



**Modelación hidráulica 3D en la enseñanza: desarrollo de casos prácticos para complementar el aprendizaje en el aula**

Ana María Guarín Ortiz

Trabajo de grado para optar al título de ingeniera civil

Trabajo de Grado

Asesor

Julio Eduardo Cañón Barriga, Título académico más alto en Área de formación del asesor interno

Universidad de Antioquia

Facultad de ingeniería

Ingeniería civil

Medellín

2024

---

<b>Cita</b>	(Guarin, 2024)
<b>Referencia</b>	Guarin, A. (2024). <i>Modelación hidráulica 3D en la enseñanza: desarrollo de casos prácticos para complementar el aprendizaje en el aula, 2024</i> [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
<b>Estilo APA 7 (2020)</b>	

---



**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

## Tabla de contenido

Resumen .....	8
Abstract .....	9
Introducción .....	10
1 Objetivos .....	12
1.1 Objetivo general .....	12
1.2 Objetivos específicos.....	12
2 Marco teórico .....	13
3 Metodología .....	17
3.1 Fase 1: Planificación .....	18
3.1.1 Caso 1: Flujo alrededor de objetos.....	19
3.1.2 Caso 2: Socavaciones.....	20
3.1.3 Caso 3: Dimensionamiento de estructuras .....	21
3.2 Fase 2: Desarrollo.....	22
3.2.1 Caso 1: Flujo alrededor de objetos.....	22
3.2.2 Caso 2: Socavaciones.....	27
3.2.3 Caso 3: Dimensionamiento de estructuras .....	30
3.3 Fase 3: Implementación .....	31
4 Resultados y discusión .....	32
4.1. Caso 1: Flujo alrededor de objetos .....	32
4.1.1 Cota del agua.....	32
4.1.2 Numero de Froude .....	37
4.1.3 Líneas de corriente alrededor de las pilas .....	42
4.2. Caso 2: Socavaciones .....	44
4.3. Caso 3: Dimensionamiento de estructuras .....	48

5 Conclusiones .....52

Referencias .....53

## Lista de tablas

<b>Tabla 1</b>	Propiedades de los sedimentos del lecho móvil .....	21
<b>Tabla 2</b>	Definición de la zona erosionable .....	28
<b>Tabla 3</b>	Sólidos en suspensión por tiempo .....	29
<b>Tabla 4</b>	Sólidos en suspensión por clase de suelo .....	29
<b>Tabla 5</b>	Caudal sólido por tiempo .....	29
<b>Tabla 6</b>	Caudal sólido por clase de suelo .....	29

## Lista de figuras

<b>Figura 1</b> Etapas de investigación.....	17
<b>Figura 2</b> Canal inicial en vista frontal.....	18
<b>Figura 3</b> Canal inicial en vista lateral.....	18
<b>Figura 4</b> Ubicación de la pila 1 para el estudio de flujo alrededor de objetos.....	19
<b>Figura 5</b> Ubicación de la pila 2 para el estudio de flujo alrededor de objetos.....	19
<b>Figura 6</b> Esquema de los sedimentos del lecho móvil.....	20
<b>Figura 7</b> Canal base con una compuerta en vista lateral.....	21
<b>Figura 8</b> Canal base con una compuerta en vista frontal.....	21
<b>Figura 9</b> Geometría del canal inicial importada en Iber.....	23
<b>Figura 10</b> Geometría del canal con la pila 1 importado en Iber.....	23
<b>Figura 11</b> Geometría del canal con la pila 2 importado en Iber.....	23
<b>Figura 12</b> Condiciones hidrodinámicas de entrada 2D.....	24
<b>Figura 13</b> Hidrograma.....	24
<b>Figura 14</b> Condiciones hidrodinámicas de salida 2D.....	25
<b>Figura 15</b> Condiciones hidrodinámicas iniciales.....	25
<b>Figura 16</b> Malla de la superficie para el canal base.....	26
<b>Figura 17</b> Malla de la superficie para el canal con la pila 1.....	26
<b>Figura 18</b> Malla de la superficie para el canal con la pila 2.....	26
<b>Figura 19</b> Superficies de zona erosionable.....	28
<b>Figura 20</b> Condiciones de contorno para erosión de suelos.....	29
<b>Figura 21</b> Ubicación de la compuerta.....	30
<b>Figura 22</b> Perfil del flujo en el canal base.....	33
<b>Figura 23</b> Perfil del flujo en el canal con la pila 1.....	34

<b>Figura 24</b>	Perfil de flujo en el canal con la pila 2 .....	35
<b>Figura 25</b>	Cota del agua en vista tridimensional del canal base .....	36
<b>Figura 26</b>	Cota del agua en vista tridimensional del canal con la Pila 1 .....	36
<b>Figura 27</b>	Cota del agua en vista tridimensional del canal con la Pila 2.....	37
<b>Figura 28</b>	Perfil longitudinal del número de Froude en el canal base.....	38
<b>Figura 29</b>	Perfil longitudinal del número de Froude en el canal con la Pila 1 .....	39
<b>Figura 30</b>	Perfil longitudinal del número de Froude en el canal con la Pila 2 .....	40
<b>Figura 31</b>	Vista frontal del número de Froude en el canal base.....	41
<b>Figura 32</b>	Vista frontal del número de Froude en el canal con la pila 1 .....	41
<b>Figura 33</b>	Vista frontal del número de Froude en el canal con la pila 2 .....	41
<b>Figura 34</b>	Vectores de velocidad alrededor de la pila 1 .....	42
<b>Figura 35</b>	Vectores suavizados de velocidad alrededor de la pila 1 .....	43
<b>Figura 36</b>	Vectores de velocidad alrededor de la pila 2 .....	44
<b>Figura 37</b>	Vectores suavizados de velocidad alrededor de la pila 2 .....	44
<b>Figura 38</b>	Perfil del canal con lecho móvil .....	45
<b>Figura 39</b>	Visualización tridimensional de la erosión del lecho en el canal .....	46
<b>Figura 40</b>	Alteraciones del lecho del canal generadas por la Pila 2.....	46
<b>Figura 41</b>	Número de Froude en el canal con la pila 2 y lecho móvil .....	47
<b>Figura 42</b>	Perfil del lecho móvil para el canal con una compuerta.....	49
<b>Figura 43</b>	Vista 3D de la cota del agua en el canal con una compuerta.....	49
<b>Figura 44</b>	Vista 3D de erosión en el canal con una compuerta.....	50
<b>Figura 45</b>	Número de Froude en el canal con una compuerta.....	51

## Resumen

Comprender los principios y procesos hidráulicos es fundamental en ingeniería civil, ambiental y otras disciplinas relacionadas. Sin embargo, la enseñanza de estos principios puede resultar desafiante debido a su naturaleza abstracta y compleja. Por tanto, la integración de ejemplos prácticos y modelación computacional puede mejorar significativamente la comprensión de los estudiantes. Este trabajo de grado desarrolla tres casos prácticos de modelación hidráulica con el software Iber, enfocados en el flujo alrededor de objetos, socavaciones y dimensionamiento de estructuras, en busca de proporcionar a los estudiantes una experiencia práctica en la aplicación de conceptos teóricos. Estos casos prácticos están especialmente adaptados para estudiantes de pregrado, con el propósito de fortalecer su comprensión y aplicar los conocimientos adquiridos en el aula a situaciones reales de modelación hidráulica.

*Palabras clave:* Modelación 3D, hidráulica, Iber, socavación, flujo, estructura.

---

**Abstract**

The comprehension of hydraulic principles and processes is fundamental in civil, environmental, and associated engineering disciplines. However, teaching these principles can be challenging primarily because of their abstract and complex character. Therefore, the integration of practical examples and computational modeling can provide a substantial improvement in students' understanding. This thesis develops three case studies of hydraulic modeling with Iber software, focusing on flow around objects, scour and sizing of structures, in order to offer students a practical experience in the application of theoretical concepts. These case studies are specially adapted for undergraduate students, with the purpose of reinforcing their understanding and applying the knowledge learned in the classroom to real hydraulic modeling situations.

*Keywords:* 3D modeling, hydraulics, Iber, scour, flow, structure.

---

## Introducción

En la actual era digital y tecnológica, la educación se encuentra ante un desafío constante: ¿cómo integrar de manera efectiva las herramientas y técnicas más avanzadas para mejorar el proceso de enseñanza y aprendizaje? La modelación hidráulica 3D emerge como una respuesta innovadora para abordar esta pregunta en el campo de la ingeniería. Esta técnica no solo facilita la visualización de fenómenos complejos de replicar en los laboratorios, sino que también permite a los estudiantes interactuar con simulaciones realistas, explorar los escenarios desarrollados y analizar los datos arrojados. Por consiguiente, la modelación hidráulica computacional se ha posicionado como una herramienta práctica para comprender y resolver problemas complejos relacionados con el flujo en diferentes escenarios. Cabe destacar que en el ámbito de la ingeniería es crucial establecer un vínculo sólido entre la teoría académica y su aplicación práctica para formar integralmente a los futuros ingenieros.

Por tanto, este estudio desarrolla tres casos prácticos de simulación hidráulica utilizando el software Iber, enfocados en situaciones complejas de visualizar en laboratorios como el flujo alrededor de objetos, las socavaciones y el dimensionamiento de estructuras. Inicialmente, se desarrolla un ejemplo aplicado compuesto por un canal abierto con sección transversal rectangular y variaciones en la pendiente del lecho. Para la simulación del flujo alrededor de objetos, se ubica una pila circular en una zona de inclinación decreciente y, posteriormente, otra pila en una zona horizontal. Al ejecutar ambas simulaciones, se espera observar y comparar los resultados en términos de los cambios en la profundidad del flujo, el número de Froude, las líneas de corriente y la velocidad del flujo, a fin de identificar las variaciones de cada situación. Continuando con la temática de socavaciones, se agrega al canal hidráulico mencionado anteriormente las propiedades de un lecho móvil y se utiliza la pila que genere mayores cambios en los estratos, de modo que se espera obtener el transporte de sedimentos aguas abajo, la profundidad máxima de socavación y el movimiento de sedimentos alrededor de la base de la pila. Por último, para abordar el dimensionamiento de estructuras, se incorpora un canal abierto que contiene disipadores de energía y una compuerta. Esta configuración permitirá analizar los cambios en las dinámicas del flujo causados por la interacción con las estructuras, evaluando así la efectividad de los disipadores en

---

la reducción de la energía del flujo y la influencia de la compuerta en la variación de la velocidad y las líneas de corriente.

Otro punto por considerar es la metodología adoptada para esta investigación, la cual es un enfoque cuantitativo determinado por la recolección y análisis de datos numéricos arrojados por el software Iber, como variaciones en las profundidades, velocidades de flujo y el transporte de sedimentos. Este enfoque permite una comprensión completa de los fenómenos estudiados, utilizando tanto la observación directa del software para visualizar el flujo como técnicas estadísticas para procesar la información cuantitativa. La investigación se organiza en tres fases: planificación, desarrollo e implementación, asegurando una ejecución sistemática y rigurosa del estudio desde la conceptualización hasta el análisis final de los resultados obtenidos.

Al finalizar este proyecto, se espera que los estudiantes tengan una herramienta complementaria para la comprensión profunda de los principios teóricos de la hidráulica y estén preparados para aplicar este conocimiento en situaciones reales. Este puente entre teoría y práctica no solo enriquecerá su formación académica, sino que también contribuirá a su desarrollo profesional como futuros ingenieros capacitados para enfrentar los desafíos emergentes en el ámbito de la ingeniería.

## **1 Objetivos**

### **1.1 Objetivo general**

Desarrollar tres casos prácticos de modelación hidráulica con el software Iber, centrados en el flujo alrededor de objetos, socavaciones y dimensionamiento de estructuras, con el fin de fortalecer la conexión entre teoría y práctica, especialmente diseñados para estudiantes de pregrado.

### **1.2 Objetivos específicos**

- Desarrollar un ejemplo aplicado que permita a los estudiantes comprender cómo el flujo de agua interactúa con objetos sólidos, utilizando el software Iber para visualizar y analizar estos fenómenos.
- Realizar un ejercicio de aplicación que simule la formación de socavaciones alrededor de estructuras hidráulicas, brindando a los estudiantes la oportunidad de explorar mediante el software Iber diferentes condiciones de flujo y su influencia en este proceso.
- Diseñar un caso práctico que contribuya al aprendizaje del diseño y dimensionamiento de estructuras hidráulicas, como presas, compuertas o vertederos, utilizando el software Iber para evaluar el comportamiento hidráulico de estas estructuras bajo diferentes escenarios.

---

## 2 Marco teórico

La enseñanza de la hidráulica de canales ha experimentado una transformación notable en las últimas décadas, adaptándose a los avances tecnológicos y a las nuevas necesidades del campo. Tradicionalmente, los cursos de hidráulica se han basado en la teoría fundamental del flujo en canales abiertos, abordando conceptos clave como el cálculo de caudales y el comportamiento del agua en diferentes tipos de lechos. Sin embargo, muchos programas educativos enfrentan dificultades para proporcionar una formación práctica completa debido a las limitaciones inherentes a los laboratorios físicos. Estos desafíos incluyen el alto coste de los equipos necesarios, el espacio limitado para instalar equipos adecuados y la necesidad de mantenimiento constante, lo cual puede restringir el alcance y la profundidad de la experiencia práctica ofrecida a los estudiantes (Tullis & Barfuss, 2020).

Ante las dificultades para establecer laboratorios tradicionales, se han explorado diversas alternativas para proporcionar experiencias prácticas. Una de las soluciones más destacadas es el aprendizaje basado en proyectos, que permite a los estudiantes aplicar conocimientos teóricos a situaciones reales. Por ejemplo, Crookston et al. (2020) señalan que proyectos como el análisis de un río y de su interacción con estructuras, son motivantes para que los estudiantes creen propuestas de soluciones para evitar fenómenos críticos como los desbordamientos. Estas propuestas de trabajo no solo fomentan la creatividad, sino que también facilitan la aplicación práctica de los principios de ingeniería hidráulica, permitiendo a los estudiantes desarrollar soluciones concretas.

Adicionalmente, la pandemia de COVID-19 ha acelerado el uso de plataformas educativas digitales, que han demostrado ser valiosas en la enseñanza a distancia. Ejemplos como la plataforma CREA en Uruguay y la televisión educativa multigrado en México ilustran cómo estas herramientas digitales pueden complementar la enseñanza tradicional, ofreciendo recursos accesibles y flexibles (Pais, 2020). Por ejemplo, la implementación de tecnologías de realidad aumentada (AR) y realidad virtual (VR) también está revolucionando la enseñanza de la hidráulica, herramientas como el "Augmented Reality Sandbox" ofrecen a los estudiantes la posibilidad de

---

experimentar con la topografía y observar los efectos del flujo de agua en tiempo real, promoviendo una comprensión más profunda de los conceptos hidráulicos (MacVicar et al., 2020)

Otra alternativa significativa son las simulaciones y modelos computacionales, las cuales han revolucionado el análisis de fenómenos hidráulicos, permitiendo a estudiantes visualizar y examinar el comportamiento del flujo de agua en una variedad de escenarios. Las herramientas avanzadas de dinámica de fluidos computacional (CFD) proporcionan un análisis detallado en tres dimensiones, mientras que las simulaciones unidimensionales y bidimensionales, tales como HEC-RAS e Iber, facilitan el estudio del comportamiento del flujo en canales y sistemas de drenaje con un enfoque más simplificado. Estos modelos computacionales, disponibles a través de software especializado, ofrecen una plataforma versátil y económica para la experimentación virtual, la optimización de diseños y la evaluación de diferentes condiciones sin los costos y complicaciones asociados a los experimentos físicos.

Dentro de estas herramientas, Iber destaca como un recurso de modelación bidimensional (2D) que se utiliza para simular flujos de agua en ríos, canales y áreas urbanas. Está diseñado para modelar dinámica de fluidos en escenarios de superficie libre, considerando tanto las interacciones hidráulicas como las características del terreno. Adicionalmente, Iber permite analizar fenómenos como inundaciones, la propagación de ondas de creciente y el impacto de distintas intervenciones en el entorno hídrico. Su capacidad para representar con detalle el comportamiento del flujo en dos dimensiones lo hace particularmente útil en estudios hidráulicos y en la planificación de medidas de gestión del agua (*Iberaula*, s. f.).

