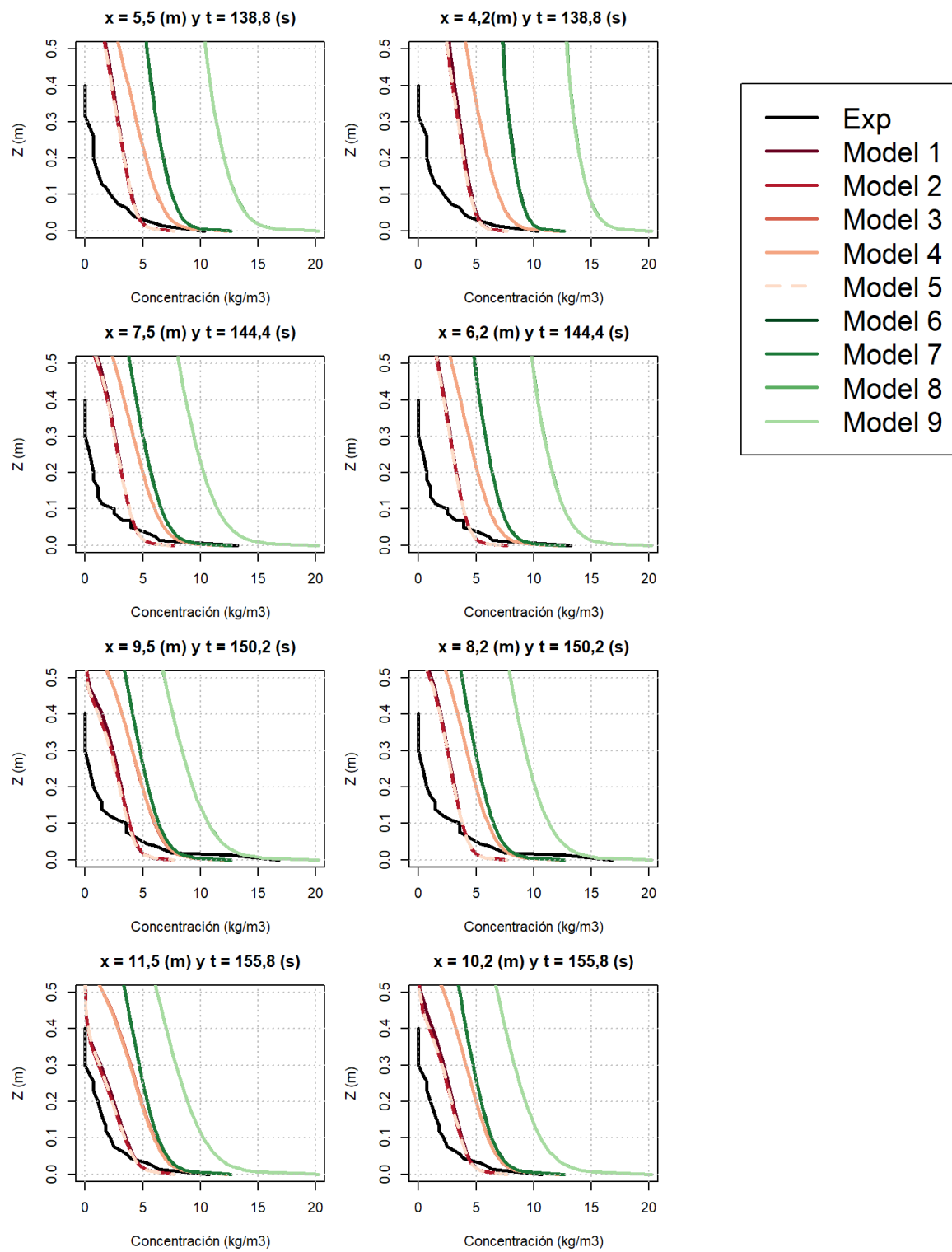


Figura 5.4: Perfiles de concentración para las modelaciones sin condición de borde de arrastre impuesta en el Fondo comparados con los resultados de Sequeiros et al. (2018).

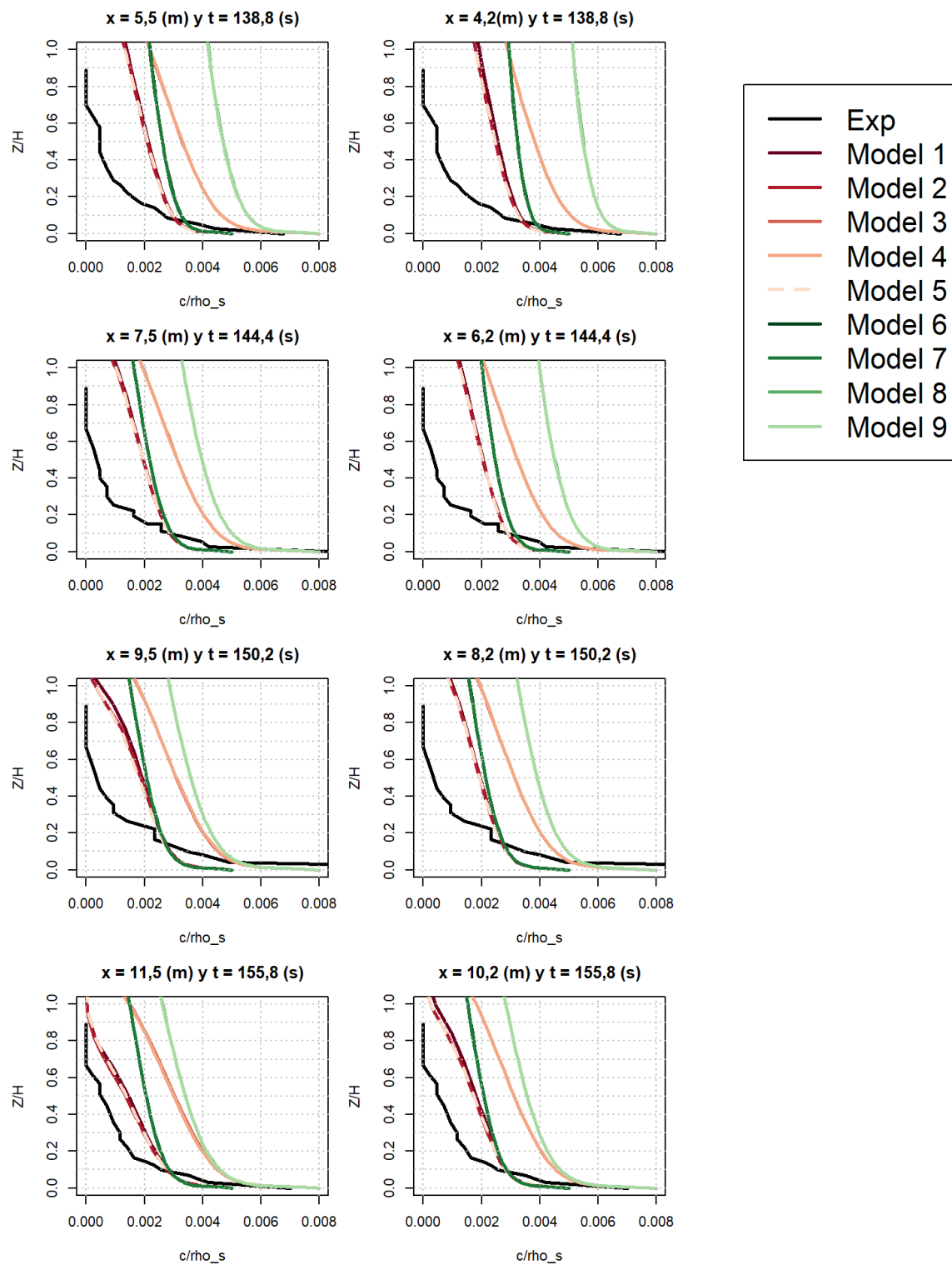


Figura 5.5: Perfiles de concentración adimensionales para las modelaciones sin condición de borde de arrastre impuesta en el Fondo comparados con los resultados de Sequeiros et al. (2018).

### 5.1.2. Con condición de borde de arrastre impuesta en el Fondo

Las velocidades medias a lo largo del canal desde la décima modelación en adelante se muestran en la Figura 5.6. Los perfiles de velocidad originales y en su formato adimensional se presentan en las Figuras 5.7 y 5.8, respectivamente. Los perfiles de concentración originales y adimensionales se muestran en las Figuras 5.9 y 5.10, en orden.

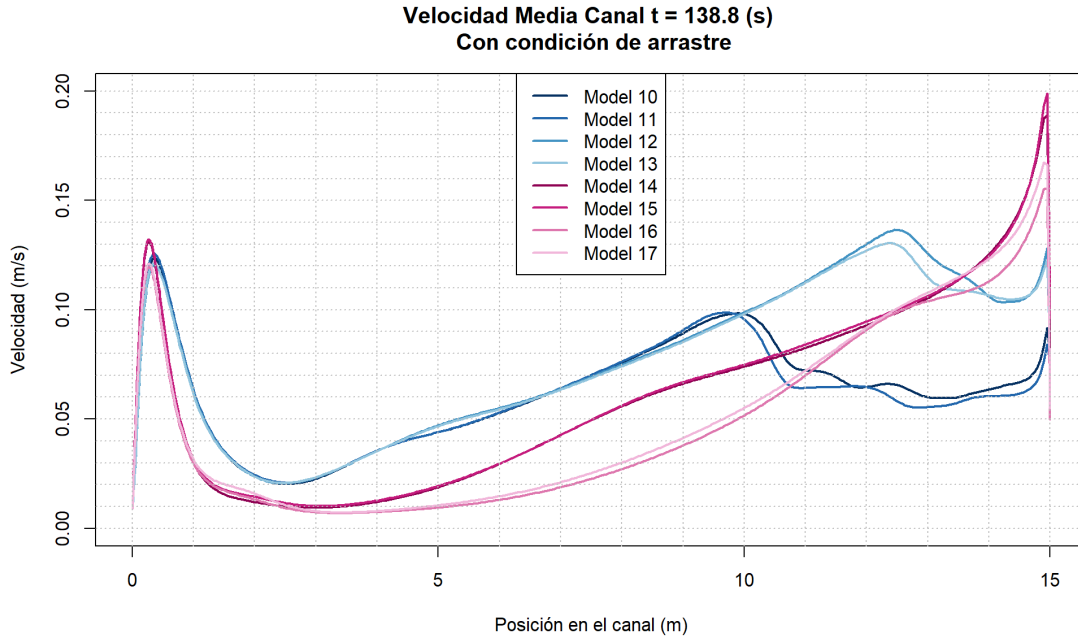


Figura 5.6: Velocidades medias a lo largo del canal desde la décima modelación en adelante con condición de borde de arrastre impuesta en el Fondo.

