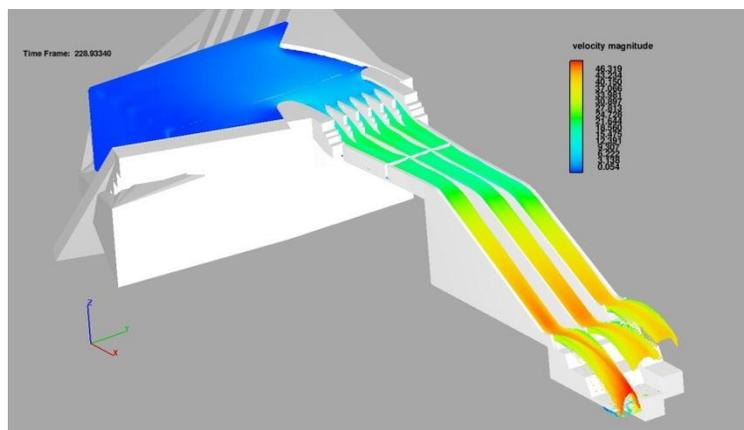

ESTUDIO CON EL ANÁLISIS DE ESCENARIOS DE MODELACIÓN DEL CANAL DE LLAMADA DEL VERTEDOR DE LA P.H. LA YESCA

Informe Final

COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD
COORDINACIÓN DE PROYECTOS HIDROELÉCTRICOS
GERENCIA TÉCNICA DE PROYECTOS HIDROELÉCTRICOS
CONVENIO: **CFE-IMTA: SC-CPH-17**

COORDINACION DE HIDRÁULICA
SUBCOORDINACIÓN DE HIDRÁULICA AMBIENTAL



Jorge Armando Laurel Castillo

Ariosto Aguilar Chávez

Septiembre 2011

Índice

| | |
|---|----|
| 1. Introducción | 1 |
| 2. Revisión y análisis de la información | 2 |
| 2.1 Geometría y elevaciones..... | 2 |
| 2.2 Mediciones en el laboratorio..... | 4 |
| 3. Modelación numérica del canal de llamada | 6 |
| 3.1 Pre-proceso..... | 6 |
| 3.2 Escenario de modelación 1. Canal de llamada sin fosa. | 8 |
| 3.3 Escenario de modelación 2. Canal de llamada con fosa. | 32 |
| 3.4 Comparación de resultados medidos contra simulados. | 54 |
| 4. Modelación numérica de todo el sistema | 63 |
| 5. Conclusiones | 75 |
| Referencias | 76 |
| Anexo. Generación de archivos STL a través de datos topográficos (XYZ)..... | 77 |

Lista de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 Vista en planta del canal de llamada del P.H. La Yesca. | 3 |
| Figura 2.2 Sólidos tridimensionales del P.H. La Yesca proporcionados por CFE. | 3 |
| Figura 2.3 Ubicación de los puntos de medición en el modelo de laboratorio a escala reducida (1:75). | 4 |
| Figura 3.1 Geometría para la simulación hidrodinámica del canal de llamada del P.H. La Yesca. .. | 7 |
| Figura 3.2 Vista de la malla compuesta por tres bloques. | 8 |
| Figura 3.3 Implementación de la condición de frontera en la cara X mínima. | 9 |
| Figura 3.4 Variación de la superficie libre del agua en la frontera aguas arriba. | 9 |
| Figura 3.5 Monitoreo del gasto en los canales durante el tiempo de simulación. Escenario 1. | 9 |
| Figura 3.6 Vista de la superficie libre del agua a condición casi permanente con respecto a la variación del gasto en los canales de descarga. | 10 |
| Figura 3.7 Elevación del nivel de la superficie libre del agua. | 11 |
| Figura 3.8 Localización de las secciones de corte para los mapas de contorno. | 11 |
| Figura 3.9 Distribución de la presión en la sección 1. | 13 |
| Figura 3.10 Distribución de la presión en la sección 2. | 13 |
| Figura 3.11 Distribución de la presión en la sección 3. | 14 |
| Figura 3.12 Distribución de la presión en la sección 4. | 14 |
| Figura 3.13 Distribución de la presión en la sección 5. | 15 |
| Figura 3.14 Distribución de la presión en la sección 6. | 15 |
| Figura 3.15 Distribución de la presión en la sección 7. | 16 |
| Figura 3.14 Distribución de la presión en la sección 8. | 16 |
| Figura 3.14 Distribución de la presión en la sección 9. | 17 |
| Figura 3.15 Distribución de la velocidad en X en la sección 1. | 17 |
| Figura 3.16 Distribución de la velocidad en X en la sección 2. | 18 |
| Figura 3.17 Distribución de la velocidad en X en la sección 3. | 18 |
| Figura 3.18 Distribución de la velocidad en X en la sección 4. | 19 |
| Figura 3.19 Distribución de la velocidad en X en la sección 5. | 19 |
| Figura 3.20 Distribución de la velocidad en X en la sección 6. | 20 |
| Figura 3.20 Distribución de la velocidad en X en la sección 7. | 20 |
| Figura 3.20 Distribución de la velocidad en X en la sección 8. | 21 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.20 Distribución de la velocidad en X en la sección 9. | 21 |
| Figura 3.21 Distribución de la velocidad en Y en la sección 1. | 22 |
| Figura 3.22 Distribución de la velocidad en Y en la sección 2. | 22 |
| Figura 3.23 Distribución de la velocidad en Y en la sección 3. | 23 |
| Figura 3.24 Distribución de la velocidad en Y en la sección 4. | 23 |
| Figura 3.25 Distribución de la velocidad en Y en la sección 5. | 24 |
| Figura 3.26 Distribución de la velocidad en Y en la sección 6. | 24 |
| Figura 3.26 Distribución de la velocidad en Y en la sección 7. | 25 |
| Figura 3.26 Distribución de la velocidad en Y en la sección 8. | 25 |
| Figura 3.26 Distribución de la velocidad en Y en la sección 9. | 26 |
| Figura 3.27 Distribución de la velocidad en Z en la sección 1. | 26 |
| Figura 3.28 Distribución de la velocidad en Z en la sección 2. | 27 |
| Figura 3.29 Distribución de la velocidad en Z en la sección 3. | 27 |
| Figura 3.30 Distribución de la velocidad en Z en la sección 4. | 28 |
| Figura 3.31 Distribución de la velocidad en Z en la sección 5. | 28 |
| Figura 3.32 Distribución de la velocidad en Z en la sección 6. | 29 |
| Figura 3.32 Distribución de la velocidad en Z en la sección 7. | 29 |
| Figura 3.32 Distribución de la velocidad en Z en la sección 8. | 30 |
| Figura 3.32 Distribución de la velocidad en Z en la sección 9. | 30 |
| Figura 3.33 Vista en planta de las líneas de corriente con magnitud de velocidad. | 31 |
| Figura 3.34 Perspectiva de las líneas de corriente con magnitud de velocidad. | 32 |
| Figura 3.35 Geometría de simulación para el escenario 2. | 33 |
| Figura 3.36 Monitoreo del gasto en los canales durante el tiempo de simulación. Escenario 2. | 33 |
| Figura 3.37 Elevación de la superficie libre del agua. Escenario 2. | 34 |
| Figura 3.38 Distribución de la presión en la sección 1. Escenario 2. | 35 |
| Figura 3.39 Distribución de la presión en la sección 2. Escenario 2. | 35 |
| Figura 3.40 Distribución de la presión en la sección 3. Escenario 2. | 36 |
| Figura 3.41 Distribución de la presión en la sección 4. Escenario 2. | 36 |
| Figura 3.42 Distribución de la presión en la sección 5. Escenario 2. | 37 |
| Figura 3.43 Distribución de la presión en la sección 6. Escenario 2. | 37 |
| Figura 3.43 Distribución de la presión en la sección 7. Escenario 2. | 38 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.43 Distribución de la presión en la sección 8. Escenario 2. | 38 |
| Figura 3.43 Distribución de la presión en la sección 9. Escenario 2. | 39 |
| Figura 3.44 Distribución de la velocidad en X en la sección 1. Escenario 2..... | 39 |
| Figura 3.45 Distribución de la velocidad en X en la sección 2. Escenario 2..... | 40 |
| Figura 3.46 Distribución de la velocidad en X en la sección 3. Escenario 2..... | 40 |
| Figura 3.47 Distribución de la velocidad en X en la sección 4. Escenario 2..... | 41 |
| Figura 3.48 Distribución de la velocidad en X en la sección 5. Escenario 2..... | 41 |
| Figura 3.49 Distribución de la velocidad en X en la sección 6. Escenario 2..... | 42 |
| Figura 3.49 Distribución de la velocidad en X en la sección 7. Escenario 2..... | 42 |
| Figura 3.49 Distribución de la velocidad en X en la sección 8. Escenario 2..... | 43 |
| Figura 3.49 Distribución de la velocidad en X en la sección 9. Escenario 2..... | 43 |
| Figura 3.50 Distribución de la velocidad en Y en la sección 1. Escenario 2..... | 44 |
| Figura 3.51 Distribución de la velocidad en Y en la sección 2. Escenario 2..... | 44 |
| Figura 3.52 Distribución de la velocidad en Y en la sección 3. Escenario 2..... | 45 |
| Figura 3.53 Distribución de la velocidad en Y en la sección 4. Escenario 2..... | 45 |
| Figura 3.54 Distribución de la velocidad en Y en la sección 5. Escenario 2..... | 46 |
| Figura 3.55 Distribución de la velocidad en Y en la sección 6. Escenario 2..... | 46 |
| Figura 3.55 Distribución de la velocidad en Y en la sección 7. Escenario 2..... | 47 |
| Figura 3.55 Distribución de la velocidad en Y en la sección 8. Escenario 2..... | 47 |
| Figura 3.55 Distribución de la velocidad en Y en la sección 9. Escenario 2..... | 48 |
| Figura 3.56 Distribución de la velocidad en Z en la sección 1. Escenario 2..... | 48 |
| Figura 3.57 Distribución de la velocidad en Z en la sección 2. Escenario 2..... | 49 |
| Figura 3.58 Distribución de la velocidad en Z en la sección 3. Escenario 2..... | 49 |
| Figura 3.59 Distribución de la velocidad en Z en la sección 4. Escenario 2..... | 50 |
| Figura 3.60 Distribución de la velocidad en Z en la sección 5. Escenario 2..... | 50 |
| Figura 3.61 Distribución de la velocidad en Z en la sección 6. Escenario 2..... | 51 |
| Figura 3.61 Distribución de la velocidad en Z en la sección 7. Escenario 2..... | 51 |
| Figura 3.61 Distribución de la velocidad en Z en la sección 8. Escenario 2..... | 52 |
| Figura 3.61 Distribución de la velocidad en Z en la sección 9. Escenario 2..... | 52 |
| Figura 3.62 Vista en planta de las líneas de corriente. Escenario 2..... | 53 |
| Figura 3.63 Perspectiva de las líneas de corriente. Escenario 2..... | 54 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.64 Comparación de la elevación de la superficie libre en la zona de la depresión..... | 54 |
| Figura 3.65 Variación del nivel de la superficie libre del agua a lo largo del eje <i>a</i> | 55 |
| Figura 3.66 Variación del nivel de la superficie libre del agua a lo largo del eje <i>b</i> | 56 |
| Figura 3.67 Variación del nivel de la superficie libre del agua a lo largo del eje <i>c</i> | 56 |
| Figura 3.68 Variación del nivel de la superficie libre del agua a lo largo del eje <i>d</i> | 57 |
| Figura 3.69 Perfiles de velocidad para las posiciones a-1, a-2 y a-3. | 58 |
| Figura 3.70 Perfiles de velocidad para las posiciones a-4, a-5 y a-6. | 58 |
| Figura 3.71 Perfiles de velocidad para las posiciones a-7, b-1 y b-2. | 59 |
| Figura 3.72 Perfiles de velocidad para las posiciones b-3, b-4 y b-5. | 59 |
| Figura 3.73 Perfiles de velocidad para las posiciones b-6, b-7 y c-1..... | 60 |
| Figura 3.74 Perfiles de velocidad para las posiciones c-2, c-3 y c-4..... | 60 |
| Figura 3.75 Perfiles de velocidad para las posiciones c-5, c-6 y c-7..... | 61 |
| Figura 3.76 Perfiles de velocidad para las posiciones c-8, d-1 y d-2..... | 61 |
| Figura 3.77 Perfiles de velocidad para las posiciones d-3, d-4 y d-5. | 62 |
| Figura 3.78 Perfiles de velocidad para las posiciones d-6, d-7 y d-8. | 62 |
| Figura 3.79 Perfiles de velocidad para las posiciones d-9, d-10, d-11 y d-12. | 63 |
| Figura 4.1 Vista XY de los bloques interconectados para la simulación. | 64 |
| Figura 4.2 Vista XZ de los bloques interconectados para la simulación..... | 65 |
| Figura 4.3 Geometría utilizada para la simulación de todo el sistema. | 66 |
| Figura 4.4 Inicialización del dominio con fluido..... | 66 |
| Figura 4.5 Condición de frontera en <i>Xmin</i> | 67 |
| Figura 4.6 Masa del agua a los 116.8 s de simulación. Bloques 1 al 4. | 68 |
| Figura 4.7 Masa del agua a los 210.4 s de simulación. Bloques 1 al 5. | 68 |
| Figura 4.8 Masa del agua a los 228.9 s de simulación. Bloques 1 al 6. | 69 |
| Figura 4.9 Distribución de velocidades en la superficie para todo el sistema..... | 69 |
| Figura 4.10 Distribución de presiones al centro del canal 1. Bloques 4,5 y 6..... | 70 |
| Figura 4.11 Distribución de presiones al centro del canal 2. Bloques 4,5 y 6..... | 71 |
| Figura 4.12 Distribución de presiones al centro del canal 3. Bloques 4,5 y 6..... | 71 |
| Figura 4.13 Distribución de velocidades al centro del canal 1. Bloques 4,5 y 6. | 72 |
| Figura 4.14 Distribución de velocidades al centro del canal 2. Bloques 4,5 y 6. | 72 |
| Figura 4.15 Distribución de velocidades al centro del canal 3. Bloques 4,5 y 6. | 73 |