El software Iber, si bien es una herramienta ampliamente utilizada para la simulación de flujos superficiales en hidráulica, presenta ciertas limitaciones que deben considerarse en su aplicación. Su capacidad para modelar fenómenos complejos, como flujos con cambios abruptos de pendiente o estructuras con geometrías irregulares, puede ser limitada, afectando la precisión de los resultados. Además, la resolución de malla y el tiempo de simulación representan un equilibrio entre el tiempo de cómputo y la calidad de los resultados, lo cual puede disminuir el detalle en la representación de fenómenos específicos, como la socavación alrededor de pequeñas estructuras. Otro aspecto a considerar son los posibles errores numéricos inherentes a este tipo de software, los

cuales pueden influir en los resultados bajo condiciones de flujo inestable o cuando los parámetros de entrada son inciertos y no están bien definidos. Finalmente, la dependencia de Iber en los datos de entrada, como la topografía y las características de las estructuras, implica que cualquier incertidumbre en estos datos puede repercutir en la precisión del modelo (*Iberaula*, s. f.).

Por otro lado, fenómenos complejos como el flujo alrededor de objetos, socavaciones y dimensionamiento de estructuras a menudo resultan difíciles de estudiar de manera práctica. Sin embargo, los avances en la modelación computacional han proporcionado recursos valiosos para su análisis. En este contexto, es fundamental iniciar con la aplicación del software Iber en las temáticas anteriores y los principios hidráulicos que rigen estas simulaciones:

### **1. Flujo alrededor de objetos**

El software Iber es una herramienta altamente eficaz para estudiar el flujo alrededor de objetos, permitiendo simular detalladamente cómo el agua interactúa con estructuras y elementos en su entorno. Iber también permite asignar propiedades hidráulicas específicas como la rugosidad de las superficies, los parámetros de resistencia del lecho, las características del flujo y las condiciones de iniciales de la modelación. Además, ofrece funciones para configurar las condiciones de contorno, como el caudal de entrada y el nivel de agua en las salidas. Para llevar a cabo estas simulaciones, Iber utiliza un conjunto de ecuaciones diferenciales desarrolladas por Saint-Venant, modelando los cambios de caudal tanto en un flujo unidimensional como en un flujo bidimensional. Estas ecuaciones se resuelven mediante el método de volúmenes finitos (FVM), uno de los más empleados en la dinámica de fluidos computacional (Cea Gómez et al., 2019).

### **2. Socavación**

En este estudio se simula la socavación local producida cerca de las estructuras como resultado de la obstrucción del flujo generada. Para llevar a cabo este análisis, el software Iber proporciona herramientas especializadas que modelan tanto el transporte de sedimentos y la erosión del lecho, evaluando cómo las variaciones en la velocidad del flujo

y la rugosidad del lecho contribuyen en la formación de socavaciones. En su versión más reciente, el software ha añadido un módulo avanzado que permite trabajar con sedimentos de diferentes tamaños de grano, ampliando las posibilidades de simulación. Esta mejora facilita obtener resultados más precisos y modelar fenómenos como el acorazamiento del lecho, las erosiones diferenciadas debido a variaciones en las granulometrías y la clasificación del fondo del cauce según su capacidad de arrastre (Sanz-Ramos et al., 2022).

En este sentido, para calcular el transporte de fondo Iber emplea el modelo de Van Rijn, que estima la cantidad de sedimento movilizado en función de parámetros como el número de Shields, el tamaño de grano y la velocidad de fricción (Van Rijn, 2007). Este modelo, integrado en el plug-in de erosión de sedimentos, permite simular procesos erosivos y sedimentarios bajo distintas condiciones de flujo. Sin embargo, la precisión del modelo depende de factores como las características del lecho y la uniformidad de los sedimentos.

### **3. Dimensionamiento de estructuras**

Se refiere al proceso de determinar las dimensiones apropiadas de las estructuras hidráulicas para que cumplan su función de manera eficiente y segura, considerando las condiciones del flujo y su interacción con la estructura. El software Iber proporciona una plataforma para modelar y optimar diversas infraestructuras como canales, presas, puentes y otras construcciones hidráulicas (Cea et al., 2020). Primero, se puede definir el diseño geométrico de la estructura, incluyendo dimensiones, formas y materiales, y luego se configura el entorno hidráulico, esta función de ajustar parámetros y realizar simulaciones bajo diferentes escenarios permite a los estudiantes evaluar cómo la estructura se comportará en condiciones extremas y realizar ajustes para mejorar su rendimiento.

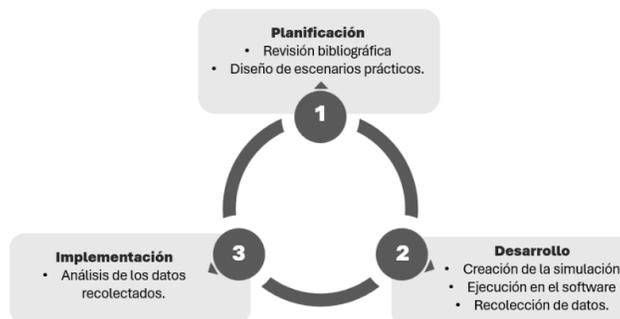
### 3 Metodología

Para la investigación se emplea un enfoque metodológico mixto, en el cual el enfoque cualitativo se centra en comprender los patrones de flujos, el comportamiento de los fluidos y los fenómenos observados en la simulación. Adicionalmente, el enfoque cuantitativo se basa en la recolección y análisis de datos generados por el software Iber, como velocidades de flujo, presiones y fuerzas ejercidas sobre las estructuras. Finalmente, la combinación de elementos cualitativos y cuantitativos permite una comprensión más completa de los fenómenos hidráulicos estudiados.

Dicho lo anterior, la investigación cuenta con 3 fases: Planificación, desarrollo e implementación (**Figura 1**). En la etapa inicial de planificación, se realiza una revisión bibliográfica que consiste en la recolección de artículos científicos provenientes de bases de datos de ingeniería y educación, manuales del software Iber y libros de teoría general de hidráulica de canales. Posteriormente, se procede al diseño de escenarios prácticos, que implica la selección de casos prácticos para simular el flujo alrededor de objetos, las socavaciones y el dimensionamiento de estructuras, incluyendo los parámetros necesarios para un análisis detallado de los fenómenos presentes. En la etapa siguiente correspondiente al desarrollo, se inicia con la creación del entorno en el software Iber, plasmando los diseños elaborados en la fase anterior. A continuación, se procede a la ejecución de las modelaciones, y posteriormente se realiza la recolección de los datos generados. Luego, en la fase 3 de implementación, se elabora la documentación detallada de cada caso de estudio junto con sus resultados correspondientes.

#### Figura 1

##### *Etapas de investigación*

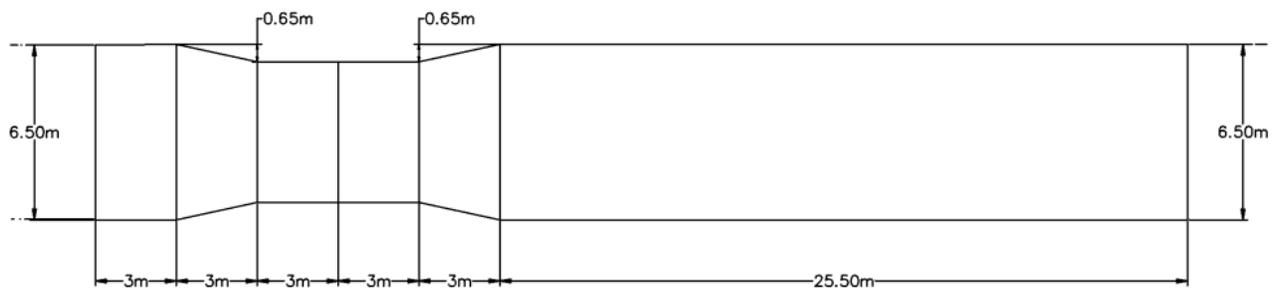


### 3.1 Fase 1: Planificación

En la fase de planificación, específicamente en el diseño de escenarios prácticos, se seleccionaron tres casos de estudio hidráulico que comparten un canal abierto con sección transversal rectangular, pendientes variables y construido de hormigón. El canal base cuenta con 3.6 metros de alto y una longitud total de 40.5 metros, adicionalmente las dimensiones específicas se ilustran en la (Figura 2 y Figura 3). De este modo, cada ejercicio de simulación representa un fenómeno hidráulico relevante, partiendo de la geometría básica y añadiendo los elementos necesarios para los estudios correspondientes. Por lo tanto, se seleccionaron las temáticas en el siguiente orden para su análisis secuencial: flujo alrededor de objetos, socavaciones y dimensionamiento de estructuras. A continuación, se describe el diseño de cada caso.

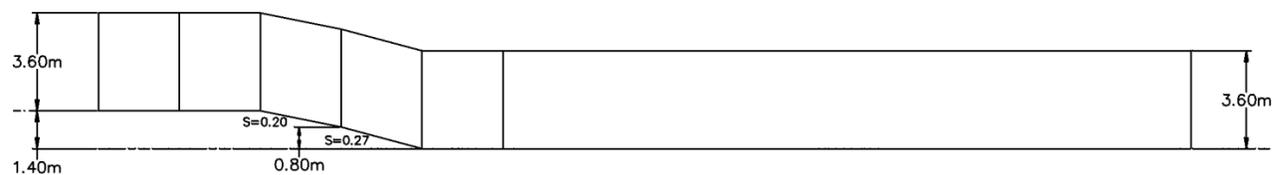
**Figura 2**

*Canal inicial en vista frontal*



**Figura 3**

*Canal inicial en vista lateral*

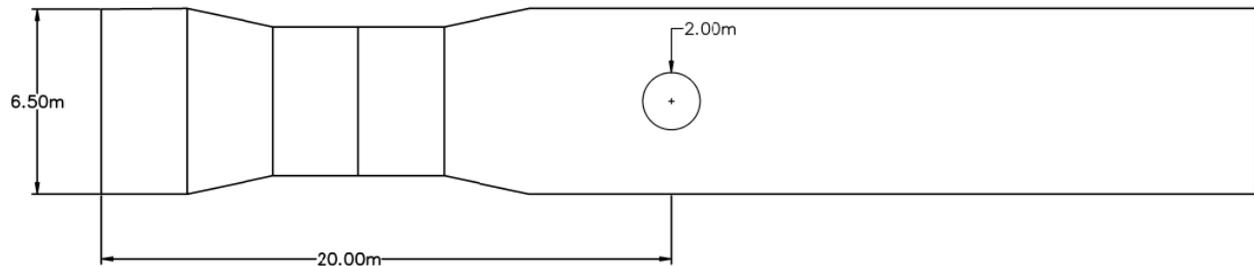


**3.1.1 Caso 1: Flujo alrededor de objetos**

En este caso se aborda el comportamiento del flujo cuando se interactúa con un objeto fijo dentro del canal. Por esta razón, se ubican dos pilas circulares con un diámetro de 2 metros en diferentes secciones longitudinales de la geometría inicial y conservando el lecho del canal de manera fija. De esta manera, la pila 1 se coloca en una zona de pendiente plana, mientras que la pila 2 se sitúa en una zona con pendiente decreciente (**Figura 4 y Figura 5**), teniendo en cuenta que se ejecutan en simulaciones diferentes con el propósito de comparar sus resultados. El objetivo de este diseño es observar como la geometría y la posición de las pilas afectan el comportamiento del flujo a lo largo del canal, creando zonas de aceleración y estancamiento alrededor de cada estructura.

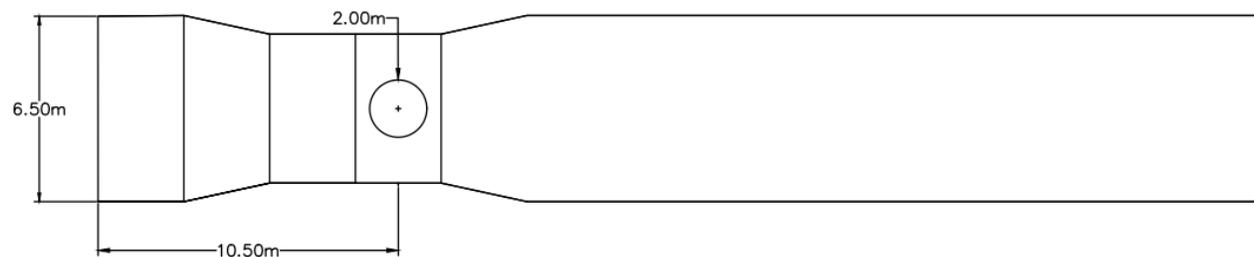
**Figura 4**

*Ubicación de la pila 1 para el estudio de flujo alrededor de objetos*



**Figura 5**

*Ubicación de la pila 2 para el estudio de flujo alrededor de objetos*

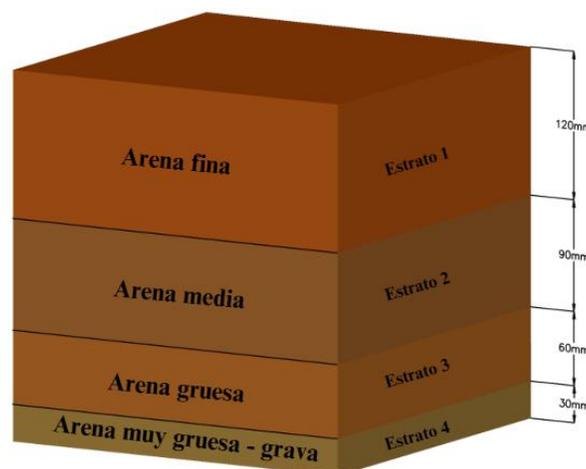


### 3.1.2 Caso 2: Socavaciones

En este escenario de simulación, se modela el fenómeno de socavación que ocurre en el lecho de un canal debido a la interacción con una estructura fija, en este caso con la pila 2, ubicada en la sección de pendiente moderada y área de alta velocidad del flujo, lo que incrementa la posibilidad de erosión en el lecho. Por tanto, a la geometría básica del canal se le agrega un lecho móvil con espesor de 300 milímetros y compuesto de cuatro estratos con características progresivas de resistencia a la erosión y socavación (**Figura 6**). El estrato 1, compuesto por una arena fina que representa el 40% de la fracción total del suelo, tiene un diámetro de 0.2 mm, una baja densidad aparente de 1650 kg/m<sup>2</sup>/m y una tensión crítica de cizalladura de 0.2 N/m<sup>2</sup>, siendo el más susceptible a la erosión. El estrato 2, formado por arena media y equivalente al 30% del suelo, tiene un diámetro de 0.5 mm, una densidad de 1700 kg/m<sup>2</sup>/m y una tensión crítica de arrastre de 0.3 N/m<sup>2</sup>, ofreciendo mayor resistencia frente a la socavación. El estrato 3, integrado por arena gruesa que abarca el 20% de la fracción total, cuenta con un diámetro de 1 mm, una densidad de 1750 kg/m<sup>2</sup>/m y una tensión crítica de cizalladura de 0.4 N/m<sup>2</sup>, reforzando la capacidad de resistir procesos erosivos. Finalmente, el estrato 4, que representa solo el 10% del suelo, está compuesto por arena muy gruesa o grava con un diámetro de 2 mm, una densidad de 1800 kg/m<sup>2</sup>/m y una tensión crítica de cizalladura de 0.6 N/m<sup>2</sup>, siendo la capa más resistente y menos propensa a la socavación. Lo anteriormente mencionado se puede evidenciar en la **Tabla 1**.