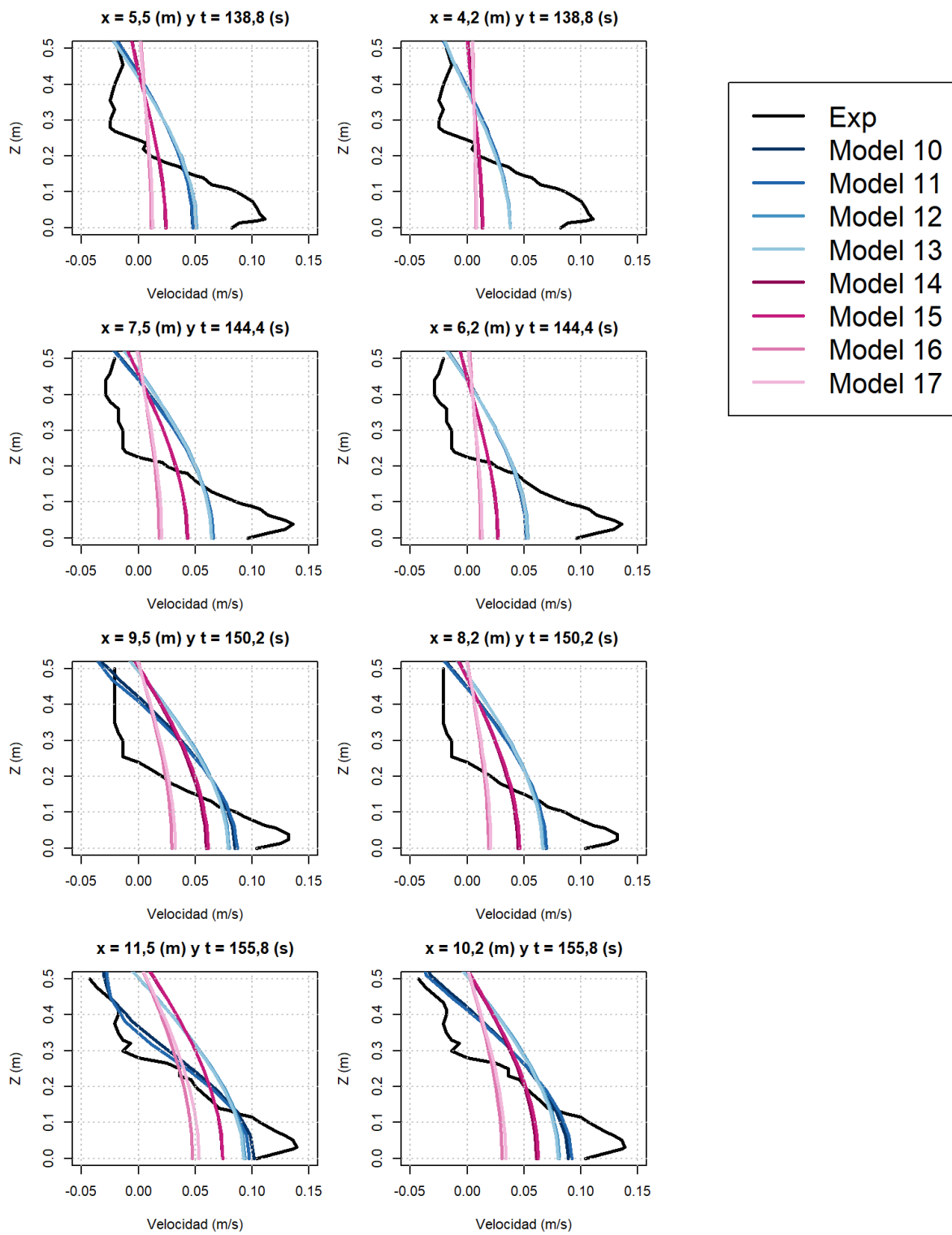


Figura 5.7: Perfiles de velocidad para las modelaciones con condición de borde de arrastre impuesta en el Fondo comparados con los resultados de Sequeiros et al. (2018).

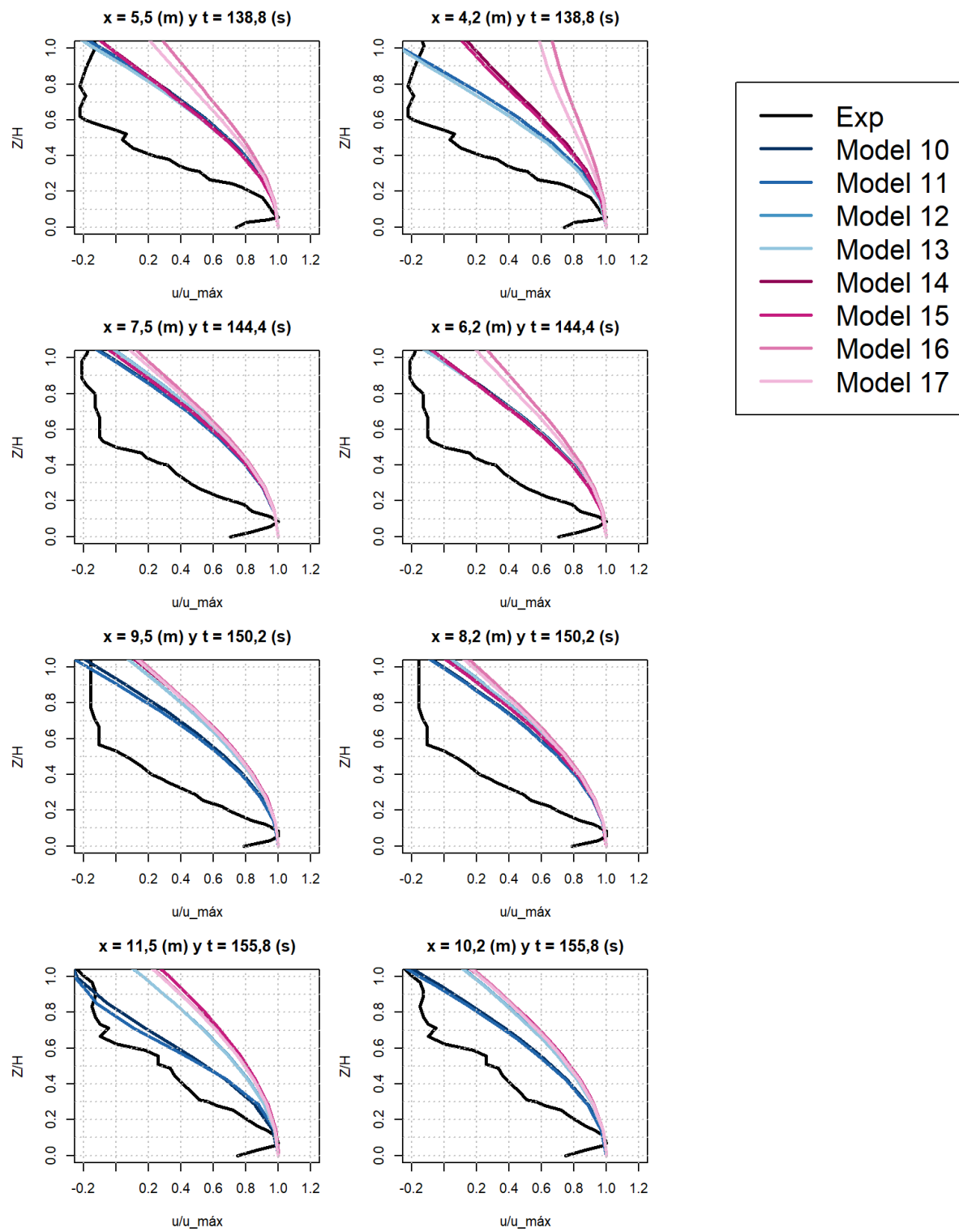


Figura 5.8: Perfiles de velocidad adimensional para las modelaciones con condición de borde de arrastre impuesta en el Fondo comparados con los resultados de Sequeiros et al. (2018).



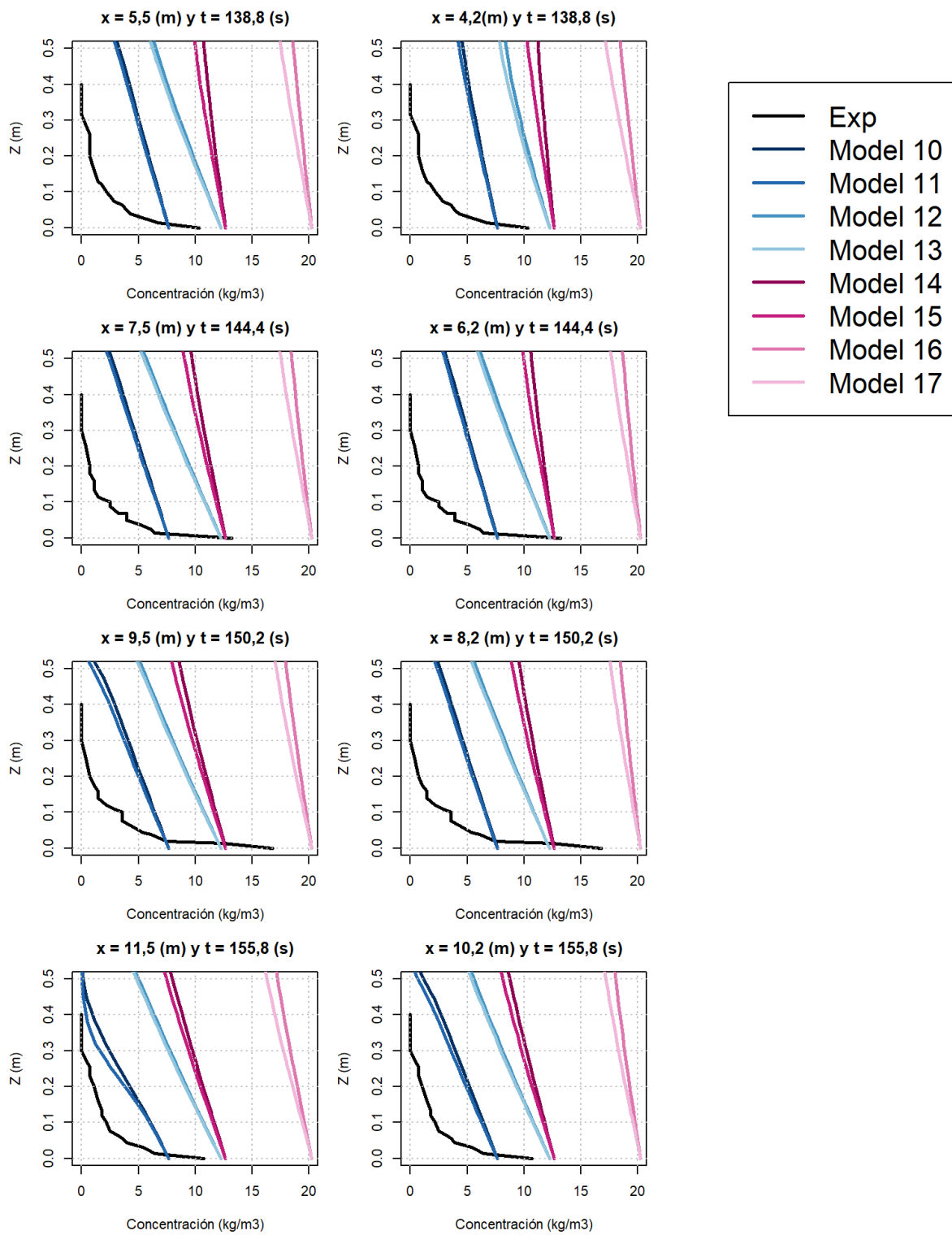


Figura 5.9: Perfiles de concentración para las modelaciones con condición de borde de arrastre impuesta en el Fondo comparados con los resultados de Sequeiros et al. (2018).