| | |
|---|----|
| Figura 4.16 Número de Thoma al centro de la rápida del canal 1.Bloques 5 y 6. | 74 |
| Figura 4.17 Número de Thoma al centro de la rápida del canal 2.Bloques 5 y 6. | 74 |
| Figura 4.18 Número de Thoma al centro de la rápida del canal 3.Bloques 5 y 6. | 74 |
| Figura A.1 Selección del archivo XYZ de entrada en el programa xyz2stl. | 78 |
| Figura A.2 Selección del archivo stl de salida en el programa xyz2stl. | 78 |
| Figura A.3 Instrucción final en el programa xyz2stl..... | 79 |
| Figura A.4 Visualización del <i>stl</i> generado a través del programa xyz2stl..... | 79 |

1. Introducción

Tradicionalmente, las pruebas para determinar el funcionamiento hidráulico en vertedores de excedencia han sido llevadas a cabo mediante modelos físicos a escala reducida en laboratorio. Sin embargo, para grandes obras las escalas ideales requieren el uso de grandes espacios para la construcción de los modelos (Vergara, 1993) y caudales importantes, y dado a que los recintos de los laboratorios son limitados se tienen que hacer uso de escalas grandes. Ante esta situación, las fuerzas viscosas pueden considerarse como una variable espuria, que puede influir en los resultados del funcionamiento hidrodinámico del prototipo que se está evaluando.

Ante la disyuntiva de la necesidad de evaluar el funcionamiento del prototipo y la posibilidad de tener una correlación no asertiva en el modelo reducido, actualmente existe una alternativa para la revisión del funcionamiento hidráulico mediante la modelación numérica del prototipo, sin la necesidad de introducir ninguna teoría de escalamiento.

En las dos últimas décadas se ha tenido un amplio desarrollo en las técnicas de simulación de flujo a superficie libre, de las cuales destacan los métodos de *level-set* (Sethian y Smereka, 2003; García *et al*, 2008), VOF (Hirt y Nichols, 1981) y los métodos de partículas (Dalrymple y Rogers, 2006; Oñate *et al* 2004; Laurel *et al*, 2009), lo cual hace posible realizar simulaciones numéricas completamente tridimensionales de obras hidráulicas mediante la Dinámica de Fluidos Computacional (DFC). Al respecto, existen diversos códigos tanto gratuitos como comerciales, como son: Ansys-CFX¹, Flow-3D² y OpenFOAM³, y algunos casos de estudio exitosos pueden encontrarse en Ho *et al* (2001), Espinosa *et al* (2008), Savage y Johnson (2008) y Musavi-Jahromi *et al* (2008).

¹<http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Fluid+Dynamics/ANSYS+CFX>

²<http://www.flow3d.com/>

³<http://www.openfoam.com/>

Con base a lo anterior, la CFE y el IMTA han decidido emprender un proyecto de simulación numérica del canal de llamada del Proyecto Hidroeléctrico (P.H.) “La Yesca”, con el cual se pretende conocer las capacidades de la modelación numérica para la evaluación del funcionamiento hidráulico de una obra de gran tamaño. Para medir las capacidades de la implementación del código numérico se harán comparaciones, entre los datos medidos en laboratorio y los obtenidos con la simulación numérica. Con estas comparaciones se definirán las potencialidades futuras de uso de los modelos de DFC, para evaluar la seguridad de las obras hidráulicas.

2. Revisión y análisis de la información

2.1 Geometría y elevaciones

La geometría para alimentar al modelo numérico se elaboró tomando como base los dibujos en Autocad proporcionados por la CFE. En la Figura 2.1 se muestra una parte de uno de los planos proporcionados que contiene las curvas de nivel en la zona de estudio, así como también detalles de la geometría del canal de llamada, y en general de la obra de excedencias.

Dentro de la información proporcionada, por la CFE, también se encuentran algunos sólidos tridimensionales de algunas partes de la obra de excedencia (Figura 2.2), a los cuales se les hicieron las adecuaciones necesarias para transformarlos al formato STL, para ser utilizado en el modelo numérico.