**Figura 6**

*Esquema de los sedimentos del lecho móvil*



**Tabla 1**

*Propiedades de los sedimentos del lecho móvil*

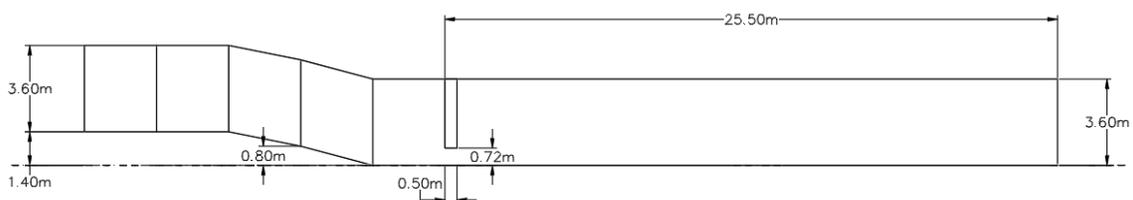
Estrato	Diametro del grano (mm)	Densidad aparente (kg/m <sup>3</sup> )	Tensión crítica de arrastre (N/m <sup>2</sup> )	Factor de forma	Fracción de suelo
1	0.20	1650	0.20	1	0.40
2	0.50	1700	0.30	1	0.30
3	1.00	1750	0.40	1	0.20
4	2.00	1800	0.60	1	0.10

**3.1.3 Caso 3: Dimensionamiento de estructuras**

En este modelo, se simula la interacción del flujo y los sedimentos con una estructura de compuerta fija construida en hormigón, situada al finalizar la sección de descenso del canal inicial y conservando las propiedades del lecho móvil mencionadas en el caso anterior. Esta estructura tiene un 20% de apertura con respecto a la altura total del canal, correspondiente a 0.72 metros (**Figura 7** y **Figura 8**). Adicionalmente, se establecen los coeficientes de descarga: 0.6 para la compuerta libre y 0.8 para la compuerta anegada. Estos coeficientes representan la eficiencia del flujo en distintas condiciones y son fundamentales para calcular el caudal, así como para comprender las dinámicas del flujo y su interacción con la estructura.

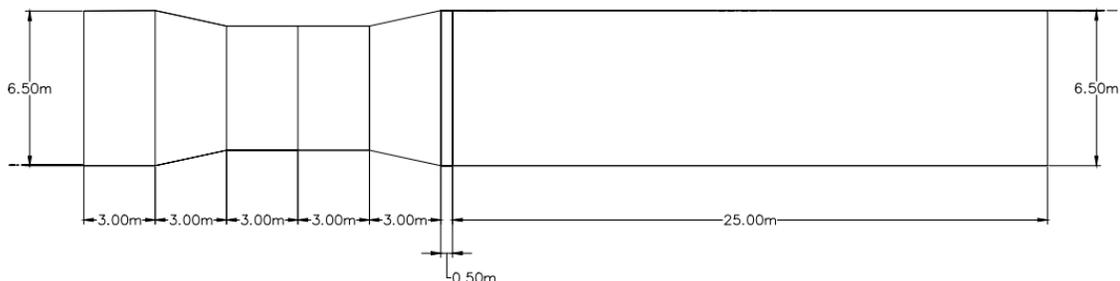
**Figura 7**

*Canal base con una compuerta en vista lateral*



**Figura 8**

*Canal base con una compuerta en vista frontal*



### 3.2 Fase 2: Desarrollo

En esta etapa se lleva a cabo la implementación de los diseños elaborados durante la fase de planificación mediante el uso del software Iber. El proceso de desarrollo incluye la creación del entorno de simulación para cada caso de estudio, comenzando con la importación de la geometría base del canal y avanzando hasta la ejecución del modelo. Este procedimiento busca representar fielmente las condiciones iniciales, tanto geométricas como de flujo, e incorpora los elementos adicionales necesarios para cada escenario práctico.

Finalmente, la fase culmina con la recolección y organización de los datos generados, los cuales servirán como base para el análisis y documentación en la fase siguiente. A continuación, se detalla el proceso de configuración y desarrollo de cada caso de estudio.

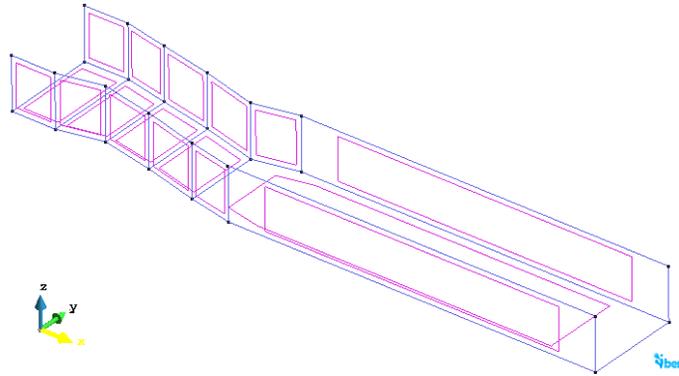
#### 3.2.1 Caso 1: Flujo alrededor de objetos

Dentro de este caso de simulación se ejecutaron tres modelos: el primero utilizó únicamente la geometría inicial del canal, y los dos restantes incluyeron las pilas circulares situadas en las zonas previamente definidas, correspondientes a la pila 1 y 2. De igual manera, es importante destacar que todas las simulaciones compartieron las mismas condiciones de entrada y salida del flujo, así como el procedimiento de configuración del software y cálculo.

El desarrollo de este caso de estudio inició con la importación de la geometría base del canal desde el software Civil 3D al entorno de Iber, representando con precisión las dimensiones y características del canal ilustradas previamente. Una vez importada la geometría, se procedió a colapsar el modelo para optimizar su uso en Iber, asegurando que la estructura de datos sea adecuada para la posterior generación de la malla y la ejecución de los cálculos. Posteriormente, se realizó la creación de superficies según las zonas de flujo y se definió la rugosidad del canal asignando el uso del suelo con el valor de 0.015, teniendo en cuenta que este valor fue utilizado para las tres simulaciones (**Figura 9**, **Figura 10** y **Figura 11**).

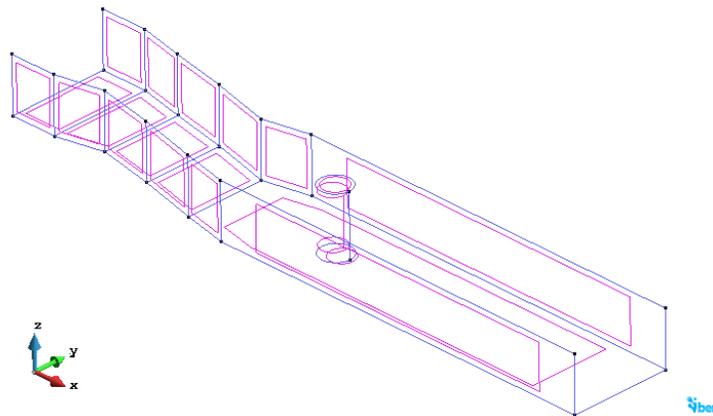
**Figura 9**

*Geometría del canal inicial importada en Iber*



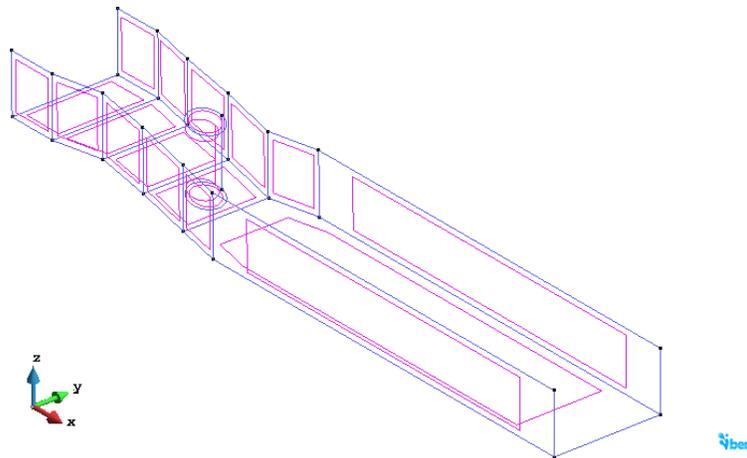
**Figura 10**

*Geometría del canal con la pila 1 importado en Iber*



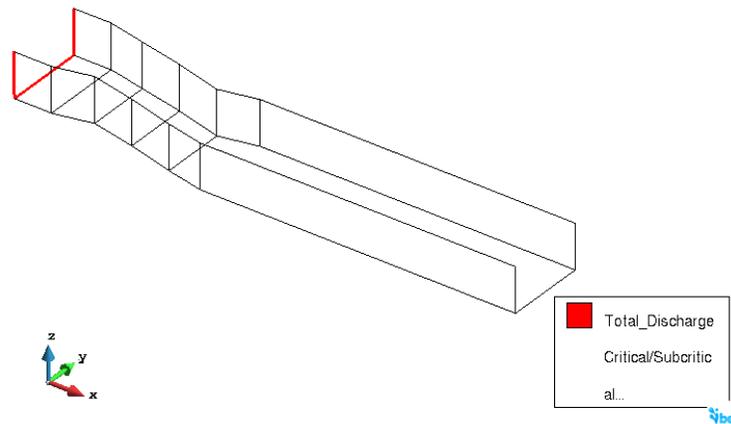
**Figura 11**

*Geometría del canal con la pila 2 importado en Iber*

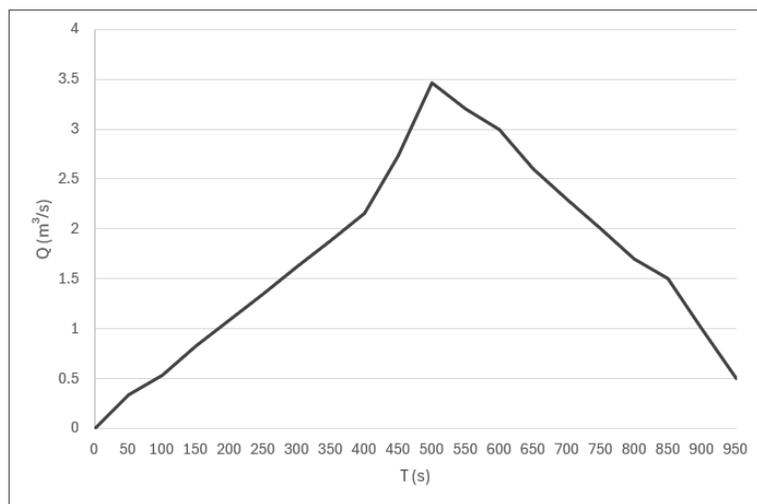


Una vez configurada la rugosidad del lecho y las paredes del canal, se procedió a establecer las condiciones de contorno fundamentales para garantizar la precisión y estabilidad del modelo hidráulico. En la entrada del canal, se asignó un flujo crítico o subcrítico (**Figura 12**) acompañado del hidrograma correspondiente que describe la variación del caudal total en función del tiempo (**Figura 13**). Por otro lado, como condición de salida se definió un flujo supercrítico (**Figura 14**), garantizando la disipación adecuada de energía al final del dominio. Adicionalmente, se configuró las condiciones iniciales del flujo seleccionando las superficies correspondientes a la profundidad cero del canal (**Figura 15**).

**Figura 12**  
*Condiciones hidrodinámicas de entrada 2D*

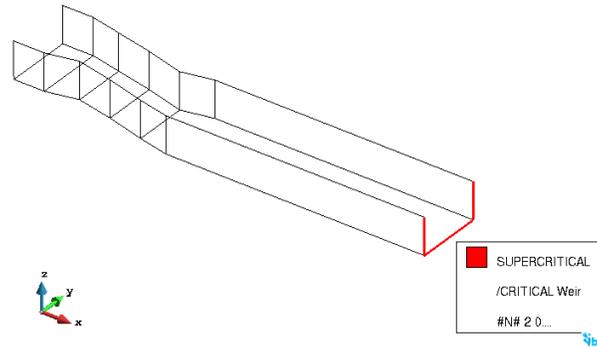


**Figura 13**  
*Hidrograma*



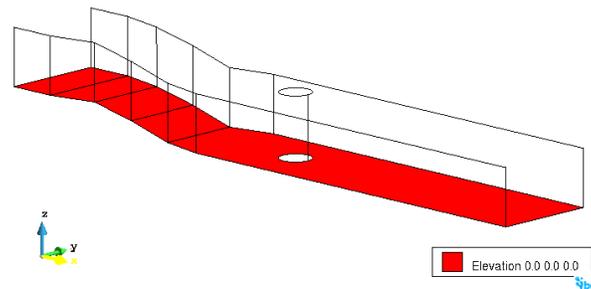
**Figura 14**

*Condiciones hidrodinámicas de salida 2D*



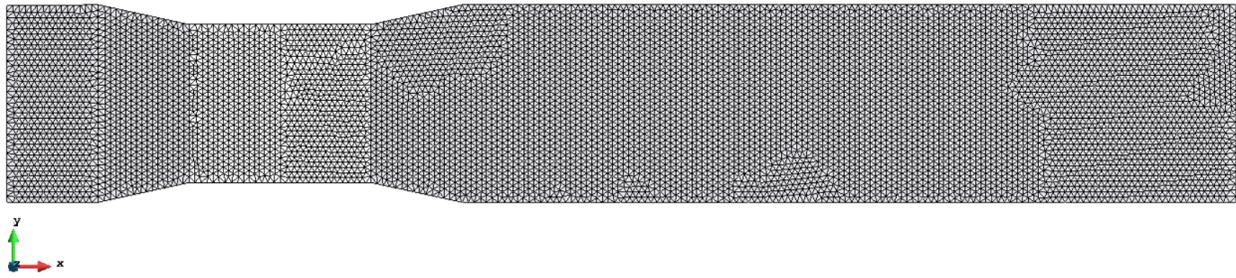
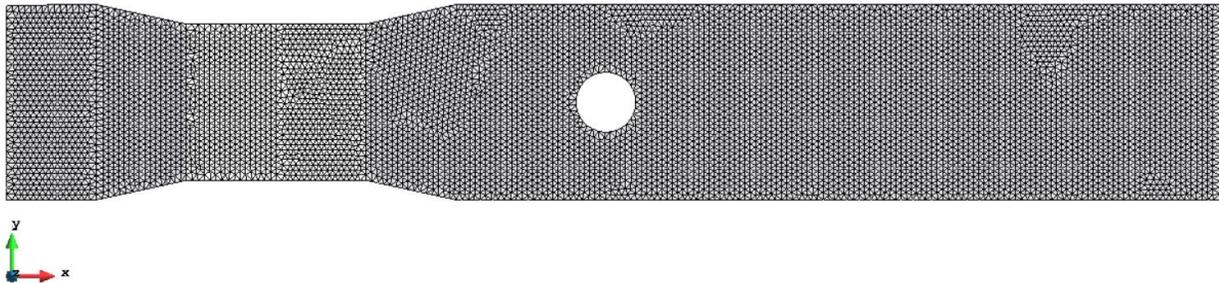
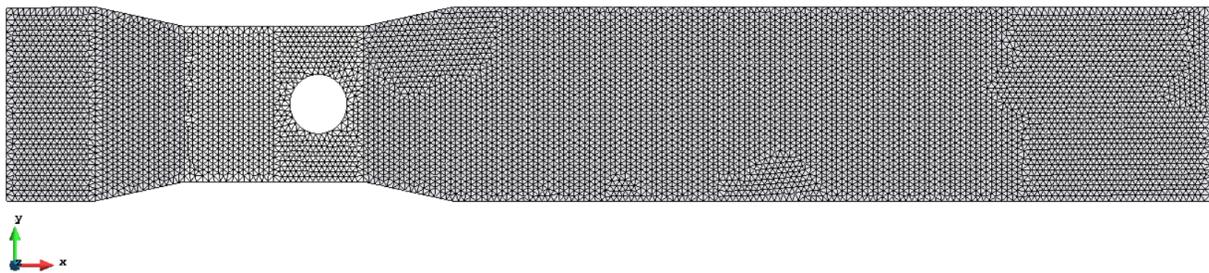
**Figura 15**

*Condiciones hidrodinámicas iniciales*



Acto seguido, se ingresaron los datos del problema, entre los cuales se encontraba la asignación de un tiempo de simulación de 950 segundos, con intervalos de cálculo de 50 segundos. Además, se definieron los resultados esperados, en este caso eran parámetros hidrodinámicos como el calado, la velocidad, el caudal específico y el número de Froude.