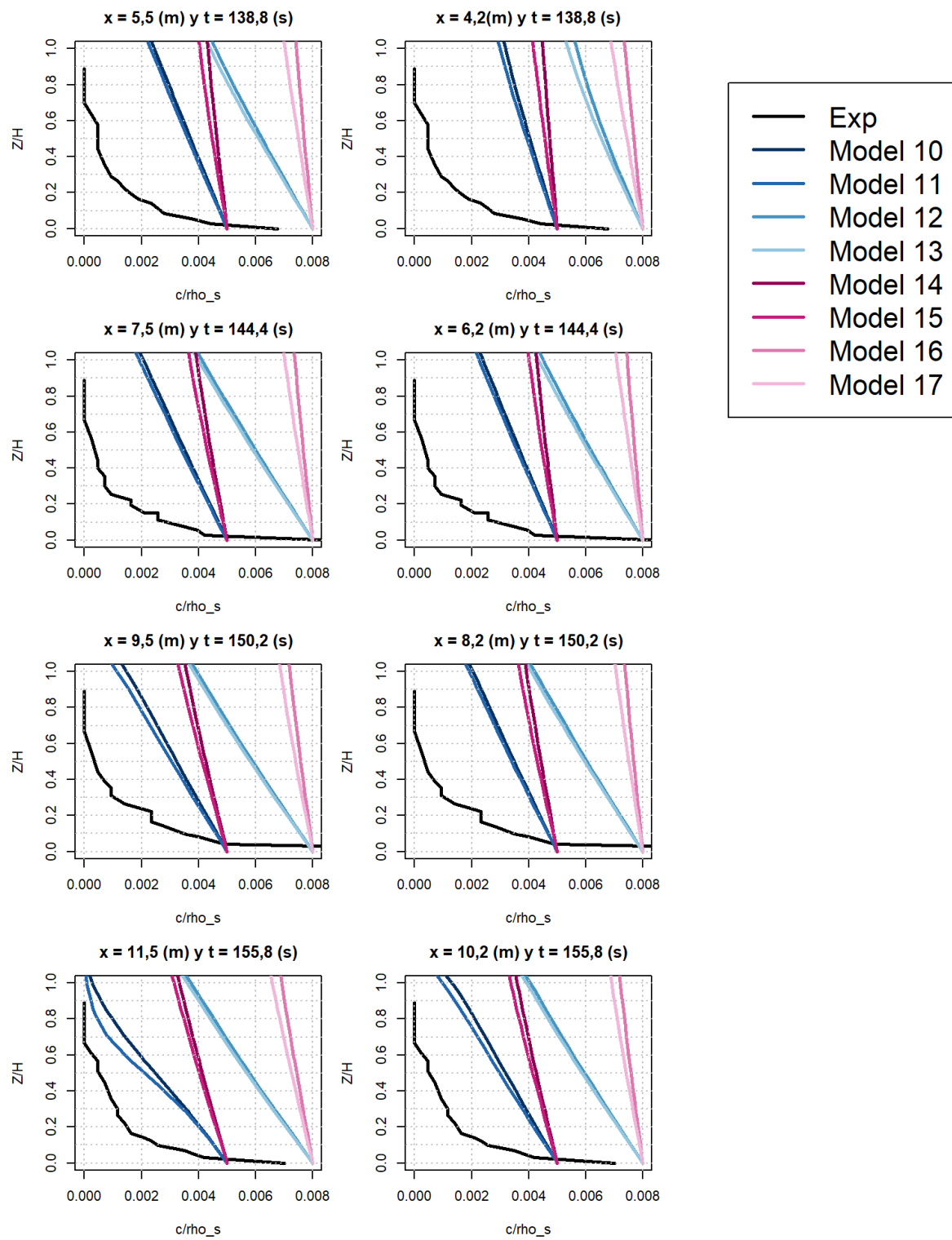


Figura 5.10: Perfiles de concentración adimensionales para las modelaciones con condición de borde de arrastre impuesta en el Fondo comparados con los resultados de Sequeiros et al. (2018).

## 5.2. Mejor modelación

De las 17 modelaciones, se observa que las velocidades y de las concentraciones no se ajustan en ningún caso a los resultados en las secciones  $x = (4,2; 5,5; 6,2; 7,5; 8,2; 9,5)$  (m). En cambio, en las secciones  $x = (10,2; 11,5)$  (m) sí se presentan mejores ajustes a los resultados en algunos casos. Debido a esta diferencia es que se calculan los RMSE para los perfiles de velocidad y perfiles de concentración solo en las últimas dos secciones mencionadas, estos índices se muestran en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: RMSE calculado para los perfiles de velocidad y de concentración en las secciones  $x = 10,2$  (m) y  $x = 11,5$  (m).

Modelación	RMSE velocidades [m/s]		RMSE concentraciones [-]	
	$x = 11,5$ (m)	$x = 10,2$ (m)	$x = 11,5$ (m)	$x = 10,2$ m
1	0,057	0,051	0,0011	0,0011
2	0,061	0,053	0,0011	0,0011
3	0,042	0,046	0,0018	0,0019
4	0,043	0,046	0,0018	0,0019
5	0,060	0,053	0,0011	0,0011
6	0,042	0,046	0,0013	0,0012
7	0,042	0,046	0,0013	0,0012
8	0,039	0,040	0,0020	0,0020
9	0,039	0,040	0,0020	0,0020
10	0,014	0,027	0,0020	0,0024
11	0,013	0,026	0,0019	0,0023
12	0,031	0,036	0,0048	0,0049
13	0,031	0,036	0,0047	0,0048
14	0,036	0,040	0,0031	0,0031
15	0,036	0,040	0,0030	0,0030
16	0,043	0,053	0,0059	0,0059
17	0,040	0,051	0,0058	0,0058

De la Tabla 5.1 se tiene que los mejores ajustes para los perfiles de velocidad se obtienen en la modelación 11, mientras que los mejores ajustes para los perfiles de concentraciones se producen en la modelación 1, 2 y 5. Sin embargo, las primeras 9 modelaciones no son una representación físicamente correcta de una corriente de densidad dado que no presentan el arrastre de sedimentos que debería ocurrir en el fondo. Debido a esto es que el mejor ajuste para los perfiles de concentración es la modelación 11 que presenta los menores RMSE dentro de las modelaciones que sí representan el arrastre de sedimentos de fondo. Por lo tanto, la modelación que presenta el mejor ajuste a los resultados en la Tabla 5.1 es la modelación 11.

Ahora es necesario calibrar el valor de las concentración de sedimentos de fondo ( $\phi_{d,f,i}$ ), para esto se escoge como base la modelación 11 y se llevan a cabo 8 modelaciones más que muestran el efecto de cambiar el parámetro ya mencionado.

En la Figura 5.11 se muestra la velocidad media a lo largo del canal para los distintos casos. Los perfiles de velocidad originales y adimensionales se muestran en las Figuras 5.12 y 5.13, respectivamente. Solo se muestran los perfiles de concentración originales en la Figura 5.14, ya que los adimensionales muestran el mismo comportamiento que los originales dado que no se diferencian en las densidades de los sedimentos.

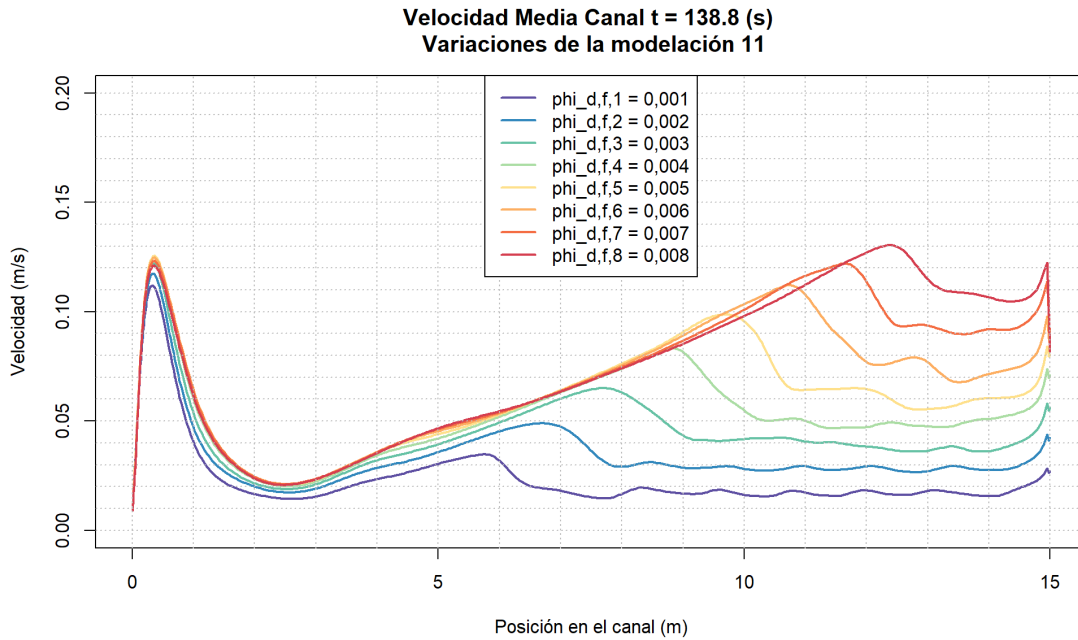


Figura 5.11: Velocidades medias a lo largo del canal para las modelaciones variando la concentración de sedimentos de fondo basadas en la modelación 10.