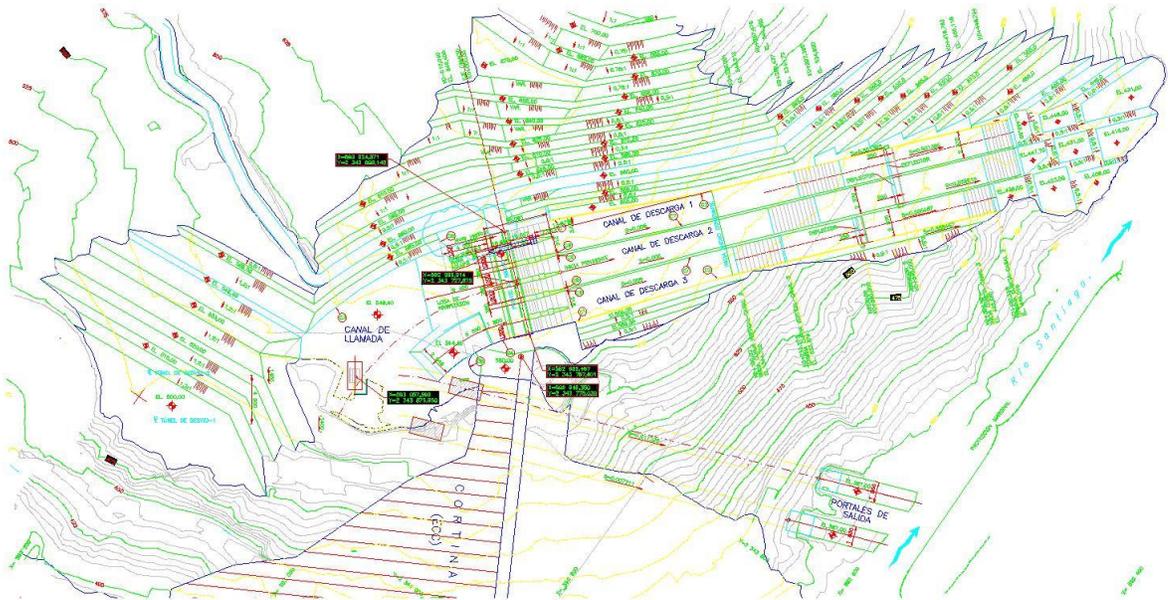


Figura 2.1 Vista en planta del canal de llamada del P.H. La Yesca.

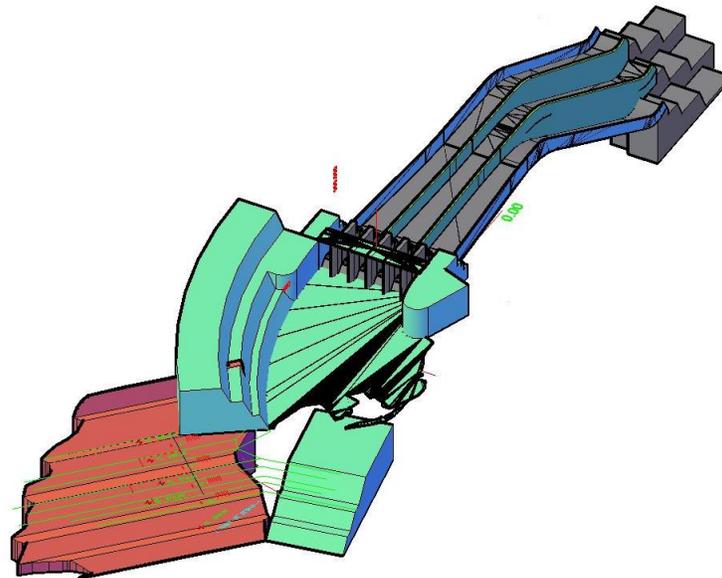


Figura 2.2 Sólidos tridimensionales del P.H. La Yesca proporcionados por CFE.

2.2 Mediciones en el laboratorio

Para evaluar la potencialidad del uso de los códigos de DFC, la CFE solicitó realizar una comparación entre los datos de velocidad y nivel de la superficie libre del agua obtenidos mediante la simulación numérica contra datos medidos en el modelo físico a escala reducida. La Figura 2.3 muestra la ubicación de cinco ejes de medición, así como también la ubicación los puntos de medición a lo largo de cada uno de ellos. En las tablas 1,2 y 3 se muestran las distribuciones de velocidades y tirantes de las secciones a', b', c' y d', respectivamente. Cabe mencionar que los datos de las mediciones corresponden al diseño original y no se incluye el escenario de mejora posterior, que consistió en la introducción de una fosa para disminuir la desuniformidad transversal del tirante, aguas arriba del cimacio.

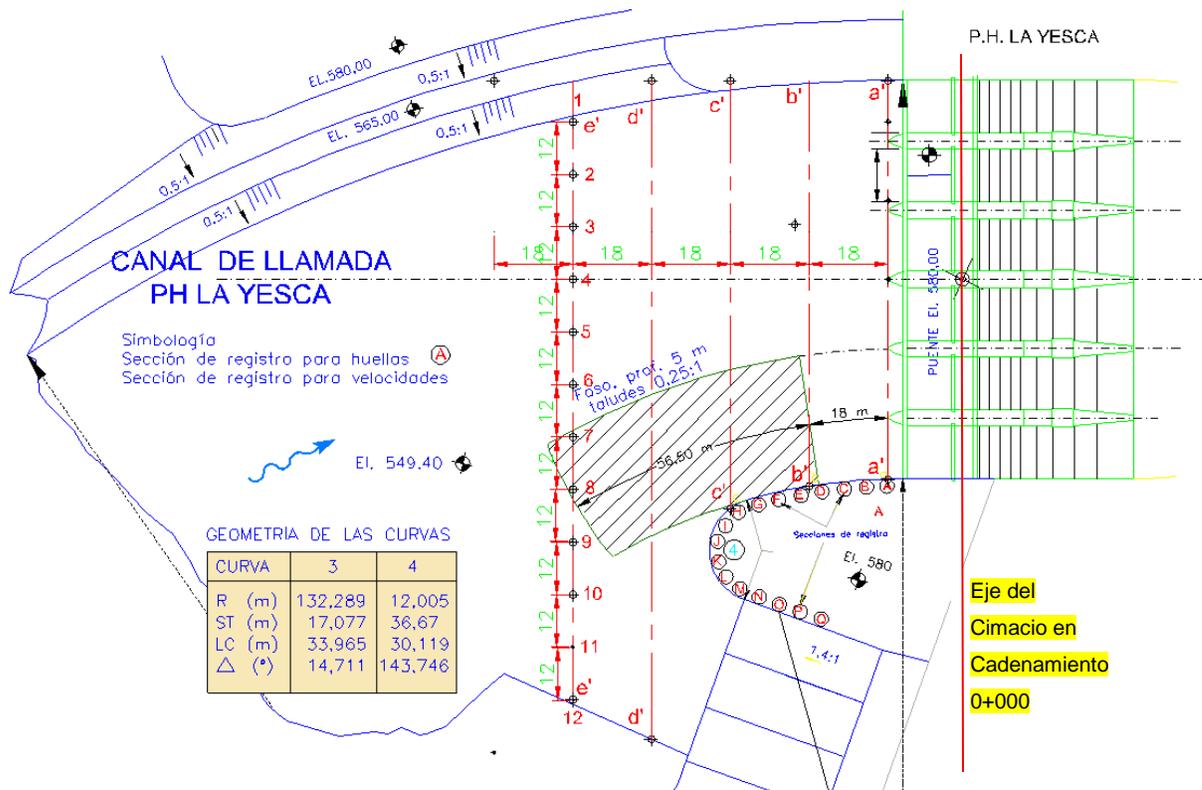


Figura 2.3 Ubicación de los puntos de medición en el modelo de laboratorio a escala reducida (1:75).

| Sección a | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|-------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------------------|-----------------|----------|------|
| Profundidad en, m (3) | Puntos de registro | | | | | | | Uniformidad del flujo | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | Tirante, promedio (4) | Velocidad media | Coriolis | Fr |
| | Velocidades en, m/s (2) | | | | | | | | | | |
| Plantilla | 5.579 | 5.626 | 5.441 | 5.441 | 6.953 | 6.953 | 5.987 | 27.53 | 6.20 | 0.99 | 0.15 |
| 0.2 | 5.735 | 5.569 | 4.959 | 4.959 | 5.466 | 6.466 | 7.859 | | | | |
| 0.4 | 5.879 | 6.064 | 5.720 | 5.737 | 5.917 | 6.965 | 7.859 | | | | |
| 0.6 | 5.879 | 6.121 | 5.838 | 5.797 | 6.478 | 6.959 | 7.750 | | | | |
| 0.8 | 6.394 | 6.052 | 5.988 | 5.890 | 6.484 | 7.011 | 7.740 | | | | |
| Superficial | 6.256 | 6.064 | 5.909 | 5.892 | 6.385 | 6.953 | 7.426 | | | | |
| Tirante | 27.550 | 27.950 | 27.850 | 27.860 | 27.620 | 26.890 | 26.980 | | | | |

Tabla 1. Distribución de velocidades y tirantes en la sección a.