Con los parámetros previamente establecidos, se procedió a la creación de la malla de la superficie, ajustando su resolución para capturar con mayor precisión las dinámicas complejas esperadas en las áreas cercanas a las pilas, tales como la formación vórtices y zonas de estancamiento (**Figura 16**, **Figura 17** y **Figura 18**). Adicionalmente, la malla fue configurada como no estructurada y se asignó un valor de 0.2 metros a las superficies, optimizando el equilibrio entre la precisión de los resultados y el costo computacional. Cabe destacar que este procedimiento de mallado se replicó de la misma manera en todas las simulaciones realizadas, asegurando consistencia en los resultados.

**Figura 16***Malla de la superficie para el canal base***Figura 17***Malla de la superficie para el canal con la pila 1***Figura 18***Malla de la superficie para el canal con la pila 2*

Finalmente, se ejecutaron los cálculos en Iber, generando resultados que permitieron analizar el comportamiento del flujo alrededor de las pilas en las dos zonas del canal: la pendiente nula y la zona de descenso.

### 3.2.2 Caso 2: Socavaciones

El desarrollo de este caso siguió un procedimiento similar al estudio de flujo alrededor de un objeto, centrándose en la simulación del canal que incluye la pila 2. No obstante, se inició con la importación de la geometría y el colapso desde el software Civil 3D, seguido de la asignación de rugosidad del canal y la configuración de las condiciones de contorno hidráulico, asegurando así una representación precisa del flujo y sus interacciones con el canal. Sin embargo, al tratarse de un lecho móvil, se realizaron configuraciones adicionales específicas para modelar de manera adecuada los procesos de socavación.

Por consiguiente, se activó el complemento de erosión de sedimentos en Iber, lo que permitió incluir las condiciones del lecho planteadas anteriormente. El desarrollo de este caso continuó con la configuración de los datos específicos del problema: En primer lugar, se definió una duración de simulación de 200 segundos, dividida en intervalos de 10 segundos. Seguidamente, para modelar la erosión de suelos se utilizó un esquema de mezcla que incluye una capa no cohesiva con las propiedades detalladas en la **Tabla 1** y la **Figura 6**, añadiendo una densidad de sedimento de  $2650 \text{ kg/m}^3$ , una porosidad de 0.4 y un ángulo de fricción de 0.6 radianes. Adicionalmente, se activaron las opciones de resolver el transporte en suspensión y el transporte de fondo utilizando el modelo genérico.

Los resultados esperados se configuraron para cubrir tanto aspectos sedimentológicos como hidrodinámicos. Para la erosión de sedimentos, se seleccionaron parámetros como la concentración de sólidos en suspensión, el caudal sólido en suspensión, el caudal sólido de fondo y la profundidad de la capa no cohesiva. En el ámbito hidrodinámico, se incluyeron el calado, la velocidad, el caudal específico, el número de Froude, la tensión de fondo y las líneas de corriente.

En el siguiente paso, se creó una zona de erosión compuesta por los cuatro estratos sedimentarios planteados anteriormente. A esta zona se le asignaron manualmente las propiedades específicas a cada tipo de sedimento, incluyendo la cantidad de material erosionable por clase de suelo, medida en  $\text{kg/m}^2$  y los sólidos en suspensión correspondientes (**Tabla 2**). Además, se

estableció la ubicación del material erosionable sobre el modelo digital de elevación (MDE). Posteriormente, se definieron manualmente las regiones donde actúa la erosión, como se observa en la **Figura 19**.

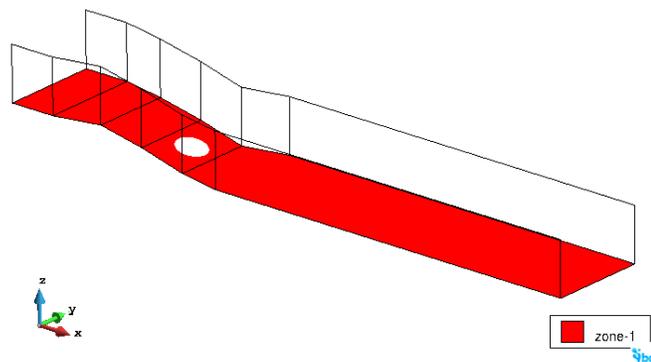
**Tabla 2**

*Definición de la zona erosionable*

Id del suelo	Material erosionable	Ss
1	495	0.50
2	510	0.30
3	525	0.10
4	540	0.05

**Figura 19**

*Superficies de zona erosionable*



Para las condiciones de contorno sedimentológicas, se configuraron dos aspectos principales: el transporte en suspensión y el transporte de fondo. En el transporte en suspensión, se ingresaron parámetros como la entrada de sólidos en suspensión por tiempo (**Tabla 3**) y la suspensión de sólidos clasificada por tipo de suelo (**Tabla 4**). Para el transporte de fondo, se incluyeron valores de caudal sólido por tiempo (**Tabla 5**) y las fracciones de suelo correspondientes a cada clase (**Tabla 6**). Ambas características se asignaron a las líneas de contorno que se observan en la **Figura 20**.

**Tabla 3**

*Sólidos en suspensión por tiempo*

Tiempo (s)	SS (kg/m <sup>3</sup> )
0	0.20
50	0.22
100	0.24
150	0.26
200	0.28

**Tabla 4**

*Sólidos en suspensión por clase de suelo*

ID del suelo	Fraccion de suelo
1	0.40
2	0.30
3	0.20
4	0.10

**Tabla 5**

*Caudal sólido por tiempo*

Tiempo (s)	qs (m <sup>2</sup> /s)
0	0.0000
50	0.0026
100	0.0041
150	0.0063
200	0.0084

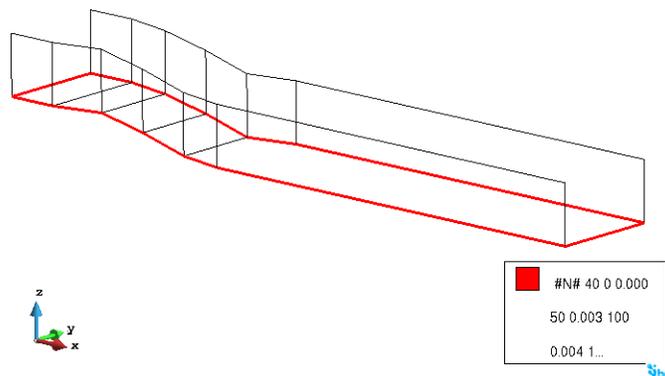
**Tabla 6**

*Caudal sólido por clase de suelo*

ID del suelo	Fraccion de suelo
1	0.40
2	0.30
3	0.20
4	0.10

**Figura 20**

*Condiciones de contorno para erosión de suelos*



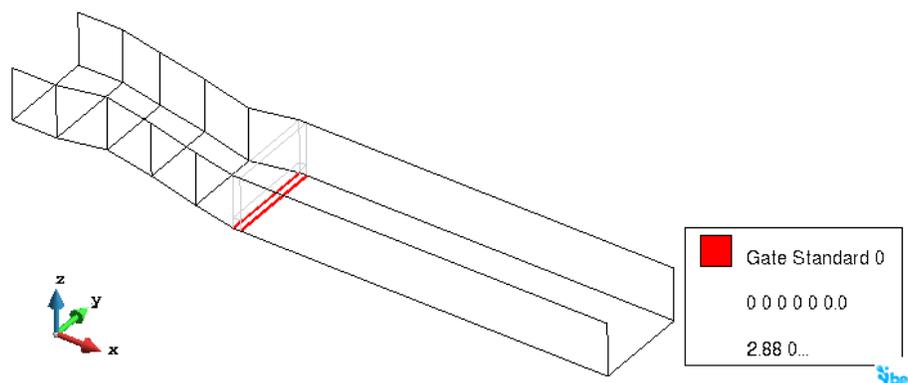
Finalmente, se creó una malla adecuada para representar la superficie del canal (**Figura 18**) y se ejecutaron los cálculos, obteniendo resultados que reflejan los fenómenos de erosión y transporte sedimentario bajo las condiciones planteadas.

### 3.2.3 Caso 3: Dimensionamiento de estructuras

El desarrollo de este caso inició estableciendo la configuración básica del modelo, siguiendo un enfoque similar al empleado en los escenarios previos. Esto implicó la integración de la geometría del canal, la activación del módulo de erosión de sedimentos y la asignación de rugosidad acorde a las características del lecho móvil. Asimismo, se definieron las condiciones de contorno hidráulico y sedimentológico necesarias para garantizar una simulación precisa. No obstante, este caso introdujo configuraciones específicas destinadas a analizar el comportamiento hidráulico y sedimentológico en torno a una compuerta instalada en el canal.

Las condiciones iniciales de la compuerta fueron definidas en el contorno hidráulico basándose en su ubicación y características, considerando tanto las condiciones de flujo como las de sedimentos a lo largo del canal. En este caso, los datos específicos incluyeron los parámetros geométricos de la compuerta definidos en la fase de investigación anterior, como lo son la cota de la estructura, la elevación del fondo, los coeficientes de descarga y la variación del flujo aguas arriba y aguas abajo durante el tiempo de simulación. Adicionalmente, estos parámetros fueron asignados en la ubicación que se observa en la **Figura 21**.

**Figura 21**  
*Ubicación de la compuerta*



---

Al igual que en los casos anteriores, se configuraron los parámetros sedimentológicos, incluyendo las propiedades del lecho móvil, el transporte de sólidos en suspensión y de fondo. Estas configuraciones fueron integradas en la malla no estructurada de la superficie, ajustada para detallar las áreas cercanas a la compuerta, donde se anticiparon fenómenos como acumulación de sedimentos y variaciones significativas en el flujo.

### **3.3 Fase 3: Implementación**

En esta fase, una vez ejecutadas las simulaciones con los datos previamente detallados, se procede a recopilar la información generada durante el proceso. Posteriormente, se analizan los resultados para identificar en qué pasos del tiempo de simulación se visualizan fenómenos relevantes, tales como aceleraciones del flujo, interacciones con las estructuras, acumulación de sedimentos y procesos erosivos. Una vez identificadas las situaciones críticas, se generan gráficos de línea que representen las características más relevantes de cada caso. Por ejemplo, en todos los casos se incluye un gráfico que muestra el perfil de la cota del agua como elemento fundamental del análisis. Además, el software permite complementar este análisis mediante la extracción de visualizaciones tridimensionales, proporcionando una representación más detallada de los parámetros estudiados y enriqueciendo la interpretación de los resultados.

## 4 Resultados y discusión

Los resultados obtenidos a partir de las simulaciones realizadas en los tres casos de estudio proporcionan una visión detallada de cómo el flujo interactúa con las distintas configuraciones del canal. En cada simulación se analizaron parámetros fundamentales como la altura del flujo, el número de Froude, la velocidad, y las líneas de corriente, que permiten evaluar el comportamiento hidráulico bajo diferentes condiciones. Las simulaciones mostraron variaciones notables en estos parámetros al comparar el canal base con aquellos que incluyen pilas y la estructura de compuerta, evidenciando los efectos de las obstrucciones sobre el perfil hidráulico y las dinámicas de flujo. A continuación, se detallan los resultados obtenidos en cada ejercicio de simulación.

### 4.1. Caso 1: Flujo alrededor de objetos

Este apartado presenta los resultados obtenidos al evaluar cómo la inclusión de estructuras fijas, representadas por pilas circulares, modifica el comportamiento hidráulico en un canal rectangular con pendientes variables. Para ello, se realizaron simulaciones en tres escenarios: un canal base sin obstrucciones, un canal con una pila ubicada en una sección horizontal (Pila 1) y otro con una pila en una pendiente decreciente (Pila 2).

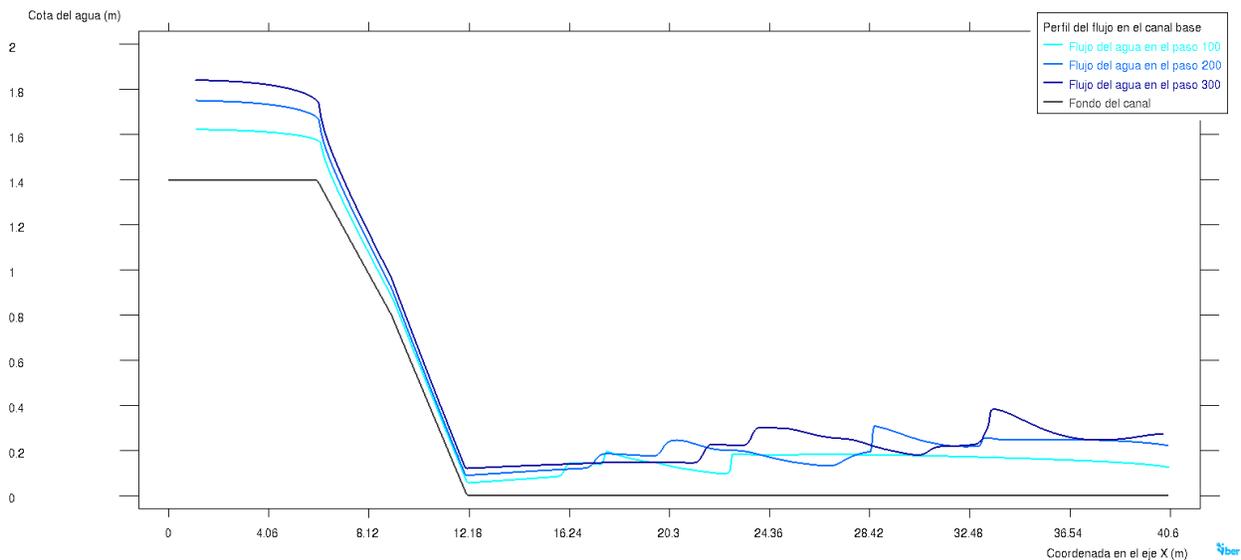
El análisis se centró en parámetros clave como las cotas del agua y el número de Froude, evaluados en intervalos de 100 segundos hasta los 400 segundos de simulación. La cota del fondo del canal fue utilizada como referencia inicial (paso 0). Este estudio busca identificar las dinámicas del flujo, como la formación de zonas de estancamiento, aceleración y cambios en las condiciones hidráulicas, proporcionando una base para el análisis técnico y la enseñanza de conceptos teóricos en hidráulica de canales.

#### 4.1.1 Cota del agua

En la **Figura 22**, correspondiente al canal base sin obstrucciones, se aprecia una distribución homogénea de la cota del agua a lo largo de todo el dominio. Las variaciones en los

diferentes tiempos de simulación (100, 200, 300 y 400 segundos) son mínimas y se mantienen estables incluso en las secciones con pendiente decreciente. La disminución de la cota es más pronunciada en la sección con pendiente decreciente (aproximadamente a partir de los 6 metros en el eje X), destacando cómo la inclinación influye en la conversión de energía potencial en cinética. Este comportamiento se mantiene a lo largo de la zona inclinada del canal, evidenciando un flujo en aceleración debido a las condiciones geométricas. Sin embargo, cercano a la coordenada 16 en el eje X, correspondiente a la transición hacia una zona más plana del canal, comienza a generarse un oleaje en el flujo del agua. Este fenómeno se presenta como una respuesta natural del flujo para redistribuir la energía cinética acumulada en la sección anterior, lo que da lugar a oscilaciones que actúan como un mecanismo de disipación de energía. Estas fluctuaciones permiten moderar las variaciones en la cota y estabilizar el perfil hidráulico en los tramos posteriores del canal, adaptándose a las condiciones geométricas más uniformes.