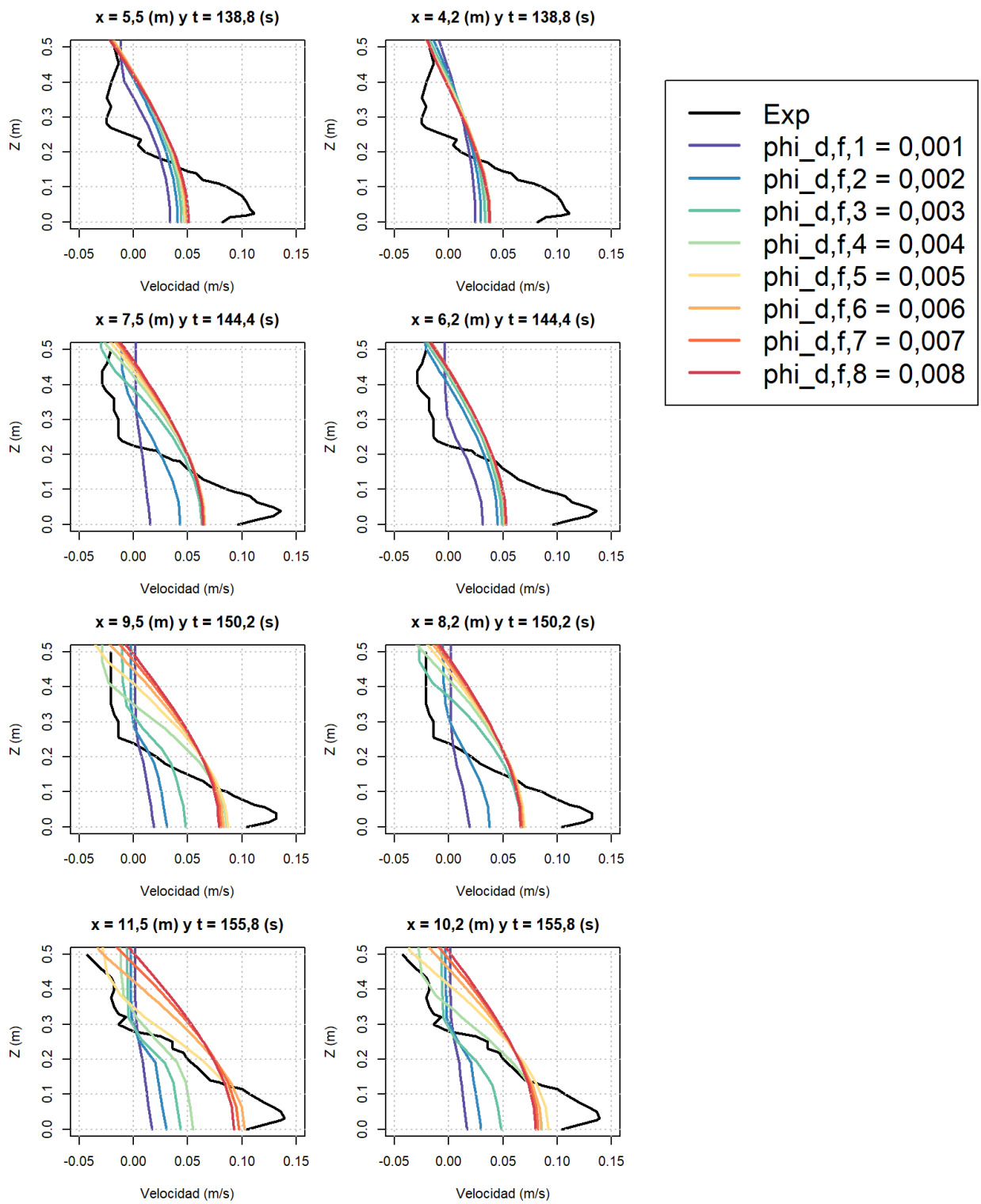


Figura 5.12: Perfiles de velocidad para las modelaciones con distintos valores de concentración de sedimentos de fondo.

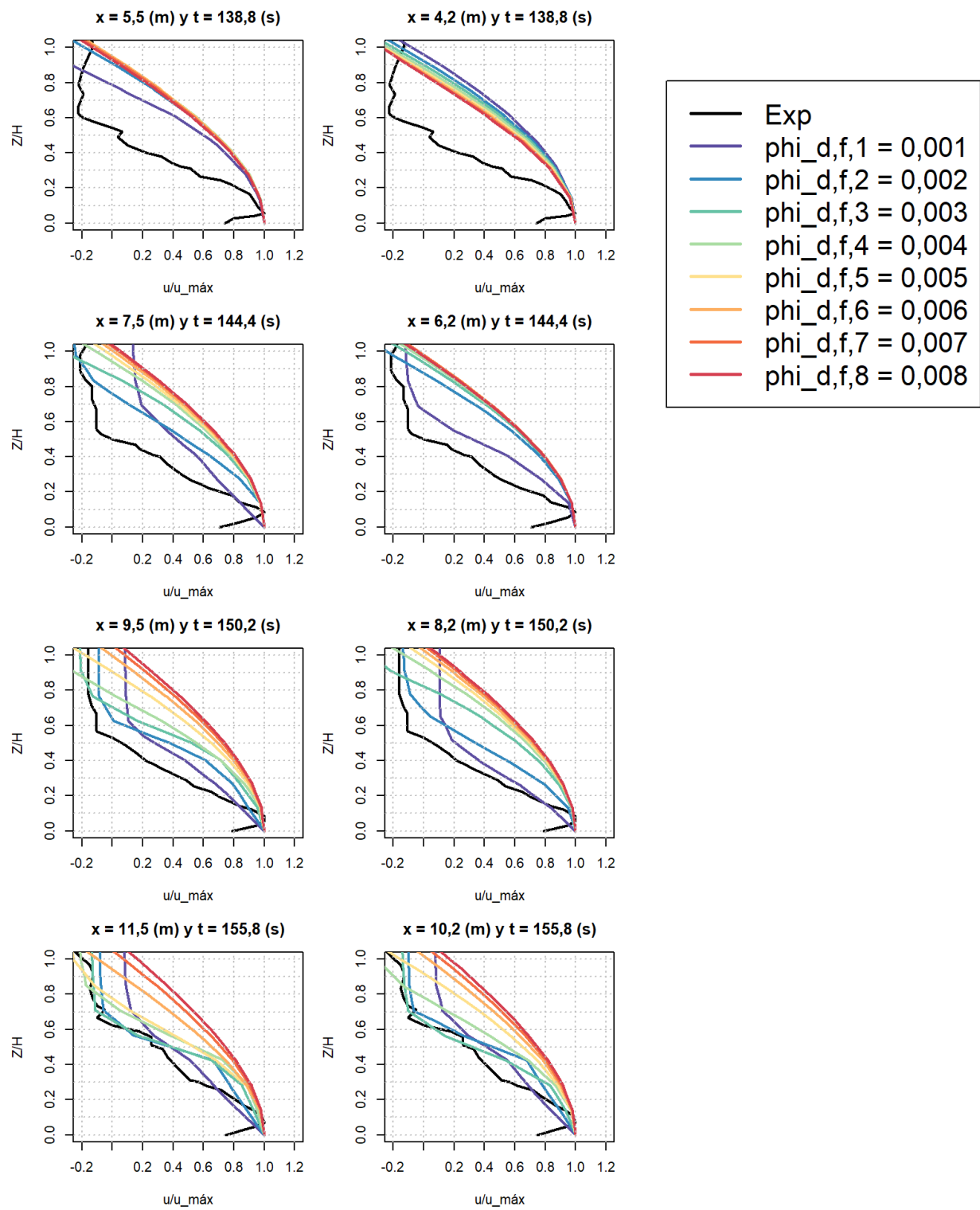


Figura 5.13: Perfiles de velocidad adimensionales para las modelaciones con distintos valores de concentración de sedimentos de fondo.