| Sección b | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------------------|-----------------|----------|------|
| Profundidad en, m (3) | Puntos de registro (2) | | | | | | | Uniformidad del flujo | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | Tirante, promedio (4) | Velocidad media | Coriolis | Frud |
| | Velocidades en, m/s | | | | | | | | | | |
| Plantilla | 4.937 | 4.568 | 4.836 | 4.895 | 5.233 | 5.233 | 5.373 | 27.71 | 5.69 | 1.10 | 0.14 |
| 0.2 | 5.044 | 5.088 | 5.273 | 5.282 | 5.968 | 5.278 | 5.373 | | | | |
| 0.4 | 5.304 | 5.335 | 5.444 | 5.555 | 6.133 | 6.121 | 7.078 | | | | |
| 0.6 | 5.333 | 5.323 | 5.403 | 5.591 | 6.030 | 6.689 | 7.504 | | | | |
| 0.8 | 5.320 | 5.371 | 5.336 | 5.586 | 6.099 | 6.902 | 7.795 | | | | |
| Superficial | 5.321 | 5.353 | 5.295 | 5.598 | 6.070 | 6.848 | 7.871 | | | | |
| Tirante | 27.850 | 27.950 | 27.850 | 27.860 | 27.620 | 27.800 | 27.050 | | | | |

Tabla 2. Distribución de velocidades y tirantes en la sección b.

| Sección c | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------|------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------------------|-----------------|----------|------|
| Profundidad en, m (3) | Puntos de registro (2) | | | | | | | | Uniformidad del flujo | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | Tirante, promedio (4) | Velocidad media | Coriolis | Fr |
| | Velocidades en, m/s | | | | | | | | | | | |
| Plantilla | 2.998 | 2.741 | 3.838 | 4.777 | 2.963 | 1.145 | 1.514 | 1.150 | 27.60 | 5.72 | 1.22 | 0.15 |
| 0.2 | 4.283 | 4.465 | 4.761 | 4.778 | 4.789 | 5.145 | 6.009 | 8.810 | | | | |
| 0.4 | 4.548 | 4.673 | 4.838 | 5.038 | 5.189 | 5.722 | 6.437 | 8.204 | | | | |
| 0.6 | 4.568 | 4.619 | 4.787 | 5.007 | 5.290 | 6.055 | 6.580 | 8.204 | | | | |
| 0.8 | 4.546 | 4.688 | 4.768 | 4.945 | 5.330 | 5.997 | 6.804 | 8.120 | | | | |
| Superficial | 4.602 | 4.622 | 4.708 | 4.886 | 5.350 | 5.997 | 6.815 | 8.509 | | | | |
| Tirante | 27.780 | 27.980 | 27.960 | 27.950 | 27.840 | 27.650 | 26.980 | 26.870 | | | | |

Tabla 3. Distribución de velocidades y tirantes en la sección c.

| Sección d' | | | | | | | | | | | |
|-------------------|---------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------------------|-----------------|----------|------|
| Profundidad en, m | Puntos de registro | | | | | | | Uniformidad del flujo | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | Tirante, promedio | Velocidad media | Coriolis | Fr |
| | Velocidades en, m/s | | | | | | | | | | |
| Plantilla | 3.769 | 4.060 | 4.215 | 4.292 | 4.645 | 4.946 | 3.402 | 27.98 | 3.99 | 1.15 | 0.12 |
| 0.2 | 3.777 | 3.967 | 4.224 | 4.357 | 4.681 | 5.072 | 3.456 | | | | |
| 0.4 | 3.796 | 4.063 | 4.235 | 4.431 | 4.731 | 5.310 | 3.661 | | | | |
| 0.6 | 3.796 | 3.963 | 4.307 | 4.553 | 4.581 | 5.530 | 3.951 | | | | |
| 0.8 | 3.543 | 3.932 | 4.219 | 4.371 | 4.083 | 5.382 | 3.803 | | | | |
| Superficial | 6.717 | 3.932 | 5.016 | 4.371 | 3.716 | 3.142 | 2.002 | | | | |
| Tirante | 29.780 | 27.780 | 27.780 | 27.520 | 27.980 | 27.830 | 27.550 | | | | |

Tabla 4. Distribución de velocidades y tirantes en la sección d (parte 1).

| Sección d' | | | | | | | | | |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|-------------------|-----------------------|----------|------|
| Profundidad en, m | | | | | | Tirante, promedio | Uniformidad del flujo | | |
| | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | | Velocidad media | Coriolis | Fr |
| Plantilla | 2.811 | 2.694 | 2.811 | 5.325 | 2.694 | 27.98 | 3.99 | 1.15 | 0.12 |
| 0.2 | 2.914 | 2.622 | 2.914 | 5.321 | 2.622 | | | | |
| 0.4 | 2.899 | 2.359 | 2.899 | 5.446 | 2.359 | | | | |
| 0.6 | 2.872 | 2.547 | 2.872 | 5.251 | 2.547 | | | | |
| 0.8 | 2.726 | 2.608 | 2.726 | 3.857 | 2.608 | | | | |
| Superficial | 2.942 | 3.373 | 1.942 | 1.865 | 3.420 | | | | |
| Tirante | 27.650 | 27.980 | 27.980 | 27.980 | 27.980 | | | | |

Tabla 5. Distribución de velocidades y tirantes en la sección d (parte 2).

3. Modelación numérica del canal de llamada

La simulación numérica se realizó mediante el software Flow3D, el cual es uno de los programas mejor reconocidos para la simulación numérica de flujos a superficie libre de obras hidráulicas. En su manual de usuario (Flow3D, 2009) se describe de manera extensa las ecuaciones utilizadas así como también el método de solución para cada una de ellas.

Se plantearon dos escenarios de simulación, el primero un escenario base proporcionado por CFE, para el cual ya se tenían mediciones en un modelo físico a escala reducida; y el segundo, prácticamente la misma geometría pero con una fosa de cinco metros de profundidad localizada en la margen derecha del canal de llamada.

3.1 Pre-proceso

Para llevar a cabo la simulación numérica de ambos escenarios primeramente se complementó la información proporcionada por CFE, para posteriormente conformar el archivo con formato *stl* correspondiente a la geometría del canal de llamada junto con los cimacios, los canales de descarga ó rápidas y cubetas de lanzamiento (Figura 3.1).

En ambos escenarios de simulación del canal de llamada, se utilizó una malla con tres bloques interconectados de dimensiones uniformes ($dx=dy=dz$), con tamaños de cuatro, dos y un metro, respectivamente (Figura 3.2).

Para monitorear la variación temporal del gasto en cada uno de los canales, se colocó un *baffle* en cada uno ellos cerca de la frontera de salida de flujo (X_{max} en la Figura 3.2), a 118 metros aguas abajo de la cresta del cimacio.

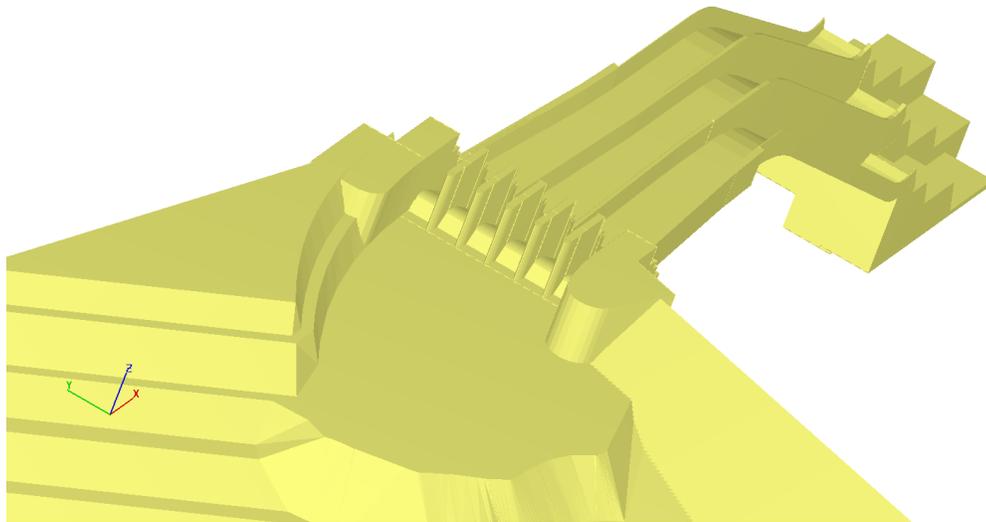


Figura 3.1 Geometría para la simulación hidrodinámica del canal de llamada del P.H. La Yesca.