**Figura 22**  
*Perfil del flujo en el canal base*

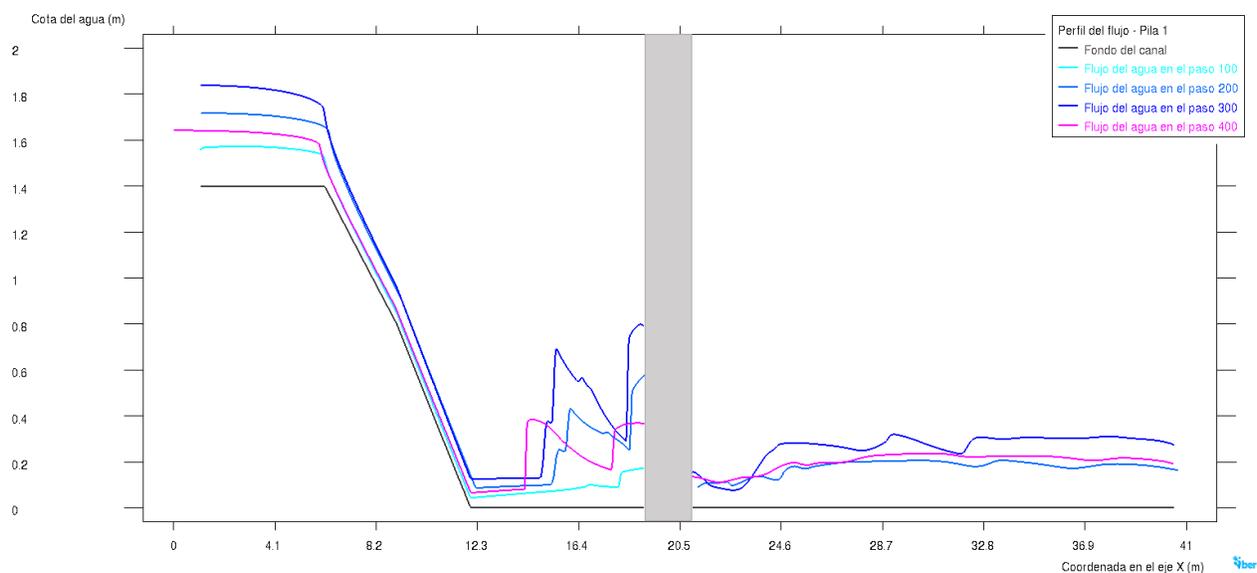


Manteniendo el enfoque en las variaciones de la cota del agua, el perfil correspondiente al canal con la pila 1, ubicada en la zona plana del canal, muestra un cambio significativo a lo largo del dominio (**Figura 23**). En primer lugar, aguas arriba de la estructura, específicamente alrededor de la coordenada 12 en el eje X, la presencia de la pila genera una acumulación de flujo que incrementa la cota del agua de manera notable en todos los tiempos de simulación. Además, este

efecto se intensifica en los pasos de tiempo de 300 y 400 segundos, alcanzando valores de hasta aproximadamente 0.8 metros. Esto se debe principalmente a la obstrucción que la pila impone al flujo, lo que crea zonas de estancamiento donde la energía cinética se reduce temporalmente. Por otro lado, a medida que avanza la simulación, se observa el desarrollo de patrones más complejos de recirculación y oleaje, lo que refleja la interacción dinámica entre el flujo y la estructura.

Asimismo, aguas debajo de la pila, la cota del agua experimenta una disminución significativa, lo que refleja una aceleración del flujo a medida que este recupera su energía cinética. Este comportamiento destaca la influencia combinada de la pendiente y la obstrucción generada por la estructura, que modifican las dinámicas hidráulicas en esta región (**Figura 23**). Además, aunque las oscilaciones en esta sección persisten, su intensidad es menor en comparación con las observadas cerca de la pila, lo que indica una estabilización progresiva del perfil del flujo a medida que se avanza hacia las coordenadas posteriores del dominio. Este análisis sugiere que el diseño y ubicación de la estructura no solo afectan las condiciones aguas arriba, sino también las dinámicas de recuperación y equilibrio hidráulico aguas abajo.

**Figura 23**  
*Perfil del flujo en el canal con la pila 1*

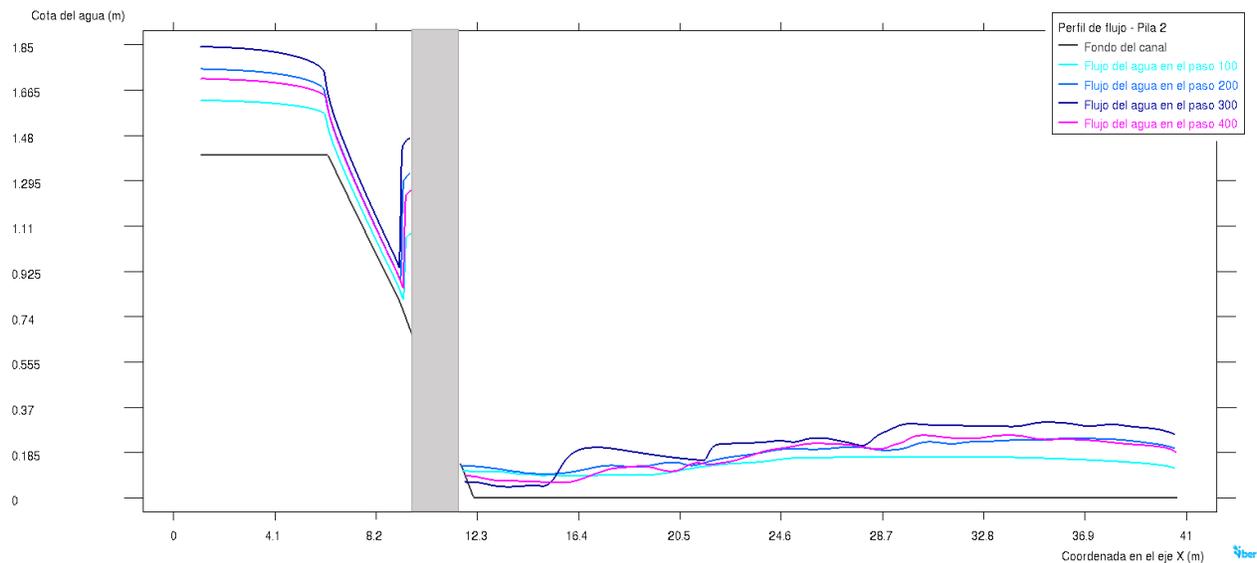


En el perfil correspondiente al canal con la pila 2, ubicada en la zona decreciente del canal, se observa una acumulación de flujo aguas arriba de la estructura (**Figura 24**). Esta acumulación

genera una zona de estancamiento corta, pero suficiente para alcanzar una cota máxima de aproximadamente 0.75 metros en el paso de 300 segundos. Este comportamiento evidencia un flujo relativamente uniforme, con variaciones mínimas entre los diferentes tiempos de simulación, lo que refleja la estabilidad hidráulica en esta región.

La obstrucción provocada por la pila 2 genera alteraciones puntuales en el flujo, especialmente aguas abajo, donde se observan oscilaciones debido a la redistribución de la energía al superar la estructura. Estas oscilaciones, sin embargo, disminuyen progresivamente en intensidad hacia las coordenadas finales del dominio, lo que evidencia un proceso gradual de estabilización del flujo. En este contexto, la geometría del canal y la ubicación de la pila 2 desempeñan un papel clave en la dinámica hidráulica, ya que condicionan las alteraciones locales sin comprometer la estabilidad hidráulica general del sistema.

**Figura 24**  
*Perfil de flujo en el canal con la pila 2*

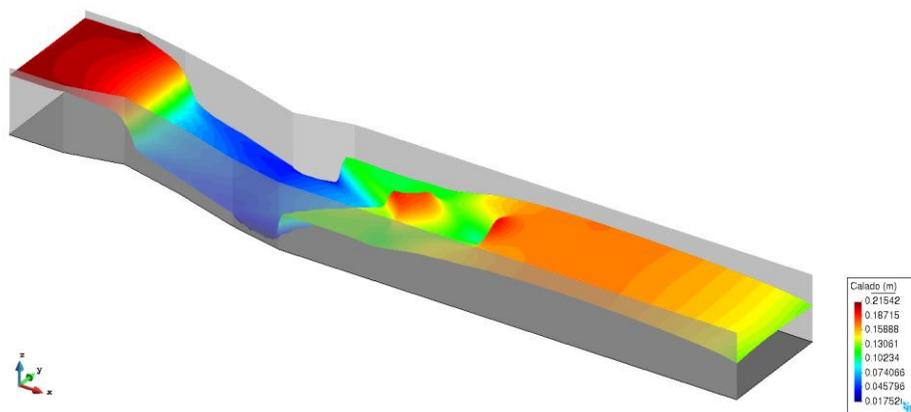


Al comparar los tres escenarios analizados anteriormente, se observan diferencias claras en las dinámicas hidráulicas ocasionadas por la interacción del flujo con las pilas y la geometría del canal. En el canal base, el flujo muestra un comportamiento uniforme y estable, con transiciones suaves en la cota del agua asociadas únicamente a los efectos de la pendiente. En el caso de la pila 1, ubicada en la zona plana del canal, se generan acumulaciones aguas arriba y una disminución

abrupta aguas abajo, acompañadas de oscilaciones más intensas debido a la mayor energía cinética del flujo en esta región. Por su parte, la pila 1, situada en una zona de pendiente decreciente del canal, provoca acumulaciones más localizadas y oscilaciones menos marcadas aguas abajo, reflejando un flujo que tiende a estabilizarse más rápidamente. Estas comparaciones resaltan cómo las características geométricas del canal y la ubicación de las estructuras condicionan la magnitud y distribución de las perturbaciones hidráulicas, lo que enfatiza la necesidad de considerar estos factores en el diseño de sistemas hidráulicos eficientes. Además, estas oscilaciones y los procesos de estabilización se pueden visualizar de manera más clara y detallada en las simulaciones tridimensionales representadas en la **Figura 25**, **Figura 26** y **Figura 27**, lo que permite una comprensión más profunda de las dinámicas del flujo en cada caso.

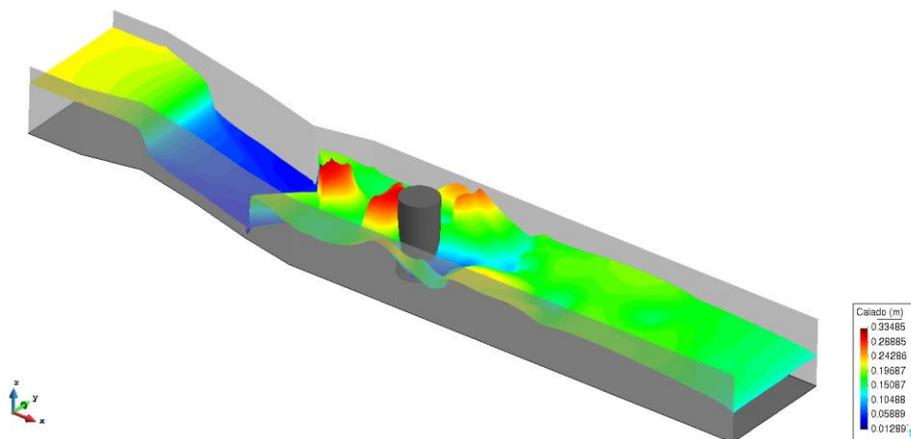
**Figura 25**

*Cota del agua en vista tridimensional del canal base*



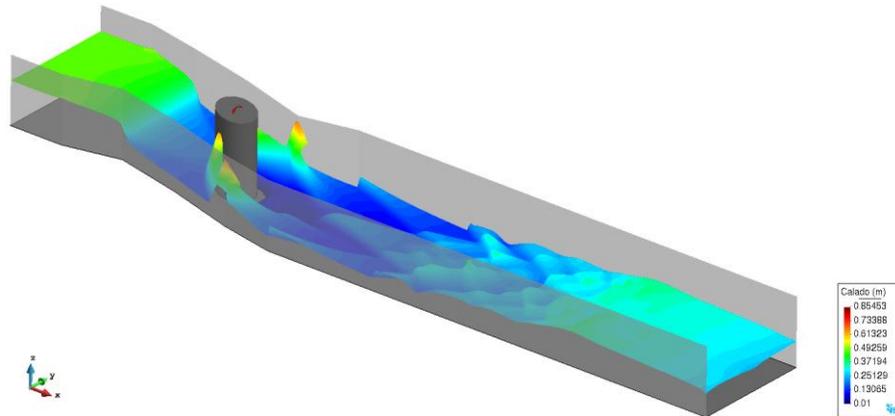
**Figura 26**

*Cota del agua en vista tridimensional del canal con la Pila 1*



**Figura 27**

*Cota del agua en vista tridimensional del canal con la Pila 2*



#### 4.1.2 Numero de Froude

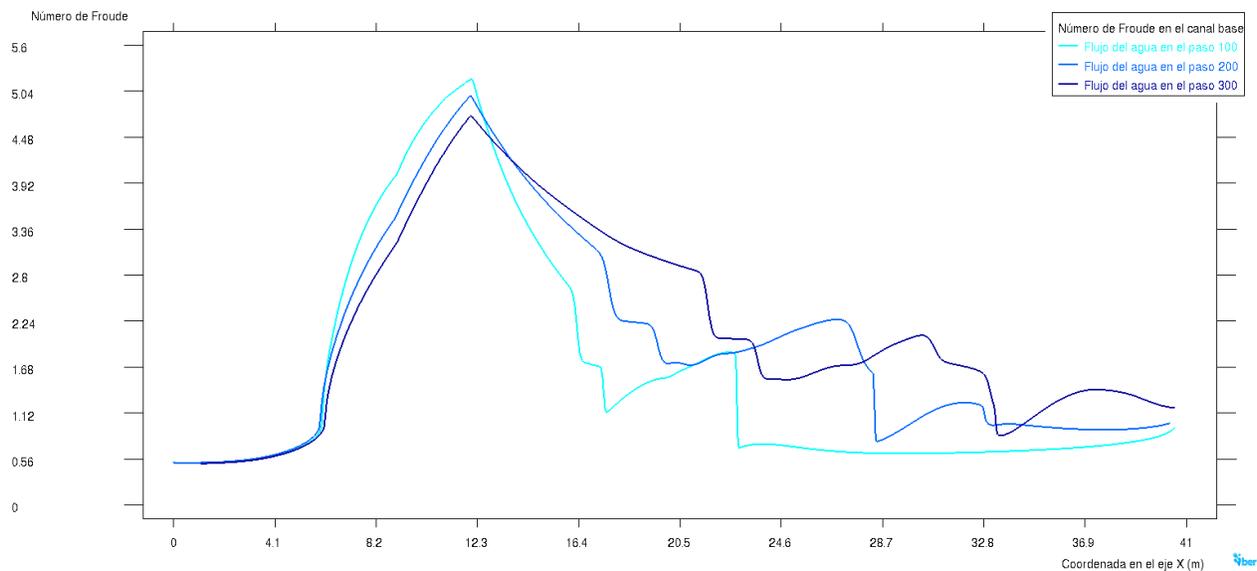
En el caso del canal base, el análisis del número de Froude refleja un comportamiento característico del flujo en canales abiertos sin obstrucciones. Como se observa en la **Figura 28**, el flujo inicia con valores subcríticos (menores a 1) en las primeras coordenadas del eje X, lo que indica un dominio de energía potencial en esta sección. Posteriormente, a medida que el flujo avanza hacia la sección de pendiente decreciente, aproximadamente a partir de los 6 metros en el eje X, el número de Froude comienza a incrementarse de manera progresiva, alcanzando valores supercríticos (mayores a 1).

Adicionalmente, el punto máximo del número de Froude se encuentra alrededor de la coordenada 12 para todos los pasos de simulación, coincidiendo con la zona de mayor inclinación del canal. En este punto, se observa que el flujo alcanza valores cercanos a 5, lo que indica una alta energía cinética debido a la aceleración generada por la pendiente. Luego, a medida que el flujo se adentra en la zona plana del canal, el número de Froude disminuye de manera gradual, estabilizándose en valores cercanos a 1, reflejando una transición hacia condiciones subcríticas o de flujo uniforme.