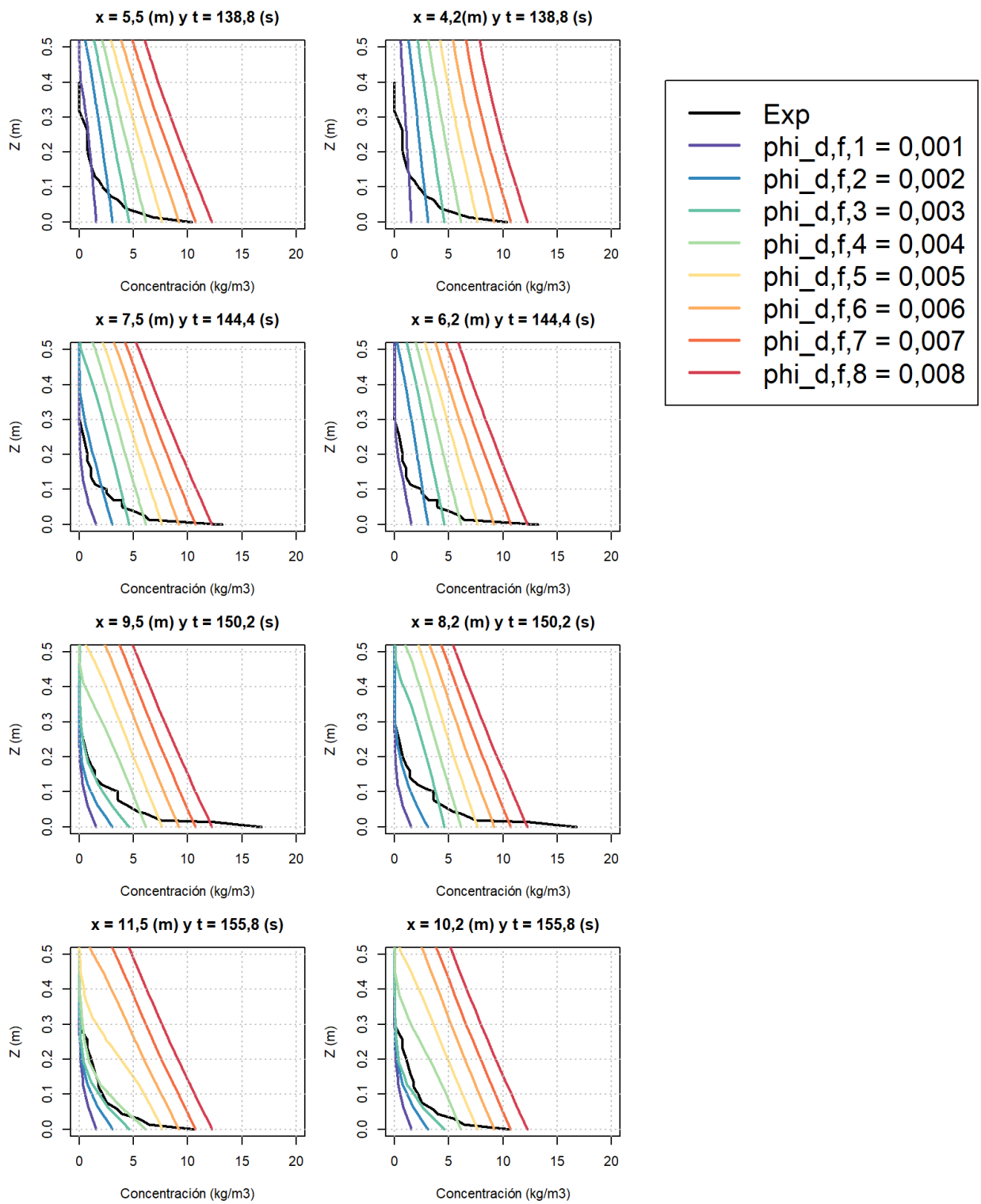


Figura 5.14: Perfiles de concentración para las modelaciones con distintos valores de concentración de sedimentos de fondo.

En la Tabla 5.2 se muestran los RMSE calculados para las 8 modelaciones anteriores. El criterio para escoger la mejor modelación es que los errores asociados a los perfiles de velocidad y de concentración disminuyeran en todos los casos respecto a los errores presentados en la modelación 11. Como se observa la modelación con  $\phi_{d,f,i} = 0,004$  disminuye sus errores en 3 de 4 casos respecto a la modelación con  $\phi_{d,f,i} = 0,005$ , que corresponde a la modelación 11, aumentando su error en el perfil de velocidad en  $x = 11,5$  (m). Por lo tanto, la modelación de mejor ajuste corresponde a la modelación 11 y los parámetros asociados se destacan en la Tabla 5.3. También se muestra en la Figura 5.15 la evolución del campo de velocidades en el canal con la modelación 11.

Tabla 5.2: RMSE calculado para los perfiles de velocidad y de concentración en las secciones  $x = 10,2$  (m) y  $x = 11,5$  (m) cuando las modelaciones cambian el valor de la concentración de sedimentos de fondo ( $\phi_{d,f,i}$ ).

Valor de $\phi_{d,f,i}$	RMSE velocidades [m/s]		RMSE concentraciones [-]	
	$x = 11,5$ (m)	$x = 10,2$ (m)	$x = 11,5$ (m)	$x = 10,2$ m
<b>0,001</b>	0,064	0,063	0,0026	0,0028
<b>0,002</b>	0,054	0,054	0,0021	0,0023
<b>0,003</b>	0,045	0,042	0,0016	0,0017
<b>0,004</b>	0,035	0,020	0,0012	0,0017
<b>0,005</b>	0,013	0,026	0,0019	0,0023
<b>0,006</b>	0,022	0,031	0,0028	0,0031
<b>0,007</b>	0,028	0,034	0,0038	0,0039
<b>0,008</b>	0,031	0,036	0,0047	0,0048

Tabla 5.3: Parámetros de la modelación 11, que presenta el mejor ajuste a los resultados de Sequeiros et al. (2018).

Parámetro	Valor
$J_0$ (m/s)	0,0089
$Q$ (L/s)	1,8
$\phi_{d,0}$ (%)	2
$\phi_{d,f,i}$ (-)	0,005
$d_s$ ( $\mu m$ )	77
$\rho_{s,k}$ ( $kg/m^3$ )	1530



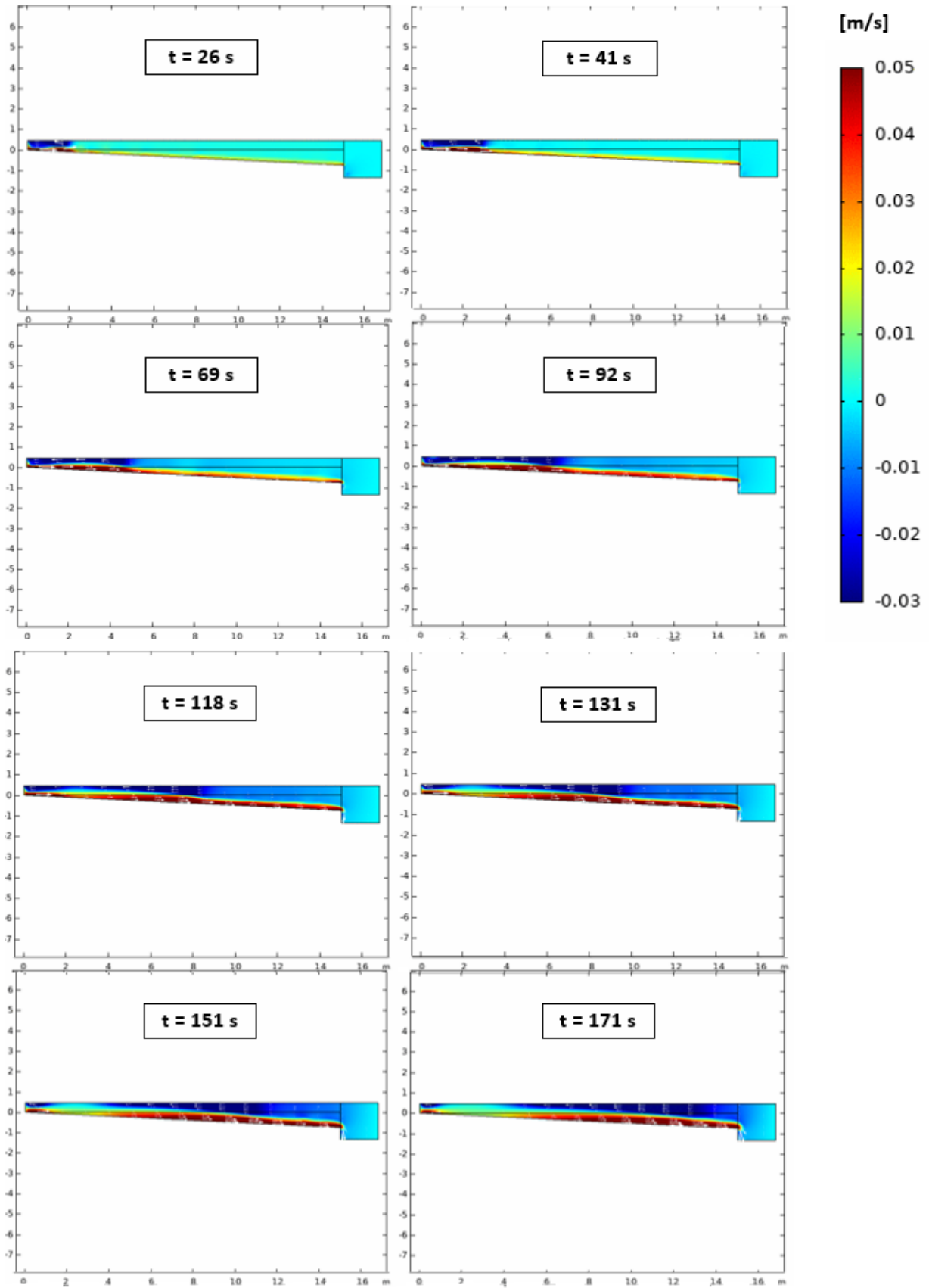


Figura 5.15: Ocho capturas consecutivas de la animación del campo de velocidades dentro del canal generada por la mejor modelación obtenida.

### 5.3. Tasa de variación del caudal unitario

Sequeiros et al. (2018) reportan tasas de variación de caudal unitario refiriéndose a ellas como "aceleraciones", estos resultados son registrados en dos secciones del canal como se presenta en la Tabla 5.4, mientras que las tasas de variación de caudal unitario calculadas para el modelo con el mejor ajuste se muestran en la Tabla 5.5.

Tabla 5.4: Aceleraciones reportadas para la sexta prueba experimental por Sequeiros et al. (2018). Valores en verde destacan las tasas de variación del caudal unitario positivas.

<b>Tiempo (s)</b>	139	150
<b>x (m)</b>	5,5	9,5
<b>dUh/dt (<math>cm^2/s^2</math>)</b>	2,69	3,95

Tabla 5.5: Aceleraciones calculadas a lo largo del canal para la modelación del mejor ajuste.

<b>tiempo (s)</b>	139		150		156		162
<b>x (m)</b>	4,2	5,5	8,2	9,5	10,2	11,5	13,5
<b>dUh/dt (<math>cm^2/s^2</math>)</b>	-1,11	-0,99	-1,21	-1,56	-1,09	7,01	3,13

# Capítulo 6

## Discusión

### 6.1. Comparación Experimento - Modelaciones

Comenzando por los gráficos de las velocidades medias a lo largo del canal presentados en la sección de resultados, podemos destacar tres categorías de comportamientos que llaman la atención como se muestra en la Figura 6.1.

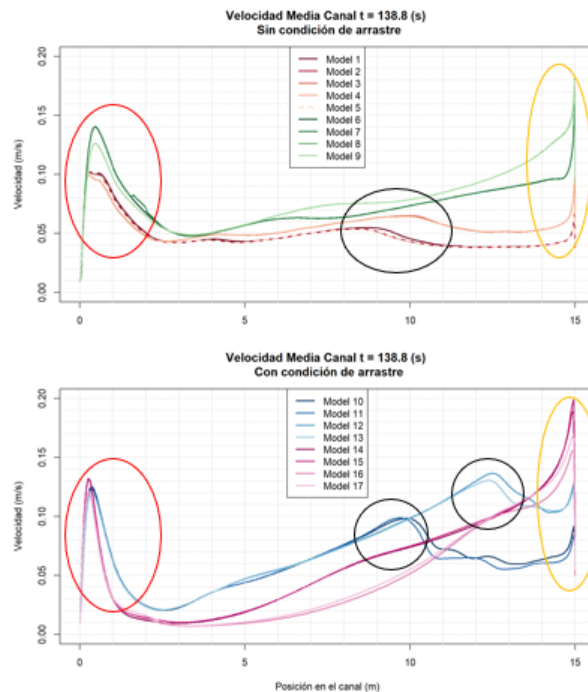


Figura 6.1: Gráficos de velocidad media en los que se destaca: en rojo un inusual aumento de velocidades al inicio del canal, en negro máximos de velocidad locales y en amarillo un aumento drástico en las velocidades al final del canal.