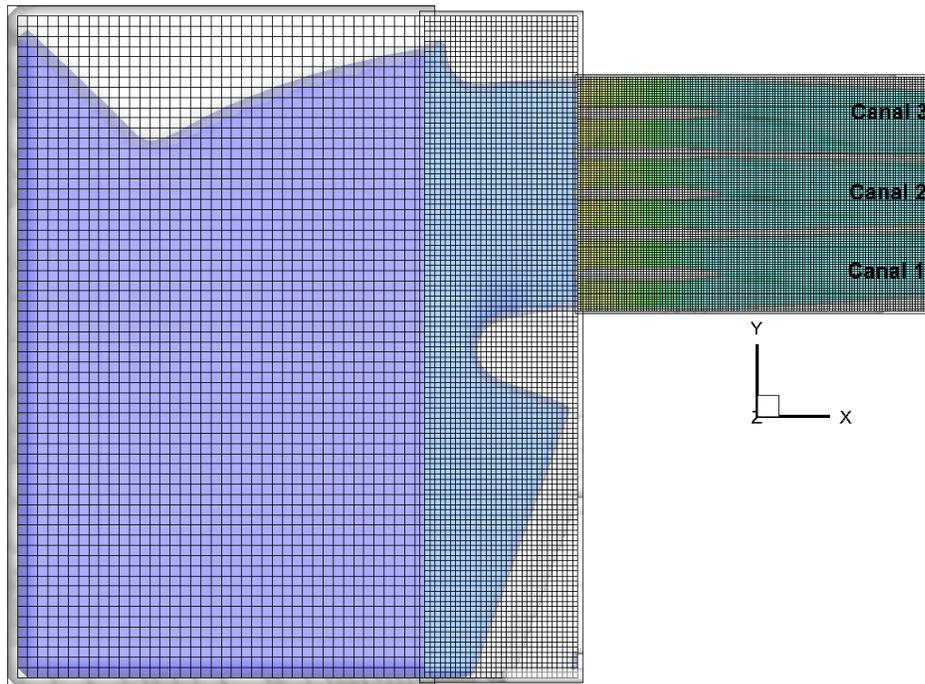


Figura 3.2 Vista de la malla compuesta por tres bloques.

3.2 Escenario de modelación 1. Canal de llamada sin fosa.

Una vez elaborado el pre-proceso, se estableció como condición de frontera una variación del nivel en la cara con X mínima, partiendo de un valor inicial hasta alcanzar el nivel de diseño (Figura 3.3), y una vez alcanzado éste nivel, se mantuvo durante el resto del tiempo de cómputo (Figura 3.5). Las simulaciones se detuvieron una vez que el gasto tuvo una variación mínima con respecto al tiempo en cada uno de los canales de descarga (Figura 3.5). El resultado de esta modelación indicó que el gasto sumado de los tres canales alcanzó un valor de **15,825 m³/s**, que difiere un **4.46%** del gasto de diseño obtenido en la pruebas de laboratorio (**15,119.0m³/s**), este dato es una validación de los resultados que se pueden obtener mediante la DFC.

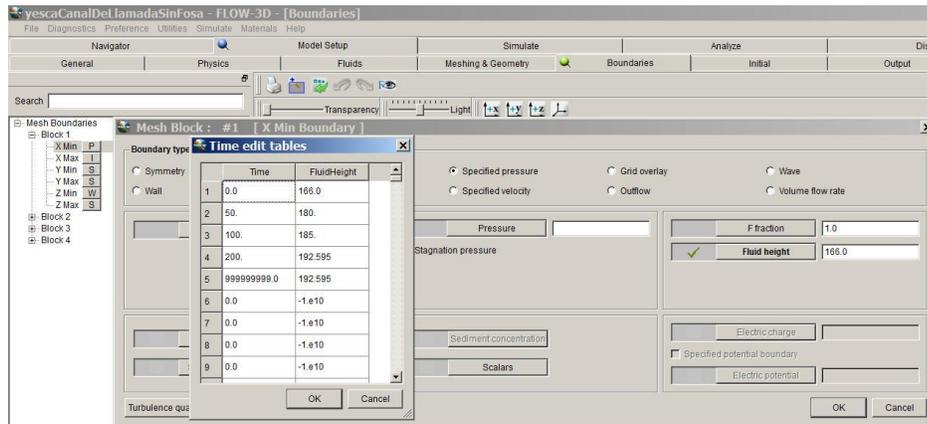


Figura 3.3 Implementación de la condición de frontera en la cara X mínima.

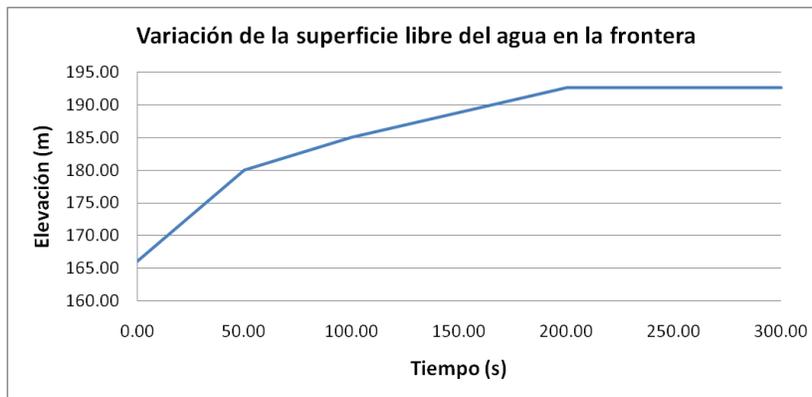


Figura 3.4 Variación de la superficie libre del agua en la frontera aguas arriba.

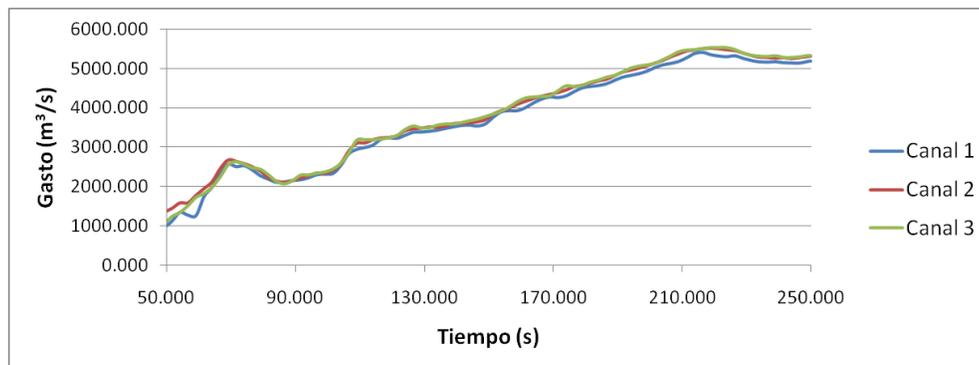


Figura 3.5 Monitoreo del gasto en los canales durante el tiempo de simulación. Escenario 1.

La Figura 3.6 muestra la masa de agua en el dominio de cálculo a los 250 segundos de simulación. Puede observarse que en la margen derecha del canal de llamada, se forma una depresión de la superficie libre del agua (Figura 3.7), este abatimiento es similar a lo reportado en el modelo de laboratorio. De acuerdo con los resultados de la simulación, la variación máxima entre el nivel de la superficie libre aguas arriba y el de la depresión es del orden de los 8 m. Para disminuir la magnitud de dicha depresión se propuso la construcción de la fosa, cuyo efecto se mostrará en el inciso siguiente.

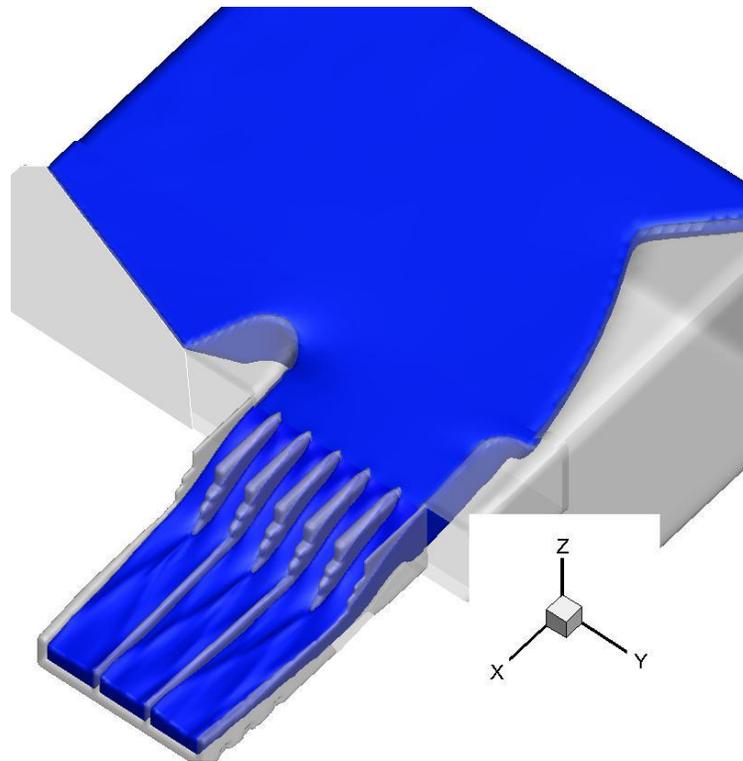


Figura 3.6 Vista de la superficie libre del agua a condición casi permanente con respecto a la variación del gasto en los canales de descarga.