El análisis de los pasos de tiempo (100, 200 y 300 segundos) revela que, aunque el patrón general se mantiene constante, las oscilaciones son más evidentes en los intervalos de tiempo mayores. Estas fluctuaciones pueden estar relacionadas con la redistribución de energía en la

sección plana del canal, donde el flujo busca estabilizarse tras superar la aceleración inicial. Este comportamiento es característico de un canal base sin estructuras que generen perturbaciones adicionales en el flujo.

**Figura 28**  
*Perfil longitudinal del número de Froude en el canal base*

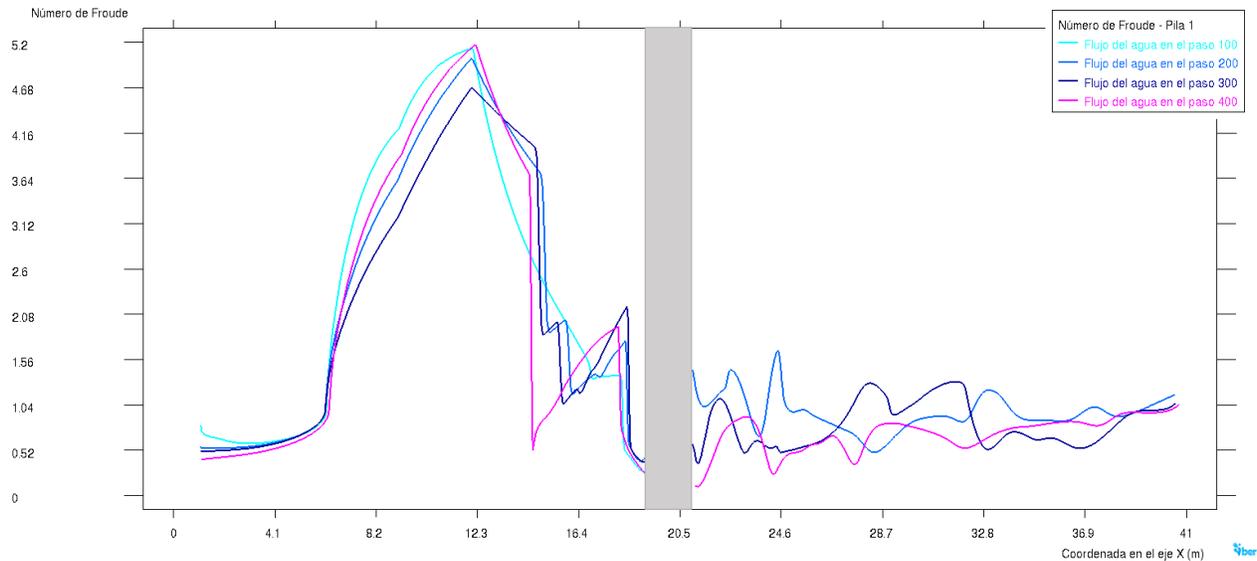


En el canal con la pila 1, ubicada en la zona plana del canal, el análisis del número de Froude muestra un comportamiento característico influenciado por la presencia de la estructura (**Figura 29**). Aguas arriba de la pila, el flujo presenta un aumento progresivo en el número de Froude, alcanzando su valor máximo alrededor de la coordenada 12 en el eje X, con valores cercanos a 5.2. Este incremento refleja una alta energía cinética del flujo antes de interactuar con la estructura.

En las proximidades de la coordenada 14 en el eje X, aguas abajo de la pila, el número de Froude disminuye abruptamente, lo que indica una reducción significativa de la energía del flujo como resultado de la interacción con la estructura. Este fenómeno se asocia con la disipación de energía y el desarrollo de zonas de recirculación. En la zona plana del canal, el número de Froude presenta oscilaciones marcadas, con fluctuaciones más evidentes en los pasos de tiempo de 300 y 400 segundos, lo que evidencia una dinámica compleja del flujo en esta región.

A medida que el flujo avanza hacia las coordenadas finales del dominio, estas oscilaciones disminuyen gradualmente, sugiriendo un proceso de estabilización del flujo. Este análisis evidencia cómo la presencia de la pila 1 afecta la distribución de energía a lo largo del canal, generando variaciones significativas tanto aguas arriba como aguas abajo de la estructura.

**Figura 29**  
*Perfil longitudinal del número de Froude en el canal con la Pila 1*



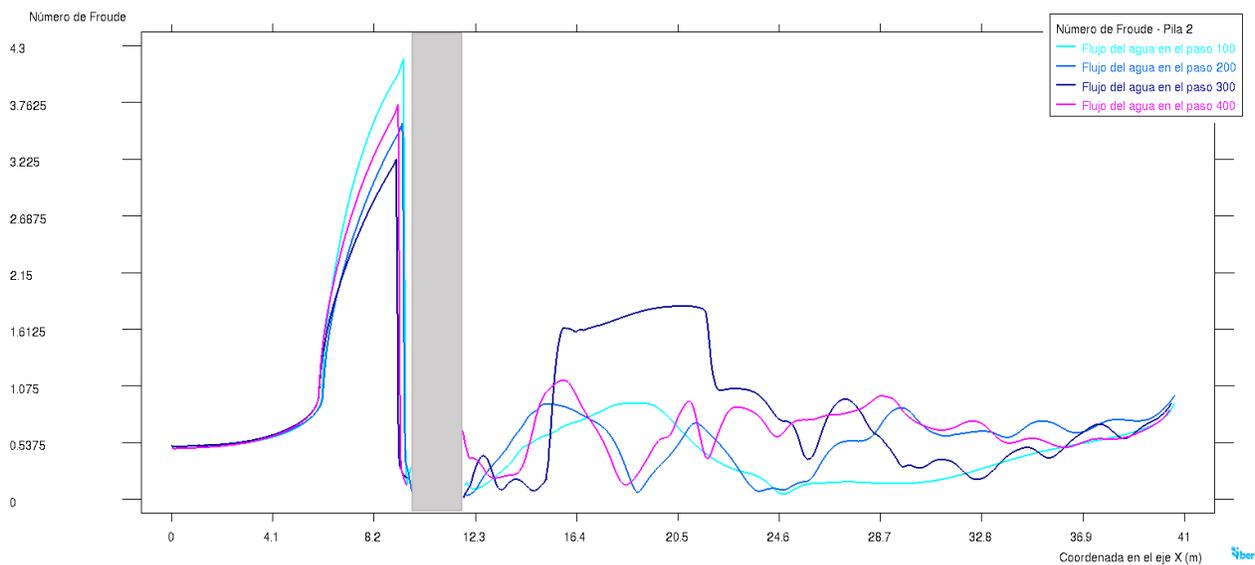
En el canal con la pila 2, ubicada en la zona de pendiente decreciente, el análisis del número de Froude muestra un comportamiento característico influenciado por la interacción del flujo con la estructura y la geometría del canal (**Figura 30**). Aguas arriba de la pila, el número de Froude aumenta progresivamente conforme el flujo desciende por la pendiente, alcanzando valores máximos cercanos a 4.3 alrededor de la coordenada 8 en el eje X. Este incremento refleja una aceleración significativa del flujo, típica de una transición hacia condiciones supercríticas en canales inclinados.

Aguas abajo de la pila 2, el número de Froude disminuye de manera abrupta, mostrando un retorno a valores subcríticos. Este descenso se asocia con la disipación de energía generada por la interacción con la estructura, que provoca un ajuste en la dinámica del flujo. Posteriormente, en la zona plana del canal, se observan oscilaciones en este parámetro, con patrones que varían según el

paso de tiempo analizado. Estas oscilaciones son más evidentes en los intervalos de tiempo de 300 y 400 segundos, indicando una mayor complejidad en la distribución de energía en esta región.

A medida que el flujo avanza hacia las coordenadas finales del dominio, las oscilaciones tienden a estabilizarse, reflejando un proceso de ajuste progresivo hacia un estado de flujo uniforme. Este comportamiento destaca cómo la presencia de la pila 2 afecta la dinámica hidráulica del sistema, modificando tanto la distribución de energía como las condiciones de flujo en las secciones aguas arriba y aguas abajo de la estructura.

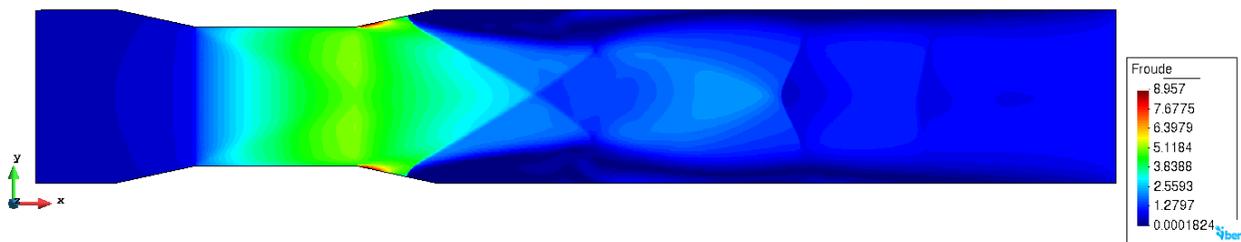
**Figura 30**  
*Perfil longitudinal del número de Froude en el canal con la Pila 2*



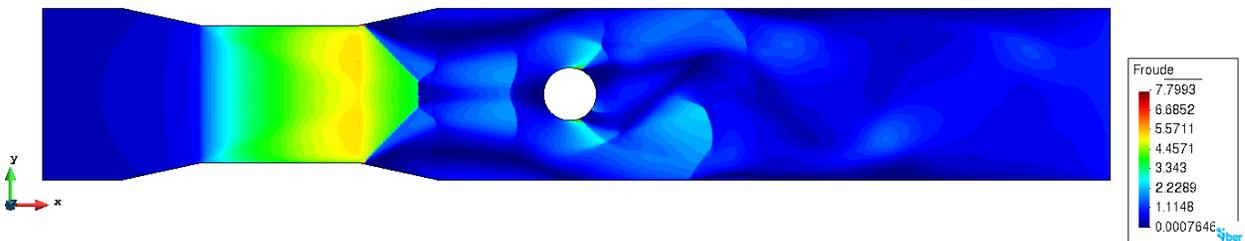
Al comparar los tres escenarios estudiados, se identifican diferencias importantes en el comportamiento del número de Froude. En el canal base, los valores aumentan de manera gradual hacia condiciones supercríticas en la zona inclinada, estabilizándose de forma uniforme en la sección plana del canal. En el caso de la pila 1, el número de Froude alcanza valores más altos aguas arriba de la estructura y presenta oscilaciones más intensas aguas abajo, reflejando una mayor complejidad hidráulica debido a la interacción con la pila. Por su parte, en el caso de la pila 2, aunque también se alcanzan valores elevados aguas arriba, las oscilaciones aguas abajo son más moderadas, lo que sugiere un flujo más estable en la sección final del dominio.

Finalmente, estos comportamientos no solo son evidentes en las gráficas de los perfiles longitudinales, sino que también pueden visualizarse en las vistas frontales y bidimensionales generadas por el software (**Figura 31**, **Figura 32** y **Figura 33**). Estas representaciones proporcionan un nivel adicional de detalle, mostrando las zonas de mayor aceleración, recirculación y estabilización del flujo desde una perspectiva global. En particular, se puede observar alrededor de la pila 1 los patrones de recirculación y separación del flujo, representados por las fluctuaciones en los tonos de azul oscuro y verde. Por otro lado, en el caso de la pila 2, los cambios en el flujo son más intensos, con valores máximos de Froude visibles en tonos verdes aguas arriba debido a la alta aceleración.

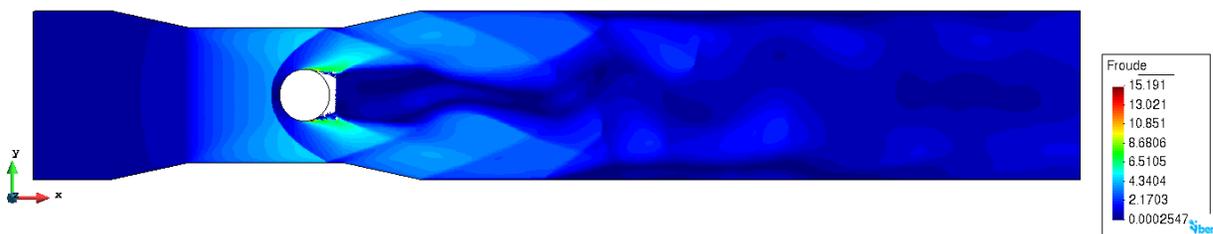
**Figura 31**  
 Vista frontal del número de Froude en el canal base



**Figura 32**  
 Vista frontal del número de Froude en el canal con la pila 1



**Figura 33**  
 Vista frontal del número de Froude en el canal con la pila 2



### 4.1.3 Líneas de corriente alrededor de las pilas

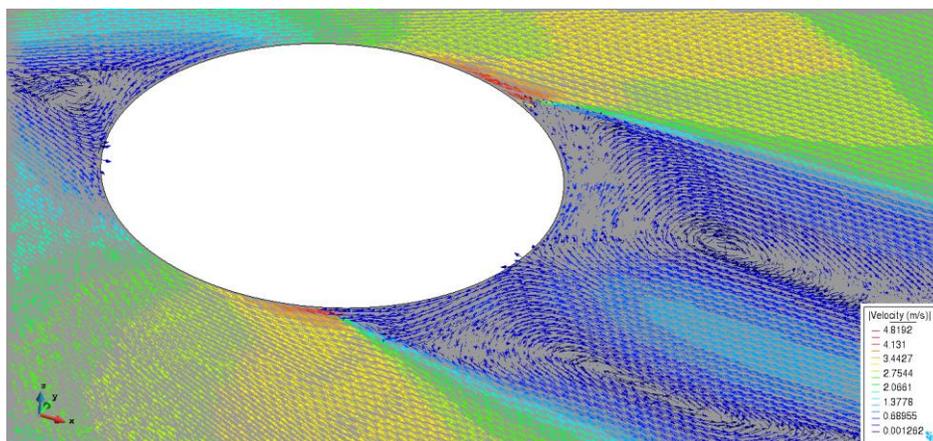
En la **Figura 34** se presentan los vectores de velocidad generados alrededor de la pila 1, ubicada en la zona plana del canal. Aguas arriba de la estructura, se observa cómo los vectores de velocidad adquieren una mayor intensidad, especialmente en los bordes laterales de la pila, donde el flujo acelera al intentar rodear la obstrucción. Este comportamiento se representa visualmente mediante los tonos amarillos y verdes, que indican zonas de velocidades más altas en comparación con el resto del dominio.

En contraste, en la región inmediatamente detrás de la pila, se generan vórtices que se identifican por la formación de líneas de corriente circulares y vectores de baja magnitud, representados en tonos azules. Estas zonas de baja velocidad evidencian la disipación de energía y el efecto de recirculación típico de estructuras obstructoras en flujos abiertos. Por otro lado, aguas abajo, los vectores indican una recuperación gradual de la velocidad del flujo, reflejando un proceso de estabilización, se observa cómo las líneas de corriente comienzan a alinearse nuevamente con la dirección general del flujo, mostrando una redistribución de energía en el sistema (**Figura 35**).

Este análisis permite identificar los procesos asociados, como la formación de socavaciones y la acumulación de sedimentos. El uso de herramientas como los vectores de velocidad resulta clave para anticipar y mitigar estos efectos, contribuyendo al diseño óptimo de las estructuras hidráulicas y garantizando tanto su eficiencia como su estabilidad a largo plazo.