Al inicio del canal destacado en rojo, se identifica un comportamiento anormal de las velocidades, que se repite en todas las modelaciones realizadas en este trabajo. Se desconoce la causa de este comportamiento, pero por los resultados obtenidos probablemente no afecte directamente a las velocidades y concentraciones en las secciones del canal que interesan. Los máximos locales destacados en negro puede que representen el punto en que las fuerzas

friccionales comienzan a ganar importancia frente a las fuerzas inerciales lo que se traduce en una disminución de las velocidades. Estos máximos locales se evidencian en las modelaciones de colores azules y rojo, que usan una densidad de sedimentos igual a  $1.530 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ , mientras que las modelaciones verdes y fucsias no alcanzan a demostrar este fenómeno debido a que ocupan una densidad de sedimentos igual a  $2.530 \text{ (kg/m}^3\text{)}$  lo cual aumenta la magnitud de las fuerzas inerciales en la corriente. Finalmente, los aumentos de velocidad al final del canal destacados en amarillo puede que estén asociados con la caída brusca ubicada justo a los 15 (m) del canal.

Al comparar los perfiles de velocidad y de concentración de todas las modelaciones con los resultados presentados por Sequeiros et al. (2018) se destaca lo siguiente:

- Las modelaciones realizadas sin la condición de borde de arrastre impuesta en el Fondo presentan una configuración de perfiles de velocidad y concentración muy similar a los resultados del experimento. Sin embargo, en el caso de los perfiles de velocidad no se logran alcanzar velocidades cercanas a lo que reporta Sequeiros et al. (2018), a pesar de todas las combinaciones de variables utilizadas, por lo tanto se consideran resultados insatisfactorios. Por otro lado, los perfiles de velocidad adimensionales muestran un comportamiento coherente para el caso de las modelaciones 1,2,3 y 5 en la sección  $x = 11,5$  (m) del canal.
- La modelación 11, realizada con la condición de borde de arrastre impuesta en el Fondo, logra velocidades más cercanas a los resultados del experimento tanto en el metro 10,2 del canal como en el 11,5, presentando los RMSE más bajos de todos. Y por lo menos también existe coherencia de comportamiento en los perfiles de velocidad adimensionales para el metro 11,5 del canal. Sin embargo, los perfiles de concentración distan bastante de lo que se espera que pase teóricamente e incluso experimentalmente. Es decir, los perfiles de concentración deberían presentar una curvatura como ocurre en las primeras nueve modelaciones y cuando los diámetros de los sedimentos o la densidad aumenten las curvas deberían apegarse más al eje  $x$  pues el peso de los sedimentos no permitiría un aumento en la carga suspendida, pero evidentemente esto no se ve reflejado en los gráficos.
- Otro punto a favor de la modelación 11, considerada el mejor ajuste con los resultados de Sequeiros et al. (2018), es que al establecer como condición de borde que exista arrastre de sedimentos de fondo se está siendo coherente con lo que ocurre en teoría con las corrientes de sedimentos auto-acelerantes, esto es, que se permite la resuspensión de sedimentos de fondo dentro de la corriente lo que contribuiría a la auto-aceleración.
- Debido a que el experimento no reporta ninguna medición de la concentración de sedimentos de fondo en el canal, esta variable solo puede ser calibrada para generar un mejor ajuste. Con ello se obtiene que el valor óptimo corresponde a  $\phi_{d,f,i} = 0,005$ . Apesar de que esto parece un valor razonable, no hay forma de validarlo.
- La modelación 11 con la concentración de sedimentos de fondo,  $\phi_{d,f,i}$ , igual a 0,005 presenta los mejores resultados en los perfiles de velocidad a los 10,2 (m) y 11,5 (m) del canal. Lo anterior no es sólo porque se alcanzan velocidades más similares a lo que se reporta en el experimento, sino también porque coinciden bien en el punto en que las velocidades se hacen cero y, en teoría, marcan mejor la separación entre la corriente

de sedimentos y el flujo del agua que adquiere velocidades negativas. En cuanto a los perfiles de concentración, la modelación escogida genera resultados discrepantes con los reportados por el experimento, pero al menos no poseen los errores más grandes. En conclusión los resultados de esta modelación no son suficientes para hablar de validación.

- Llama la atención que en aquellas modelaciones donde el RMSE es menor para los perfiles de concentración, los perfiles de velocidad presentan los mayores errores y no es posible encontrar una modelación que presente los menores errores simultáneamente en perfiles de velocidad y concentración.
- A pesar de haber intentado incluir el efecto del punto de inmersión de la mezcla en los resultados del modelo, no se detectan fácilmente resultados favorecidos por ello. Lo anterior se justifica debido a que para hablar de que la distancia a la que ocurre el punto de inmersión marca una diferencia notoria en los resultados los errores asociados a la sección  $x = 10,2$  (m) deberían ser consistentemente menores a los de la sección  $x = 11,5$  (m) y esto no ocurre en todos los casos, menos en la modelación 11.
- Al comparar las tasas de variación del caudal unitario de Sequeiros et al. (2018) directamente con la posición que corresponde en el modelo, los valores no se parecen en nada a los datos reportados en el experimento. A pesar de ello, gracias al cálculo de otras tasas a lo largo del canal en el modelo se infiere que la corriente de sedimentos avanza más rápido en la simulación que en el experimento y presenta tasas de variación del mismo orden que las reportadas por Sequeiros et al. (2018), pero en secciones más adelante en el canal e incluso casi dobla sus valores.

Razonablemente, después de las reflexiones anteriores, nace el cuestionamiento de si es posible asegurar que los resultados obtenidos son realmente coherentes con los estudios que existen sobre las de corrientes de densidad. Para ello se trabaja tanto con los datos del experimento como con los del modelo escogido para conocer el gasto sólido en suspensión que presentan y luego se calcula el flujo de incorporación de sedimento en suspensión con el objetivo de comparar los resultados y la información que existe del comportamiento normal de las corrientes de sedimentos.

La Figura 6.2<sup>1</sup> muestra dónde se ubican los resultados de Sequeiros et al. (2018) en cuanto a su concentración de sólidos suspendidos respecto de la concentración de sedimentos suspendidos del modelo de Rouse. De acuerdo a esto, la relación entre la velocidad friccional y la velocidad de sedimentación debería estar entre 0,3 y 0,5. Sin embargo, cuando se calcula la relación  $ws/u^{*2}$  para el experimento este valor es 0,1, lo que evidencia una discrepancia con el gráfico.

Si comparamos ahora los resultados del modelo en las últimas secciones del canal ( $x = 10,2$  m y  $x = 11,5$  m) con los resultados correspondientes del experimento y las concentraciones de sedimentos suspendidos del modelo de Rouse se obtiene la Figura 6.3. Con esto se evidencia que el gasto sólido en suspensión simulado en las secciones  $x = 10,2$  (m) y  $x = 11,5$  (m) son

<sup>1</sup> Notar que en el gráfico la Sección 1 hace referencia a la posición  $x = 5,5$  (m) en el canal, la Sección 2 es la posición en  $x = 7,5$  (m), la Sección 3 es la posición  $x = 9,5$  (m) y la Sección 4 es la posición  $x = 11,5$  (m).

<sup>2</sup> El valor de la velocidad de sedimentación,  $ws$ , es de 2 (mm/s).

diferentes a lo reportado en el experimento. Sin embargo, la relación  $ws/u^*$  es 0,1, igual que para el experimento, y es coherente con el gráfico.

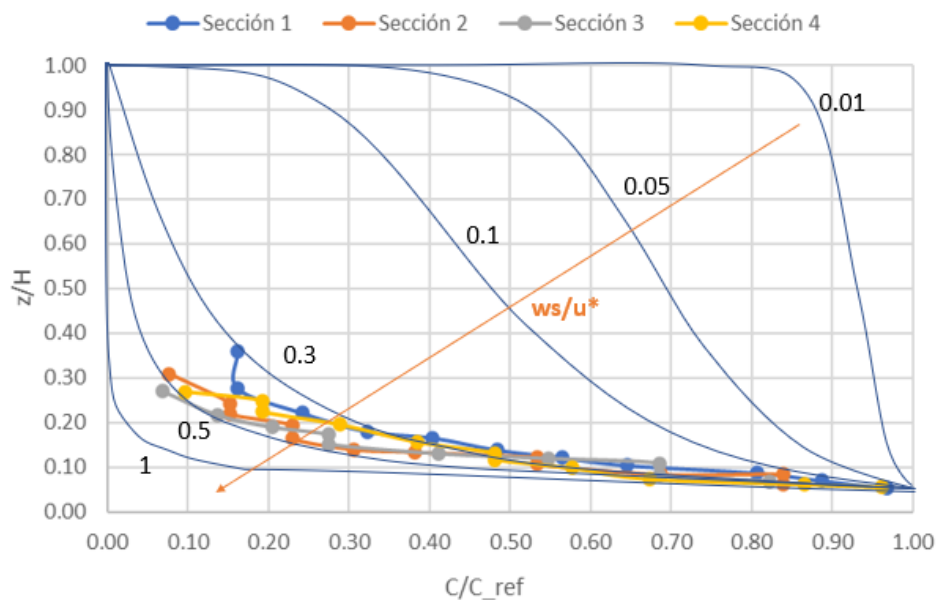


Figura 6.2: Concentración de sedimentos en suspensión sobre la concentración de referencia como función de  $z/H$  con el modelo de Rouse para los datos reportados en cada sección del canal de Sequeiros et al. (2018).