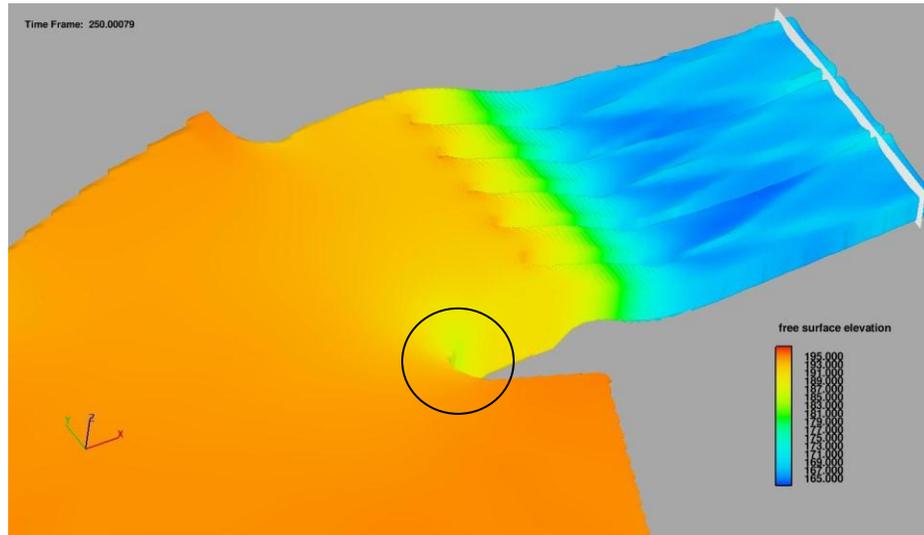


Figura 3.7 Elevación del nivel de la superficie libre del agua.

Con el fin de sintetizar la información, se hicieron seis secciones de corte longitudinal (1 a 6) y tres secciones transversales (7 a 9) para mostrar la variación de la presión y de las componentes de la velocidad en dichos planos para los bloques dos y tres (Figura 3.8).

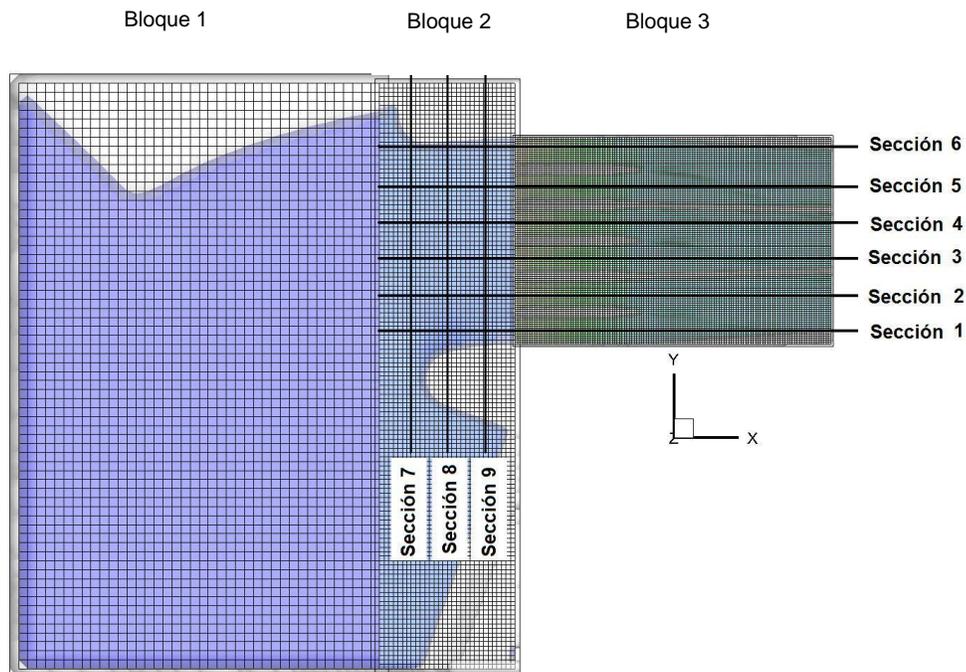


Figura 3.8 Localización de las secciones de corte para los mapas de contorno.

De la Figura 3.9 a la Figura 3.17 se muestran los campos de presión para cada una de las nueve secciones de corte. En las secciones 1 y 8 puede observarse la depresión que se presenta en la superficie libre del agua. Para todas las secciones de corte longitudinal observa la caída de presión sobre la parte cóncava del cimacio, sin embargo en ninguna de ellas se observan presiones negativas.

De la Figura 3.18 a la Figura 3.26 se muestran los campos de la velocidad en X junto con la proyección del vector velocidad sobre el plano de corte. En las secciones 1 a 6, la componente de velocidad en X es muy cercana a la magnitud de velocidad total, debido a la orientación de la geometría del vertedor, y en todas ellas puede observarse que aguas arriba del cimacio la magnitud de velocidad en X es del orden de 6 a 8 m/s, mientras que aguas abajo del mismo es del orden de 19 a 23 m/s. En las secciones de corte transversal (7 a 9), pueden observarse velocidades negativas en la zona de la cortina. Por otra parte observarse una asimetría en la distribución de la velocidad en X, mostrando los valores más altos en la zona donde se forma la depresión de la superficie libre del agua (Figura 3.25).

De la misma forma, de la Figura 3.27 a la Figura 3.35 se muestran las distribuciones de velocidades en Y junto con el vector velocidad proyectado sobre el plano de corte. De esta serie de figuras puede observarse que en ninguna de las secciones se cuenta con flujo totalmente paralelo al eje X, esto puede verse más claramente en la Figura 3.33. La magnitud de la componente de velocidad en Y logra alcanzar magnitudes importantes de velocidad de hasta 8 m/s en la margen derecha del canal de llamada (Figura 3.33), y del orden de los 3 m/s en la zona de la depresión de la superficie libre del agua (Figura 3.34).

Finalmente, de la Figura 3.36 a la Figura 3.44 se muestran los campos de velocidad en Z, en la cual puede observarse hasta un poco antes (aguas arriba) de la depresión de la superficie libre el flujo es prácticamente horizontal, posteriormente se tienen componentes importantes tanto negativas (Figura 3.42) como positivas (Figura 3.44) en la margen

derecha entre la depresión y el cimacio. Las componentes de velocidad en Z más significativas se presentan en el cimacio.

Sección 1

Presión (Pa)

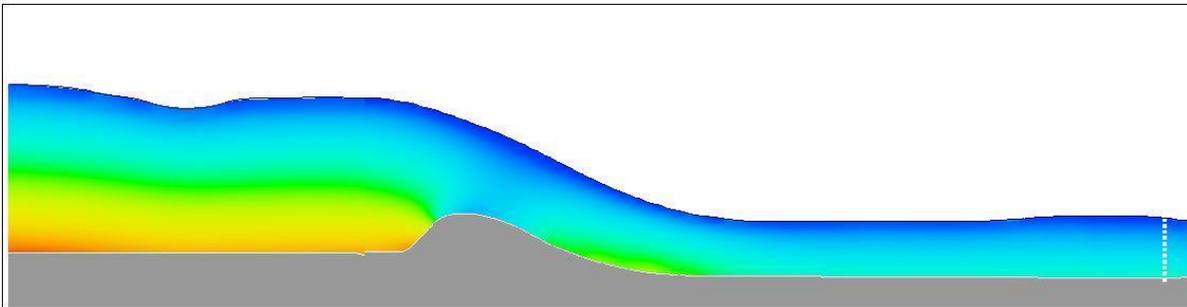


Figura 3.9 Distribución de la presión en la sección 1.

Sección 2

Presión (Pa)

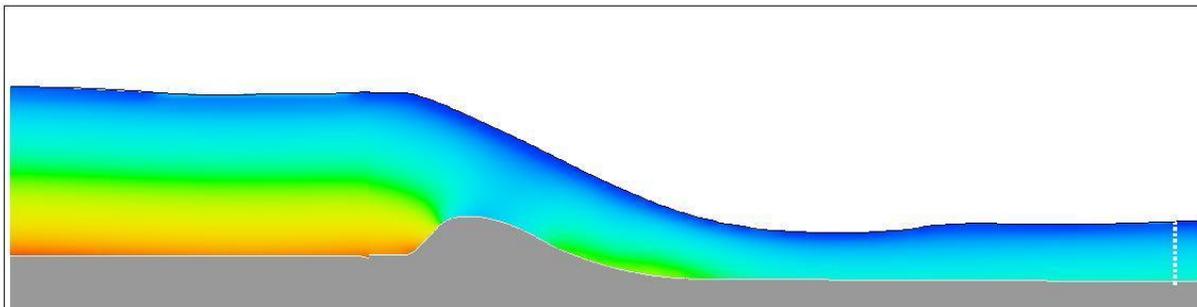


Figura 3.10 Distribución de la presión en la sección 2.

Sección 3

Presión (Pa)

80 72560 145040 217520 290000

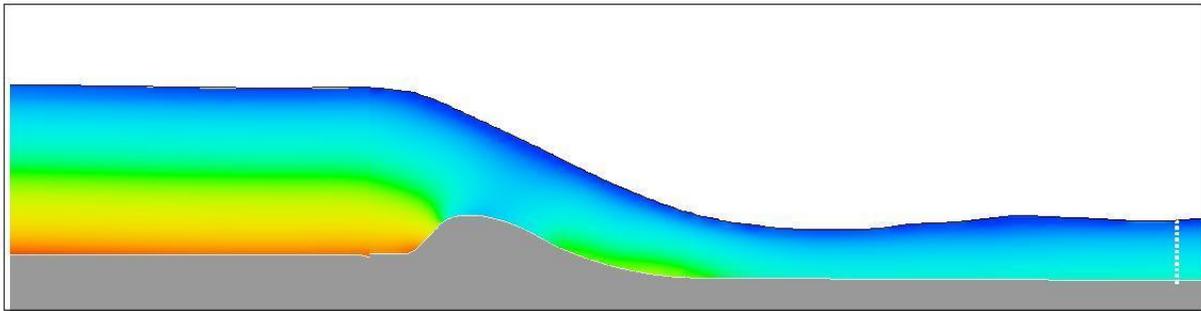
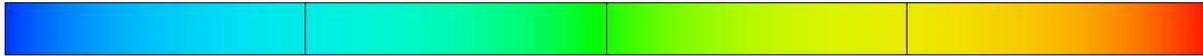


Figura 3.11 Distribución de la presión en la sección 3.