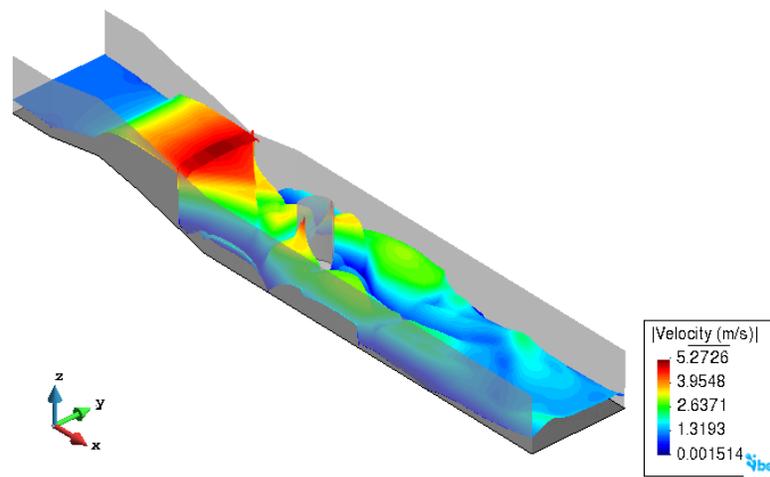
#### **Figura 34**

*Vectores de velocidad alrededor de la pila 1*



**Figura 35**

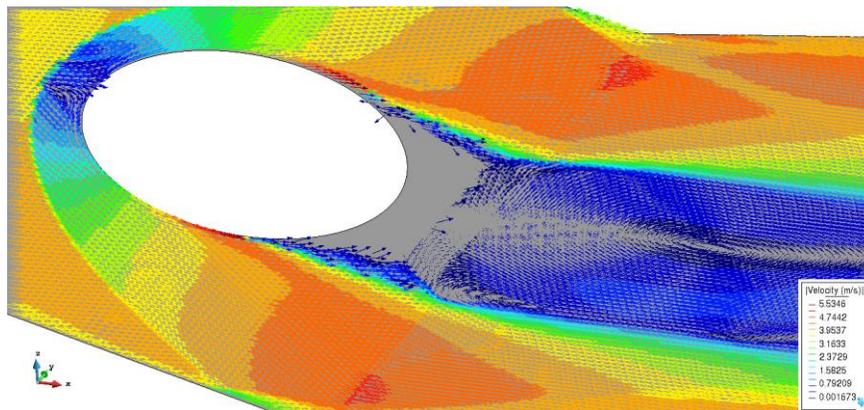
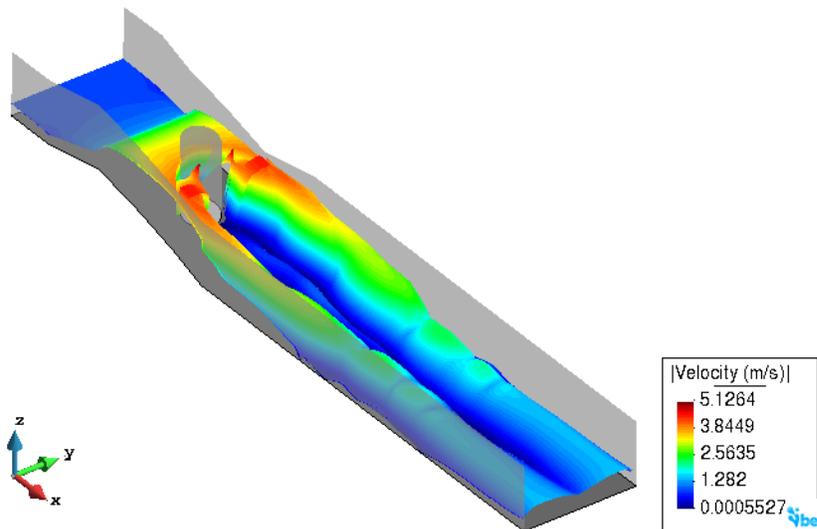
*Vectores suavizados de velocidad alrededor de la pila 1*



En este segundo análisis, se examina el comportamiento del flujo alrededor de la pila 2, ubicada en una zona de pendiente decreciente. Los vectores de velocidad muestran cómo el flujo se acelera de manera notable aguas arriba de la pila, lo que se visualiza en los tonos rojos y naranjas que representan las mayores magnitudes de velocidad (**Figura 36**). Esta aceleración es causada por la combinación de la pendiente del canal y la obstrucción impuesta por la estructura, lo que incrementa la energía cinética del flujo en esta región.

Al aproximarse a la pila, el flujo se desvía hacia los bordes laterales, lo que genera un patrón característico de concentración de velocidad alrededor de la estructura (**Figura 37**). Aguas abajo, los vectores revelan la presencia de áreas de recirculación, marcadas por velocidades reducidas y patrones circulares, representados por tonos azules. Estas zonas son indicativas de una considerable disipación de energía, donde el flujo pierde velocidad al interactuar con la estructura.

El patrón de alta velocidad aguas arriba y las áreas de recirculación aguas abajo destacan la influencia de la pendiente decreciente en la distribución de energía del flujo. Este comportamiento tiene implicaciones importantes, ya que puede contribuir a procesos de socavación alrededor de la base de la pila y requiere de un diseño adecuado para mitigar los efectos de erosión. Este análisis refuerza la utilidad de las simulaciones para identificar áreas críticas y optimizar la interacción entre las estructuras y el flujo en sistemas hidráulicos complejos.

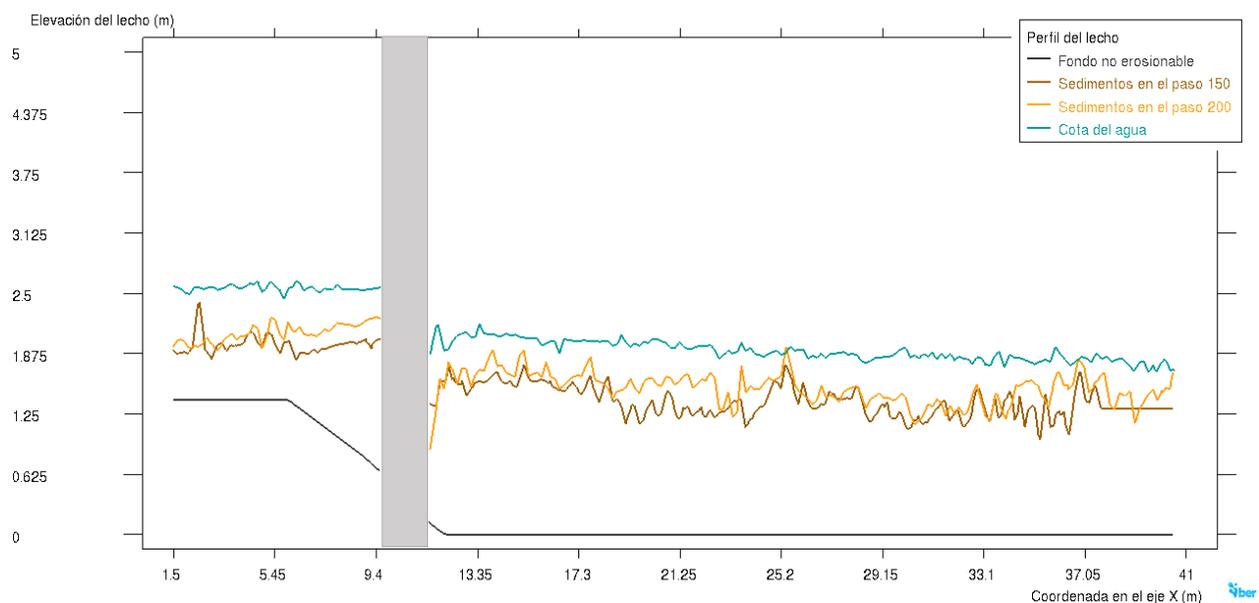
**Figura 36**
*Vectores de velocidad alrededor de la pila 2*

**Figura 37**
*Vectores suavizados de velocidad alrededor de la pila 2*


## 4.2. Caso 2: Socavaciones

En este análisis, se evaluarán los procesos de socavación generados alrededor de la Pila 2, destacando cómo las condiciones del flujo y su interacción con la estructura influyen en la erosión del lecho del canal. Este escenario combina los efectos de alta velocidad y energía cinética, propios de la geometría del canal, con el impacto directo del flujo sobre la base de la pila, lo que hace que el entorno sea especialmente propenso a fenómenos de socavación.

De esta manera, se observa en la **Figura 38** la evolución del lecho móvil en el canal con la pila 2 durante los pasos de simulación 150 y 200 segundos. Aguas arriba de la pila, las altas velocidades del flujo, en combinación con la interacción directa con la estructura, provocan una remoción activa del material del lecho, lo que se traduce en una disminución de la elevación en esta región. Este comportamiento es particularmente evidente entre las coordenadas 9.4 y 13.35 en el eje X, donde la aceleración del flujo debido a la pendiente incrementa su capacidad erosiva. Por el contrario, aguas abajo de la pila, el flujo experimenta una disminución en su velocidad como consecuencia de la disipación de energía y la formación de patrones de recirculación, también influenciados por la presencia de la pila. Estas condiciones favorecen la deposición de material transportado, incrementando progresivamente la elevación del lecho en esta zona, como se aprecia entre las coordenadas 21.25 y 37.05 en el eje X.

**Figura 38**  
*Perfil del canal con lecho móvil*

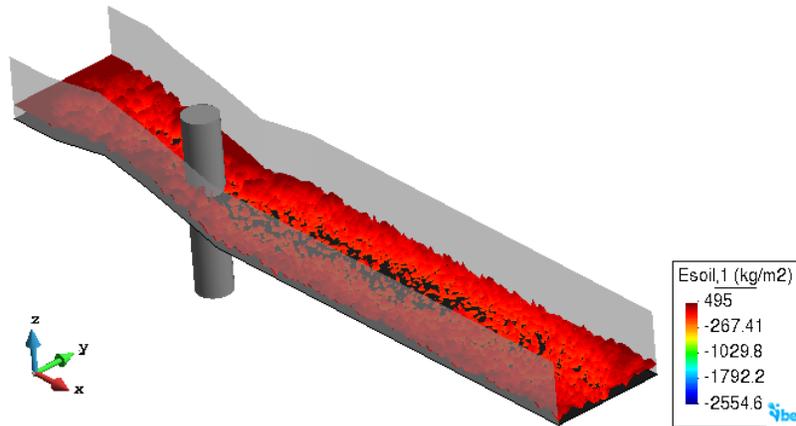


Adicionalmente, las imágenes presentadas en las **Figura 39** y **Figura 40** ofrecen una perspectiva visual detallada de los procesos de erosión y sedimentación generados en el canal por la interacción del flujo con la pila 2. En la **Figura 39**, se pueden observar los patrones de distribución de material erosionado, destacando las áreas de pérdida significativa de sedimentos que configuran las principales zonas de socavación. Por su parte, la **Figura 40** proporciona una

vista lateral que resalta la extensión y profundidad de las alteraciones en el lecho, permitiendo identificar con precisión las regiones afectadas. Estas representaciones tridimensionales son fundamentales para comprender de manera integral la dinámica del flujo y su efecto directo sobre la estabilidad del lecho en presencia de estructuras hidráulicas.

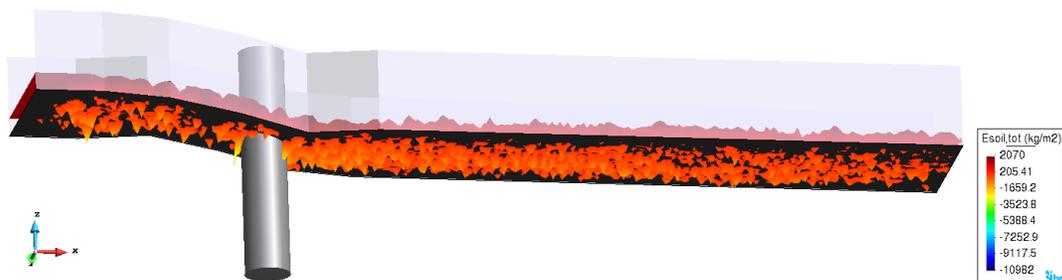
**Figura 39**

*Visualización tridimensional de la erosión del lecho en el canal*



**Figura 40**

*Alteraciones del lecho del canal generadas por la Pila 2*

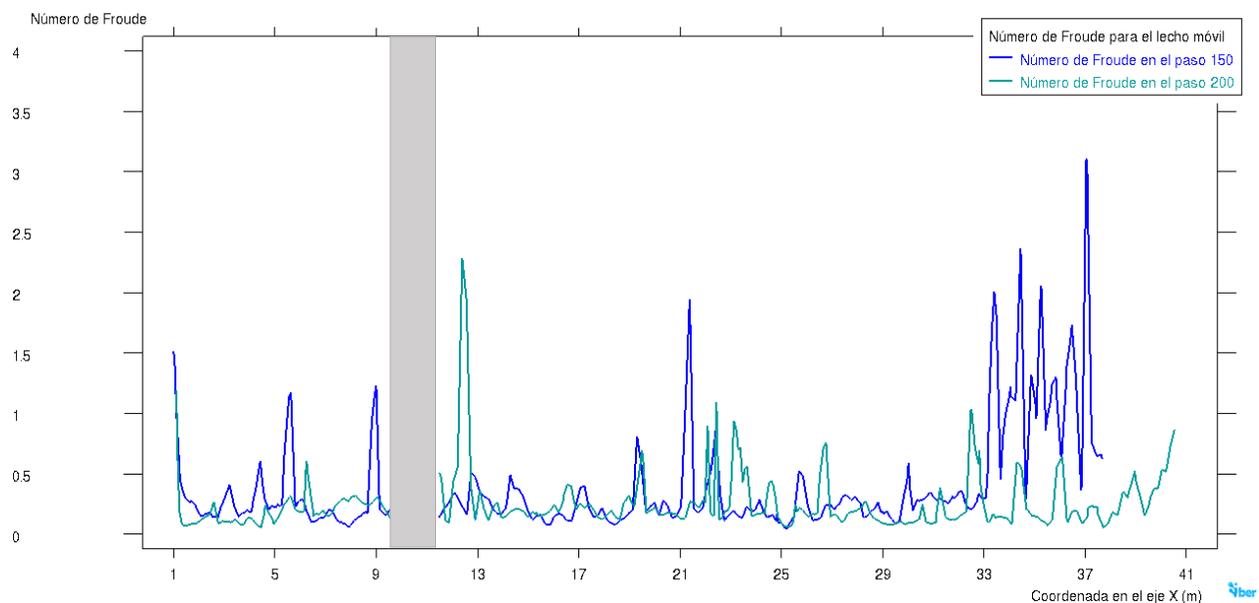


El análisis del número de Froude para el lecho móvil, representado en la , permite identificar las variaciones del flujo en función del paso de tiempo (150 y 200 segundos) y su impacto en el canal con la pila 2. En esta representación, se observan picos recurrentes de este parámetro a lo largo del dominio, lo que indica zonas donde el flujo adquiere mayor velocidad y energía cinética. Estos valores elevados se concentran principalmente en las proximidades de la pila, tanto aguas arriba como aguas abajo, reflejando la interacción directa entre el flujo y la estructura.

En las coordenadas cercanas a la pila 2 (aproximadamente entre 9 y 13 metros en el eje X), los picos del número de Froude son más pronunciados, lo que evidencia la aceleración del flujo al aproximarse y rodear la estructura. Aguas abajo, entre las coordenadas 21 y 37 metros, se observan oscilaciones significativas del número de Froude, relacionadas con los patrones de recirculación y la disipación de energía. Estas fluctuaciones reflejan un flujo menos uniforme debido a las alteraciones generadas por la pila, que redistribuyen la energía en esta región.

Este análisis confirma cómo la presencia de la estructura y las características del lecho móvil condicionan el comportamiento del flujo, creando zonas de alta energía que pueden contribuir a la erosión localizada y zonas de menor energía propensas a la sedimentación. Los valores oscilatorios del número de Froude resaltan la complejidad del flujo en estas condiciones, proporcionando una base sólida para entender los procesos hidráulicos en el canal y su relación con la estabilidad del sistema. Este resultado complementa los hallazgos previos, destacando la importancia de analizar conjuntamente la dinámica del flujo, la interacción estructural y los cambios en el lecho.