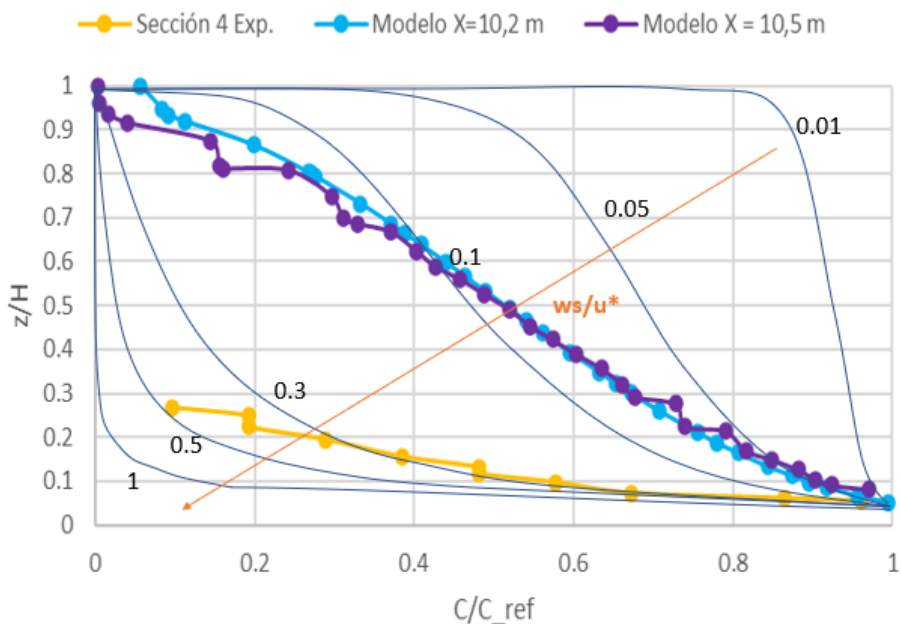


Figura 6.3: Concentración de sedimentos en suspensión sobre la concentración de referencia como función de  $z/H$  con el modelo de Rouse para los datos reportados en la última sección del canal de Sequeiros et al. (2018) y los resultados de las últimas secciones en el modelo.

Ahora bien, para comparar tanto el modelo como los resultados experimentales con respecto al comportamiento común de las corrientes de densidad en la literatura se obtienen las Figuras 6.4 y 6.5.

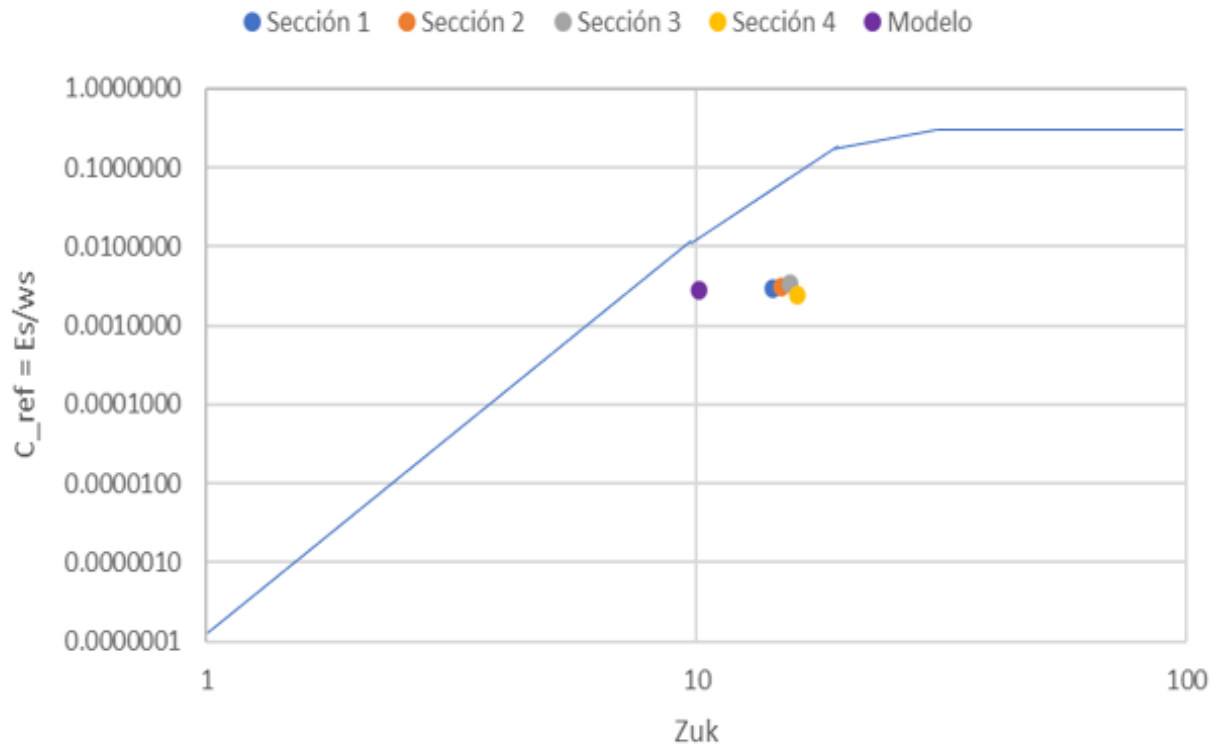


Figura 6.4: El flujo de incorporación partido por la velocidad de sedimentación ( $C_{ref}$ ) como función del adimensional  $Z_{uk}$ . La línea azul indica el comportamiento normal de las corrientes de sedimentos según el modelo de García & Parker. Los puntos desde la sección 1 a la 4 corresponden al experimento de Sequieros et al. (2018), y el punto morado corresponde a la modelación 11.

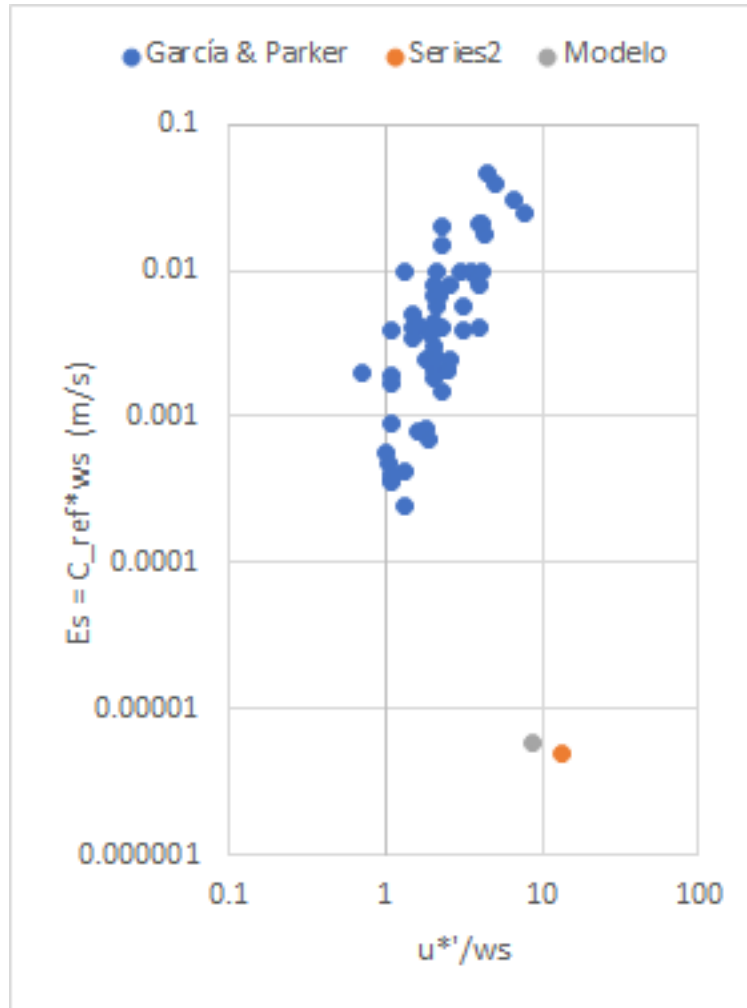


Figura 6.5: El flujo de incorporación ( $E_s$ ) como función de la relación adimensional de la velocidad friccional partida por la velocidad de sedimentación ( $u'_*/w_s$ ). Los puntos azules son las mediciones de varias corrientes de densidad reunidas por García & Parker (1991). Los puntos color gris y naranja son los determinados por el modelo y el experimento de Sequeiros et al. (2018), respectivamente.

De los gráficos anteriores es posible inferir que el modelo y el experimento son comparables a través de la relación  $u'_*/w_s$ . Sin embargo, existe una discrepancia entre el valor de esta relación y los resultados de Sequeiros et al. (2018) en la Figura 6.2, que puede ser explicada por la incertidumbre de los valores de la velocidad friccional ( $u'_*$ ) que permite la construcción de los gráficos. Para constatar ello, basta comparar estos valores con los que predice el método de Van Rijn (1984) (Tabla 6.1), que ha demostrado ser una técnica con buenas métricas (García & Parker, 1991). Se evidencia un orden de diferencia entre los  $u'_*$  utilizados para graficar las métricas del modelo y el experimento respecto a los calculados con el método de Van Rijn (1984). Lo cual se traduce en la existencia de un problema para las velocidades friccionales calculadas por el modelo y para el experimento.



Tabla 6.1: Comparación de los valores de velocidad friccional utilizadas para el modelo y el experimento con los valores predichos según el método de Van Rijn.

Variable (m/s)	Sección 4 x = 11,5 (m)	
	Modelo	Experimento
$u'_*$ utilizado	0,018	0,028
$u'_*$ según Van Rijn	0,003	0,004

Por último, una discusión propuesta para trabajar en el futuro consiste en que si se pudieran mejorar los resultados del modelo sería posible estimar en qué rango de pendientes pueden generarse corrientes de turbidez auto-acelerantes. En la Tabla 6.2 se presentan las pruebas realizadas con el modelo para distintas pendientes del canal y lo que se obtiene es la generación de corrientes de turbidez auto-acelerantes entre una pendiente del 0,5 y 5 %. La clasificación del tipo de corriente se condice con la utilizada por Sequeiros et al. (2018) que determina que si hay una corriente con una aceleración del orden de  $0,1 \text{ (cm}^2/\text{s}^2)$  no se considera suficiente para ser 'auto-acelerante' y se denomina 'by-pass'.

Tabla 6.2: Aceleraciones calculadas a lo largo del canal para la modelación del mejor ajuste de la Tabla 5.3, pero ahora cambiando la pendiente del canal.

tiempo (s)	139		150		156		Pendientes	Tipo de Corriente
x (m)	4.2	5.5	8.2	9.5	10.2	11.5		
$dU_h/dt$ [ $\text{cm}^2/\text{s}^2$ ]	-1.11	-0.99	-1.21	-1.56	-1.09	7.01	5 %	acelerante
	-1.09	-0.84	-0.82	0.18	2.43	3.63	4 %	acelerante
	-1.00	-0.73	-0.39	5.16	4.15	0.69	3 %	acelerante
	-0.84	-0.57	2.25	0.83	0.34	0.27	2 %	acelerante
	-0.75	-0.35	2.93	0.16	0.07	0.01	1 %	acelerante
	-0.52	-0.41	2.73	-0.33	0.01	0.03	0.50 %	acelerante
	-0.51	-0.68	0.84	0.08	-0.05	-0.06	0.25 %	by-pass

## 6.2. Conclusiones

Las principales conclusiones de este trabajo son:

- Se verifica la hipótesis planteada inicialmente: Es posible modelar una corriente de turbidez auto-acelerante utilizando el software COMSOL Multiphysics. Sin embargo, los resultados de las modelaciones no logran ajustarse adecuadamente a todos los resultados experimentales de Sequeiros et al. (2018), lo que evidencia una necesidad importante de mejorar las técnicas de modelación utilizadas en este trabajo.
- Los objetivos propuestos se cumplen exitosamente, es decir, es posible utilizar el software de modelación, modelar las condiciones del experimento y analizar los resultados evaluando la posibilidad de utilizar el modelo para estimar el rango de pendientes en las que puede ocurrir una corriente de turbidez auto-acelerante. Sin embargo, no es posible validar los resultados del modelo dado que no fue posible lograr un ajuste a todos los resultados presentados por Sequeiros et al. (2018).