Sección 4

Presión (Pa)

80 72560 145040 217520 290000

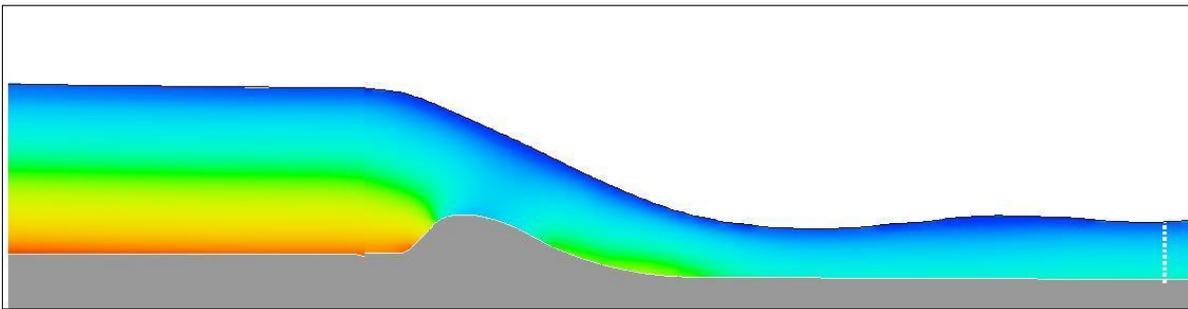
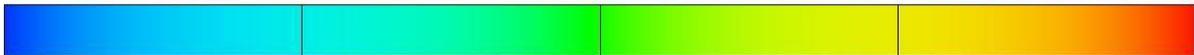


Figura 3.12 Distribución de la presión en la sección 4.

Sección 5

Presión (Pa)

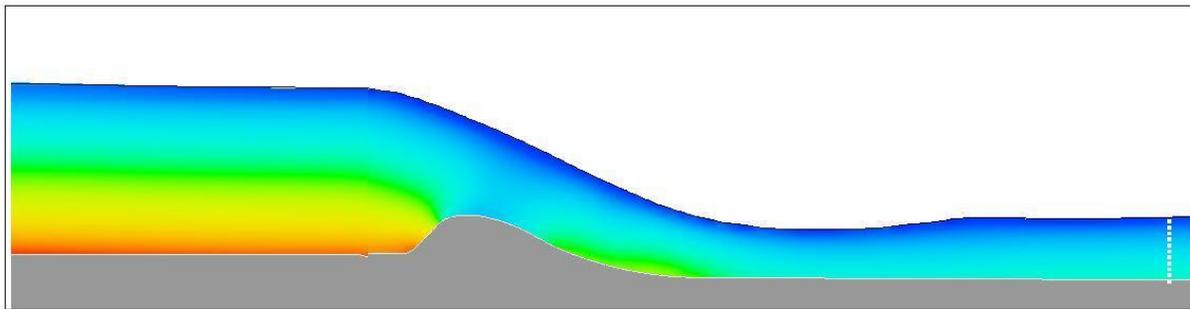


Figura 3.13 Distribución de la presión en la sección 5.

Sección 6

Presión (Pa)

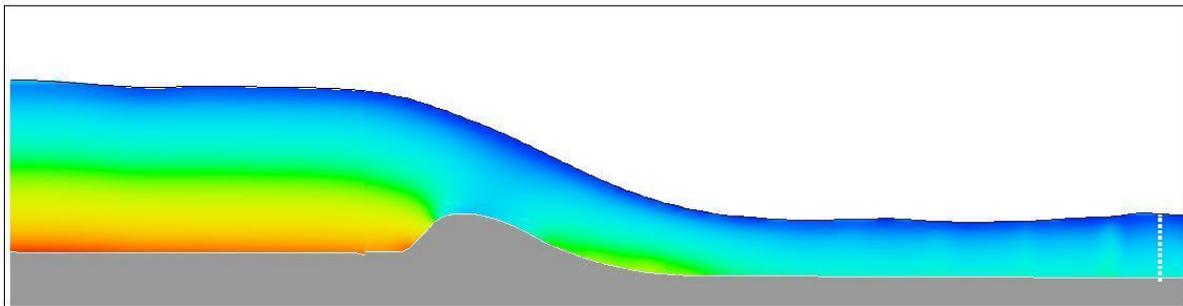


Figura 3.14 Distribución de la presión en la sección 6.

Sección 7

Presión (Pa)

80 72560 145040 217520 290000

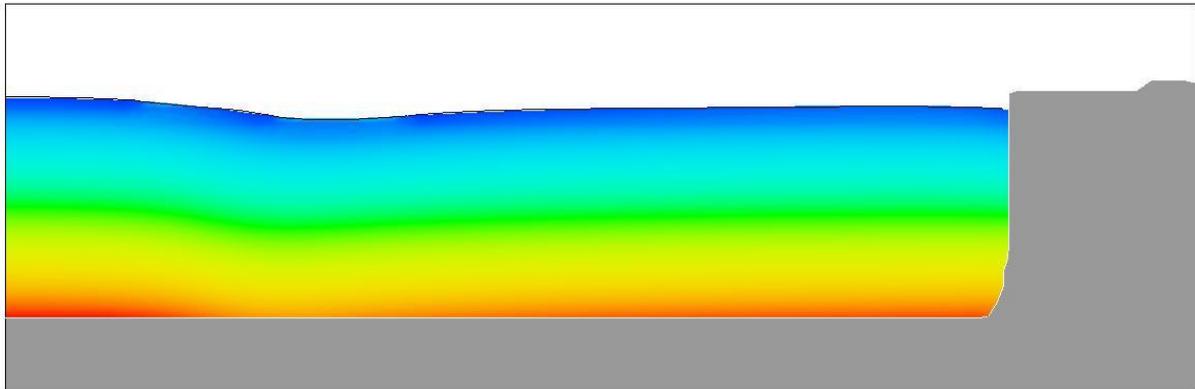


Figura 3.15 Distribución de la presión en la sección 7.

Sección 8

Presión (Pa)

80 72560 145040 217520 290000

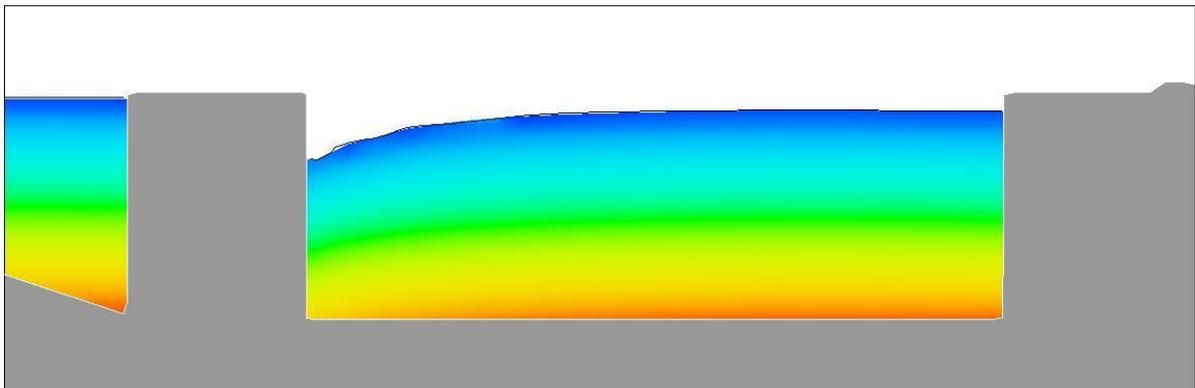
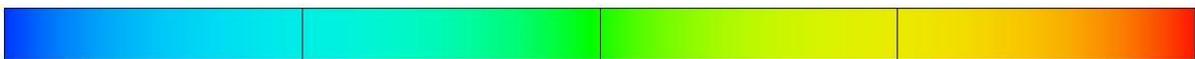


Figura 3.16 Distribución de la presión en la sección 8.