**Figura 41**  
*Número de Froude en el canal con la pila 2 y lecho móvil*



### 4.3. Caso 3: Dimensionamiento de estructuras

La **Figura 42** ilustra los cambios en la elevación del lecho móvil del canal en función del tiempo de simulación, considerando la influencia de una compuerta ubicada en la coordenada 15 del eje X. A medida que avanzan los pasos de simulación (100, 150, 200 y 250 segundos), se observa cómo la estructura modifica significativamente la dinámica del flujo y la distribución de sedimentos en el canal.

En el paso 100, el estancamiento generado por la compuerta limita el alcance del flujo sedimentario hasta aproximadamente la coordenada 17, mientras que en los pasos siguientes (150, 200 y 250), este alcance se extiende progresivamente hasta las coordenadas 19, 22 y 27, respectivamente. Este comportamiento refleja cómo la acumulación de sedimentos avanza aguas abajo a medida que el sistema hidráulico se estabiliza y redistribuye la energía del flujo.

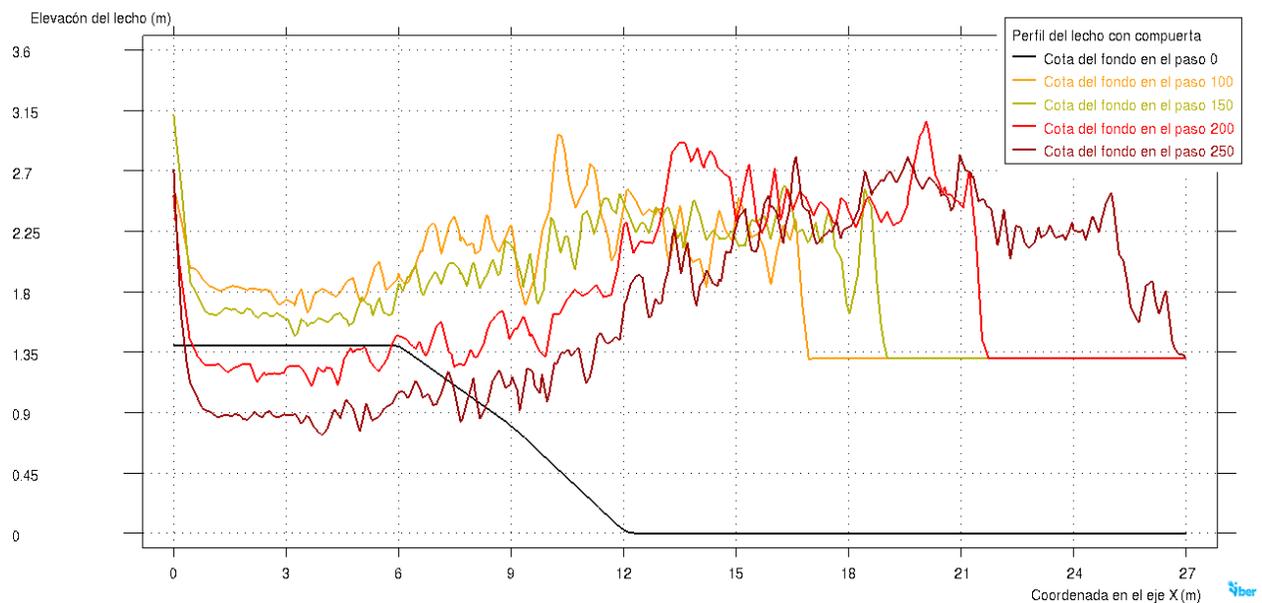
Aguas arriba de la compuerta, hasta aproximadamente la coordenada 8, se identifica una erosión marcada en el lecho del canal. Este proceso erosivo aumenta con el paso del tiempo, indicando una mayor capacidad del flujo para remover material en esta zona debido a la aceleración y las características del flujo antes de alcanzar la compuerta. Por otro lado, entre las coordenadas 8 y 15, los resultados muestran una acumulación significativa de sedimentos, atribuible al estancamiento generado por la compuerta, que reduce la velocidad del flujo y favorece la deposición del material transportado.

En el último paso de simulación, correspondiente a los 250 segundos, los sedimentos han avanzado más allá de la compuerta, distribuyéndose progresivamente a lo largo de la longitud restante del canal. Este fenómeno indica que el sistema comienza a alcanzar un estado de redistribución generalizada, donde las condiciones de flujo y sedimentación tienden a estabilizarse.

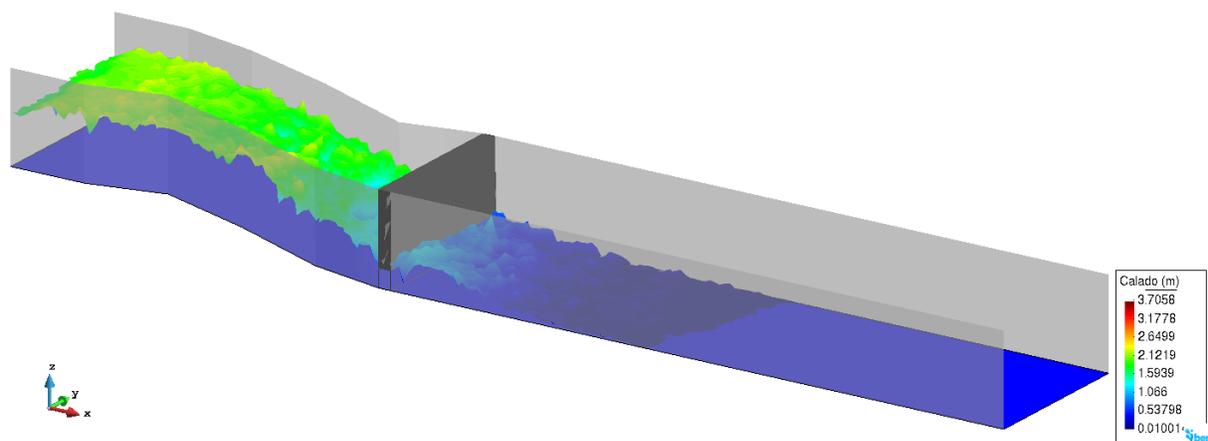
Este análisis destaca cómo la compuerta actúa como un elemento clave que altera significativamente la dinámica sedimentaria del canal, generando un balance entre erosión aguas arriba y acumulación antes y después de la estructura. La representación tridimensional de la cota del fondo, representada en la **Figura 43**, permite visualizar con claridad estas alteraciones. En la

vista tridimensional, la acumulación de sedimentos aguas arriba de la compuerta se refleja en un incremento de la cota del lecho, representado en tonos verdes, lo que evidencia cómo el flujo pierde energía al encontrarse con la estructura, favoreciendo la deposición de material transportado. Este comportamiento se concentra principalmente en las inmediaciones de la compuerta, mientras que aguas abajo, los sedimentos se redistribuyen progresivamente.

**Figura 42**  
*Perfil del lecho móvil para el canal con una compuerta*

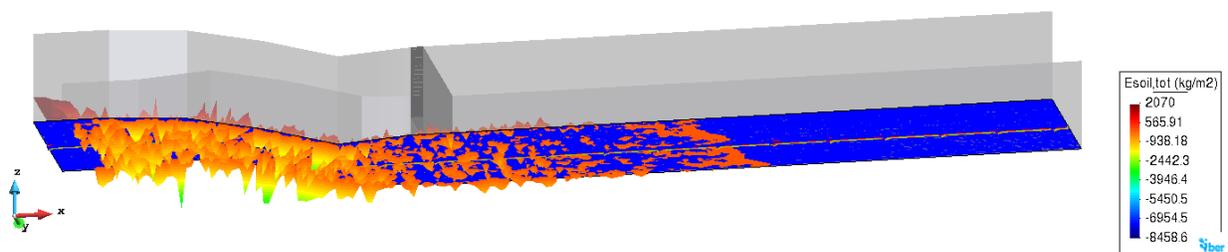


**Figura 43**  
*Vista 3D de la cota del agua en el canal con una compuerta*



Por otro lado, la vista lateral tridimensional, representada en la **Figura 44**, complementa este análisis al mostrar cómo las áreas de remoción de material aguas arriba de la compuerta se reflejan en las regiones con cota más baja, representadas en tonos cálidos. Estas zonas corresponden a áreas de alta erosión, donde el flujo acelerado provoca la mayor remoción del lecho del canal. La transición entre estas áreas de erosión y acumulación evidencia el balance dinámico generado por la compuerta, alterando significativamente el comportamiento del flujo y los sedimentos a lo largo del canal. Estas representaciones son fundamentales para identificar áreas críticas y diseñar estrategias de manejo que mitiguen los efectos negativos de la erosión y la sedimentación en canales con estructuras hidráulicas similares

**Figura 44**  
*Vista 3D de erosión en el canal con una compuerta*



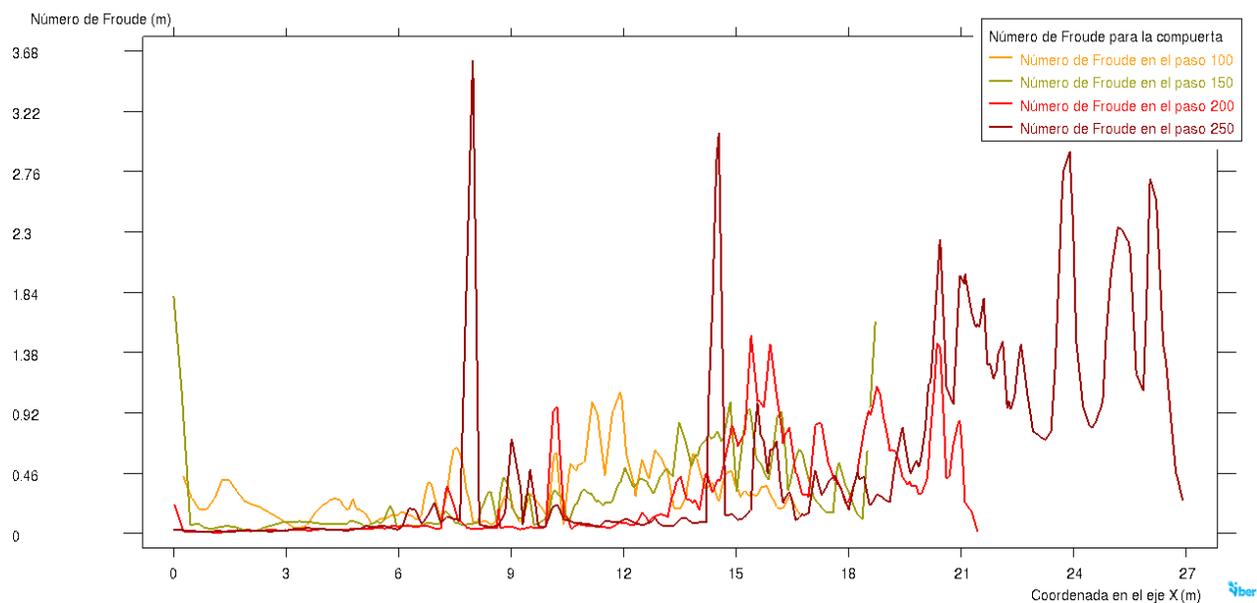
El análisis del número de Froude en el canal con la compuerta muestra cómo esta estructura modifica de manera significativa las condiciones hidráulicas a lo largo del canal (**Figura 45**). Aguas arriba, hasta aproximadamente la coordenada 8, se observan picos marcados en los valores de Froude, especialmente en los pasos de simulación 150 y 200, lo que indica un aumento en la energía cinética del flujo debido a la restricción impuesta por la compuerta. Este comportamiento refleja una aceleración progresiva del flujo en esta región, a medida que se genera una transición hacia un régimen más energético.

A partir de la coordenada 15, en la región aguas abajo de la compuerta, los valores de Froude exhiben fluctuaciones pronunciadas, particularmente en los pasos 200 y 250. Estas oscilaciones están asociadas a la disipación de energía y a los efectos de recirculación generados al superar la estructura. El flujo pierde gradualmente su energía cinética y tiende a estabilizarse en las

coordenadas finales del dominio, aunque persisten variaciones locales reflejadas en los valores irregulares de Froude.

Este análisis evidencia cómo la compuerta afecta tanto la aceleración del flujo aguas arriba como su redistribución aguas abajo. La combinación de estas dinámicas resalta la importancia de evaluar los regímenes de flujo y las transiciones generadas, para garantizar un diseño eficiente que considere los impactos sobre la estabilidad del canal y la funcionalidad del sistema hidráulico.

**Figura 45**  
*Número de Froude en el canal con una compuerta*



---

## 5 Conclusiones

Las conclusiones de este estudio resaltan cómo el desarrollo de casos prácticos utilizando el software Iber ofrece un recurso valioso para comprender y analizar la interacción entre el flujo de agua y las estructuras hidráulicas. Aunque estos casos no fueron implementados directamente en aulas de clase, se han diseñado como herramientas disponibles para futuros procesos de enseñanza, proporcionando un enfoque práctico que facilita la visualización y análisis de fenómenos hidráulicos complejos.

El desarrollo de los casos permitió simular fenómenos como la interacción del flujo con pilas y compuertas, así como los procesos de erosión y sedimentación asociados a estas estructuras. Estas simulaciones brindan una base sólida para que los estudiantes puedan explorar cómo factores como la velocidad del flujo, el número de Froude y la geometría del canal afectan la estabilidad del lecho y el comportamiento hidráulico en distintos escenarios.

Además, estos casos prácticos aportan al aprendizaje del diseño y dimensionamiento de estructuras, al evidenciar cómo las condiciones de flujo y la geometría influyen en el desempeño del canal. Las visualizaciones tridimensionales generadas y los análisis obtenidos facilitan a futuros usuarios del recurso la interpretación integral de las dinámicas del flujo, promoviendo una comprensión práctica que complementa la formación teórica.

En conclusión, este recurso se constituye como una herramienta didáctica que quedará disponible para su integración en la enseñanza de la ingeniería, permitiendo a los estudiantes y docentes explorar y analizar de manera práctica y visual los fenómenos asociados al diseño de estructuras hidráulicas bajo condiciones controladas y realistas.

---

## Referencias

- Cea Gómez, L., Bladé i Castellet, E., Sanz-Ramos, M., Bermúdez Pita, M., & Mateos Alonso, Á. (2019). *Iber applications basic guide*.
- Crookston, B. M., Smith, V. B., Welker, A., & Campbell, D. B. (2020). Teaching Hydraulic Design: Innovative Learning in the Classroom and the Workplace. *Journal of Hydraulic Engineering*, *146*(3), 04020006. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001715](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001715)
- Iberaula*. (s. f.). Recuperado 30 de julio de 2024, de <https://iberaula.es/50/the-project/presentation>
- MacVicar, B., Clow, A., Muirhead, C., Al-Hammoud, R., & Craig, J. (2020). Design, Construction, and Destruction in the Classroom: Experiential Learning with Earthen Dams. *Journal of Hydraulic Engineering*, *146*(6), 04020037. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001745](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001745)
- Pais, A. (2020). *Coronavirus: 4 países de América Latina que lograron aplicar estrategias exitosas de educación a distancia ante la pandemia—BBC News Mundo* [News]. BBC News Mundo. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-52375867>
- Sanz-Ramos, M., Cea, L., López-Gómez, D., Sañudo, E., Corestein, G., García-Alén, G., & Aragón-Hernández, J. (2022). Manual de referencia e interfaz de usuario de las nuevas implementaciones, Iber. *More than 2D Hydraulic modelling*. [https://www.scipedia.com/public/Sanz-Ramos\\_et\\_al\\_2022b](https://www.scipedia.com/public/Sanz-Ramos_et_al_2022b)
- Tullis, B. P., & Barfuss, S. L. (2020). Recommendations for Teaching a Successful Design-Based Course: Hydraulic Structure Design. *Journal of Hydraulic Engineering*, *146*(2), 04019063. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001689](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001689)

---

Van Rijn, L. C. (2007). Unified View of Sediment Transport by Currents and Waves. II: Suspended Transport. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(6), 668-689.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2007\)133:6\(668\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2007)133:6(668))