Hay que destacar que los resultados de este trabajo tienen incertidumbre debido a que para validar los resultados del modelo se trabaja con resultados experimentales que inevitablemente incluyen errores asociados a la mediciones y a la experiencia de laboratorio. Además, los aspectos de la modelaciones desarrolladas en este trabajo pueden ser drásticamente mejorados, por ejemplo, mejorando la representación de las condiciones de borde, entendiendo como se simula el punto de inmersión y si es una inyección continua o discreta, o quizá mejorando la representación de la muestra de sedimentos en el modelo para modificar los perfiles de concentración, o bien, calculando de otra forma las velocidades friccionales del modelo. Por lo tanto, con el objetivo de instar a futuras investigaciones, lo expuesto en este documento es perfeccionable y corresponde a una de las primeras modelaciones de corrientes de turbidez auto-acelerantes en el software COMSOL Multiphysics.

Un beneficio que resalta de haber obtenido estos resultados es que se abren oportunidades para modelar corrientes de turbidez y predecir su comportamiento hasta cierto punto. Los objetivos de la modelación pueden ser, por ejemplo, decidir qué pendiente es segura para evitar la aceleración de estas corrientes, decidir cuál es el mejor plan de manejo de las corrientes de sedimentos dentro de los embalses para evitar acumulación excesiva de sedimentos dentro de estos o investigar cómo influye el tamaño de los sedimentos en la generación de éstas, entre muchas otras opciones.

Finalmente, uno de los principales desafíos presentados en este tipo de modelación corresponde a la comprensión de la generación de los perfiles de concentración en el software utilizado, ya que los resultados distan bastante de lo esperado a nivel teórico e intuitivo al predecir mayores cantidades de sedimentos suspendido que los que realmente se observan. Se espera que este tema en particular pueda ser abordado en próximas oportunidades.

# Bibliografía

- Alves, E., González, J., Freire, P., & Cardoso, H. (2008). Experimental study of plunging turbidity currents in reservoirs. In *River flow 2008: proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics* (pp. 1157-1164), Çeşme, Izmir, Turkey.
- Akiyama, J., and Stefan, H., 1984, Plunging flow into a reservoir: Theory: *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 110(4), 484-499.
- Azpiroz-Zabala, M., Cartigny, M. J., Talling, P. J., Parsons, D. R., Sumner, E. J., Clare, M. A., ... & Pope, E. L. (2017). Newly recognized turbidity current structure can explain prolonged flushing of submarine canyons. *Science advances*, 3(10), e1700200.
- Balbontín, J. (2013). Modelo de sedimentación en el embalse rapel: Delta y Corriente de turbidez. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Bell, H. S. (1942) Studies for Students: Density Currents as Agents for Transporting Sediments. *The Journal of Geology*, 50(5), 512-547.
- Chamoun, S., De Cesare, G., & Schleiss, A. J. (2016). Managing reservoir sedimentation by venting turbidity currents: A review. *International Journal of Sediment Research*, 31(3), 195-204.
- Choi, S. U., & García, M. H. (2002).  $\kappa - \varepsilon$  turbulence modeling of density currents developing two dimensionally on a slope. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(1), 55-63.
- COMSOL. (1998-2018). CFD Module, User's Guide (Version 5.4).
- De Cesare, G. D., Schleiss, A., Hermann, F. (2001). Impact of turbidity currents on reservoir sedimentation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(1), 6-16.
- Farrell, G. J., and Stefan, H., (1986). Mathematical modeling of plunging reservoir flows: *Journal of Hydraulic Research*, 26(5), 525-537.
- Garcia, M., & Parker, G. (1991). Entrainment of bed sediment into suspension. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(4), 414-435.
- García, M. H. (1993). Hydraulic jumps in sediment-driven bottom currents. *Journal of Hydraulic Engineering*, 119(10), 1094-1117.
- Ghomeshi, M., Zayrie, M. R., & Hasounizadeh, H (2013). Analysis of turbidity currents measured in Dez Reservoir. *Ecology, Enviroment & Conservation Journal*, 19(1), 223-229.
- Gladstone, C., Phillips, J.C. & Sparks, R.S.J. (1998). Experiments on bi-disperse, constant-volume gravity currents: Propagation and sediment deposition. *Sedimentology* 45(5),

- González, J. 2006. Sedimentación en embalses considerando el efecto de corrientes de turbidez: desarrollo e implementación de un modelo matemático y numérico. Tesis de Magister en Ciencias de la Ingeniería. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- González, J., Tamburrino, A. & Niño, Y., (2008) A discussion on the role of particle settling velocity on equations governing turbidity currents. International Conference on Fluvial Hydraulics 2008 (River Flow 2008), Izmir-Cesme, Turkey.
- Hsu, S. K., Kuo, J., Chung-Liang, L., Ching-Hui, T., Doo, W. B., Ku, C. Y., & Sibuet, J. C. (2008). Turbidity currents, submarine landslides and the 2006 Pingtung earthquake off SW Taiwan. *TAO: Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 19(6), 7.
- Hu, P., Cao, Z., (2009). Fully coupled mathematical modelling of turbidity currents over erodible bed. *Adv. Water Resour.* 32 (1), 1–15.
- Hu, P., Cao, Z., Pender, G., & Tan, G. (2012). Numerical modelling of turbidity currents in the Xiaolangdi reservoir, Yellow River, China. *Journal of Hydrology*, 464, 41-53.
- Huang, H., Imran, J., & Pirmez, C. (2005). Numerical model of turbidity currents with a deforming bottom boundary. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(4), 283-293.
- Huang, H., Imran, J., & Pirmez, C. (2008). Numerical study of turbidity currents with sudden-release and sustained-inflow mechanisms. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(9), 1199-1209.
- Jain, S. C., 1981, Plunging phenomena in reservoirs: Proceedings, Symposium on Surface Water Impoundments, ASCE, Minneapolis, MN. U.S.A., June 2 – 5, 1980.
- Jiahua, F. (1986). Turbid density currents in reservoirs. *Water International*, 11(3), 107-116.
- Kassem, A., & Imran, J. (2001). Simulation of turbid underflows generated by the plunging of a river. *Geology*, 29(7), 655-658.
- Katsman, R. (2013). Sediment undulations induced by free gas in muddy marine sediments: A modeling approach. *Geophysical research letters*, 40(13), 3379-3383.
- Kostic, S., & Parker, G. (2003a). Progradational sand-mud deltas in lakes and reservoirs. Part 1. Theory and numerical modeling. *Journal of Hydraulic Research*, 41(2), 127-140.
- Kostic, S., & Parker, G. (2003b). Progradational sand-mud deltas in lakes and reservoirs. Part 2. Experiment and numerical simulation. *Journal of Hydraulic Research*, 41(2), 141-152.
- Lecaros, M. (2011). Estudio de sedimentación en el embalse Rapel. Me memoria para optar al título de ingeniero civil. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Mahmoud, S. S., Abdel-Magid, I. M., & Saad, S. A. M. (2012). Rheological Modelling of Turbid River Water. *Sudan Eng. Society Journals*, 58(1).
- Middleton, G. V. (1966). Experiments on density and turbidity currents: I. Motion of the head. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 3(4), 523-546.
- Niño, Y. (2019a). Semestre otoño. Apunte de Hidrodinámica Ambiental, p. 128-135. Hidrodinámica Ambiental. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Niño, Y. (2019b). Semestre otoño. Density Currents. Hidrodinámica Ambiental. Departa-

mento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.

- Niño, Y. (2019c). Semestre otoño. Internal Hydraulics. Hidrodinámica Ambiental. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Niño, Y. & Tamburrino, A. (2004). Semestre otoño. Plunging Flow Into a Reservoir. Hidrodinámica Ambiental. Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Pantin, H. M. (1979). Interaction between velocity and effective density in turbidity flow: phase-plane analysis, with criteria for autosuspension. *Marine Geology*, 31(1-2), 59-99.
- Parker, G., Fukushima, Y., & Pantin, H. M. (1986). Self-accelerating turbidity currents. *Journal of Fluid Mechanics*, 171, 145-181.
- Sequeiros, O. E., Naruse, H., Endo, N., Garcia, M. H., & Parker, G. (2009). Experimental study on self-accelerating turbidity currents. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 114(C5).
- Sequeiros, O. E., Mosquera, R., & Pedocchi, F. (2018). Internal structure of a self-accelerating turbidity current. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 123(9), 6260-6276.
- Singh, B., & Shah, C. R. (1971). Plunging phenomenon of density currents in reservoirs. *La Houille Blanche*, (1), 59-64.
- Simonin, O. (1990). Eulerian formulation for particle dispersion in turbulent two-phase flows. In *Proceedings of the 5th Workshop on Two-Phase Flow Predictions*, Erlangen, Germany, March 19–22 (pp. 156-166).
- Toniolo, H. (2003). “Debris Flow and Turbidity Current Deposition in the Deep Sea and Reservoirs.” Ph.D. Thesis, University of Minnesota, 2002, 233 p.
- Tulus, S., & Marpaung, T. J. (2018). Sedimentation Optimization on River Dam Flow by Using COMSOL Multiphysics. In *Channel IOP Conf. Series: Mater, Sci. Eng* (Vol. 300, p. 012051).
- Yam, K., McCaffrey, W. D., Ingham, D. B., & Burns, A. D. (2011). CFD modelling of selected laboratory turbidity currents. *Journal of Hydraulic Research*, 49(5), 657-666.
- Yen, B.C. (1992) Sediment fall velocity in oscillating flow. *Water Resour. and Environ. Eng. Res. Report no. 11*. Department of Civil Engineering. University of Virginia.