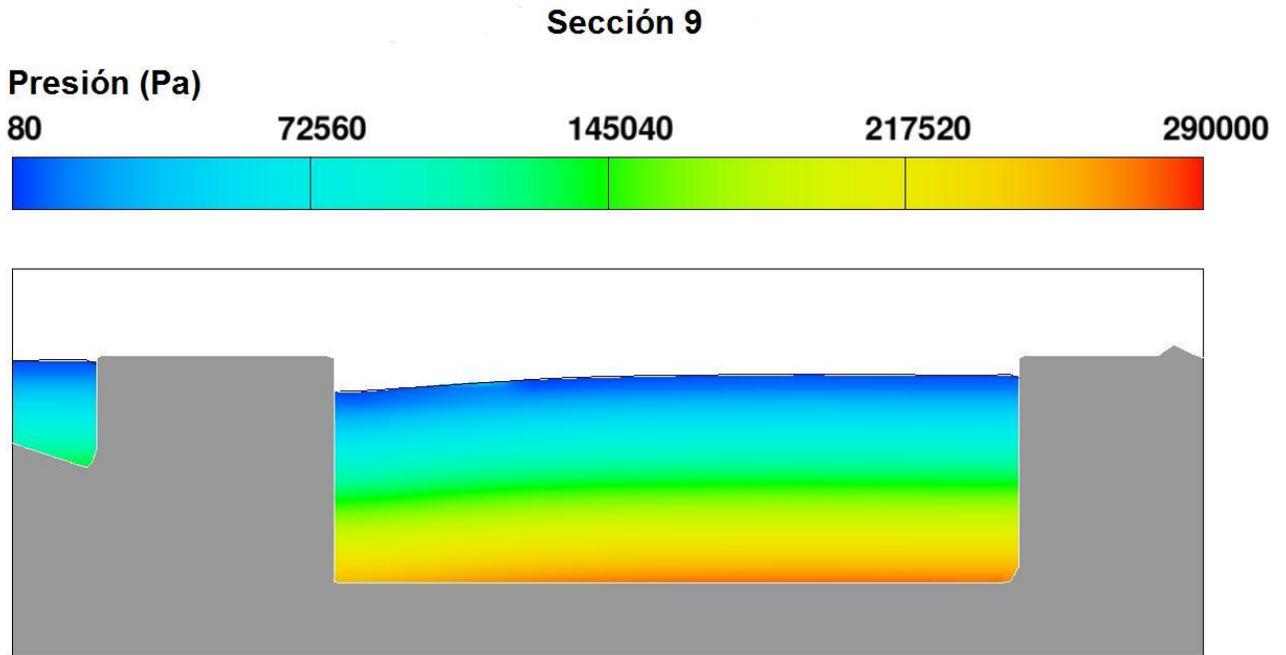


Figura 3.17 Distribución de la presión en la sección 9.

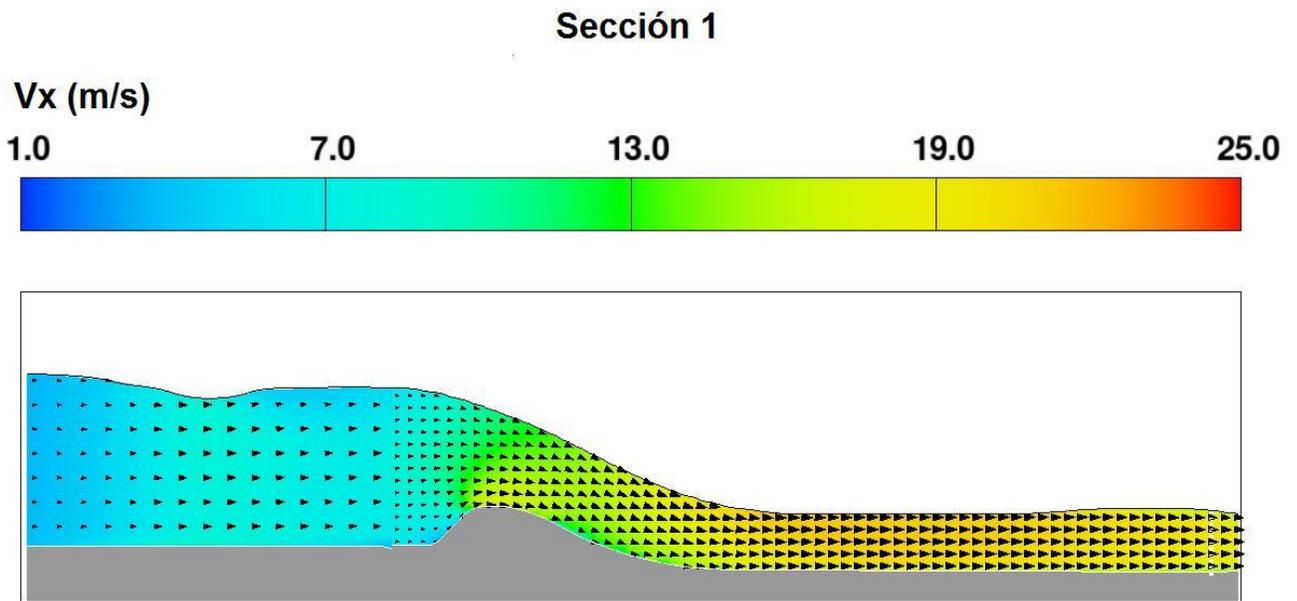


Figura 3.18 Distribución de la velocidad en X en la sección 1.

Sección 2

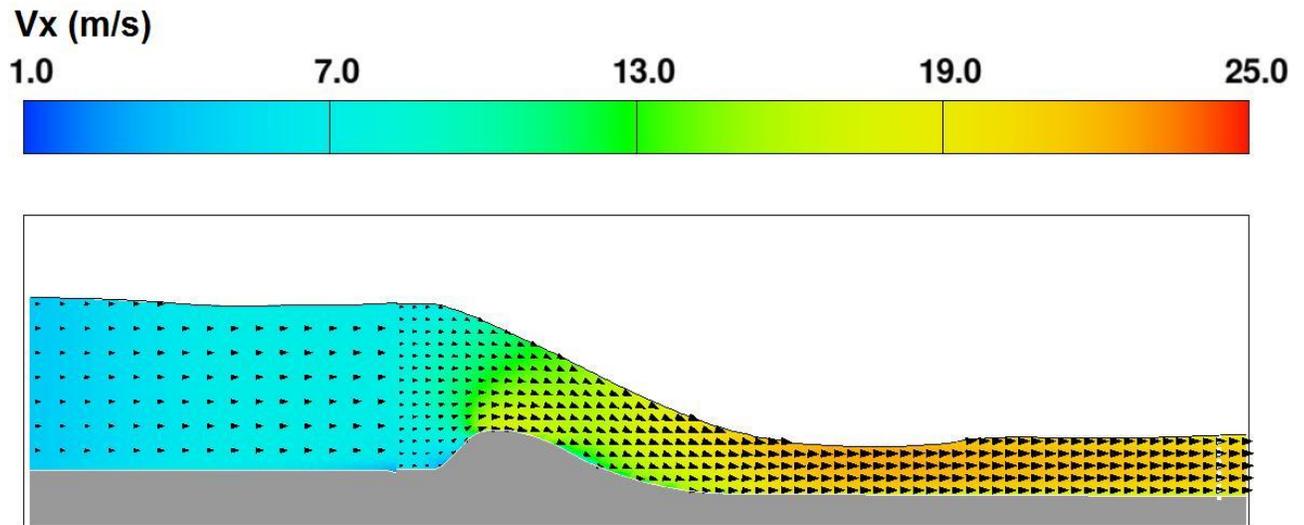


Figura 3.19 Distribución de la velocidad en X en la sección 2.

Sección 3

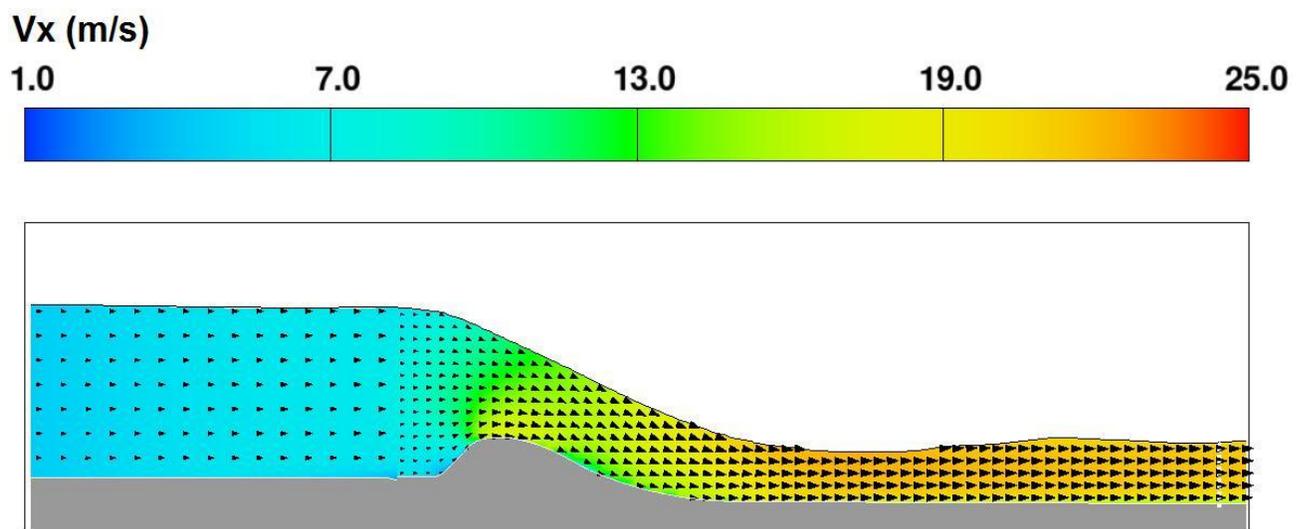


Figura 3.20 Distribución de la velocidad en X en la sección 3.

Sección 4

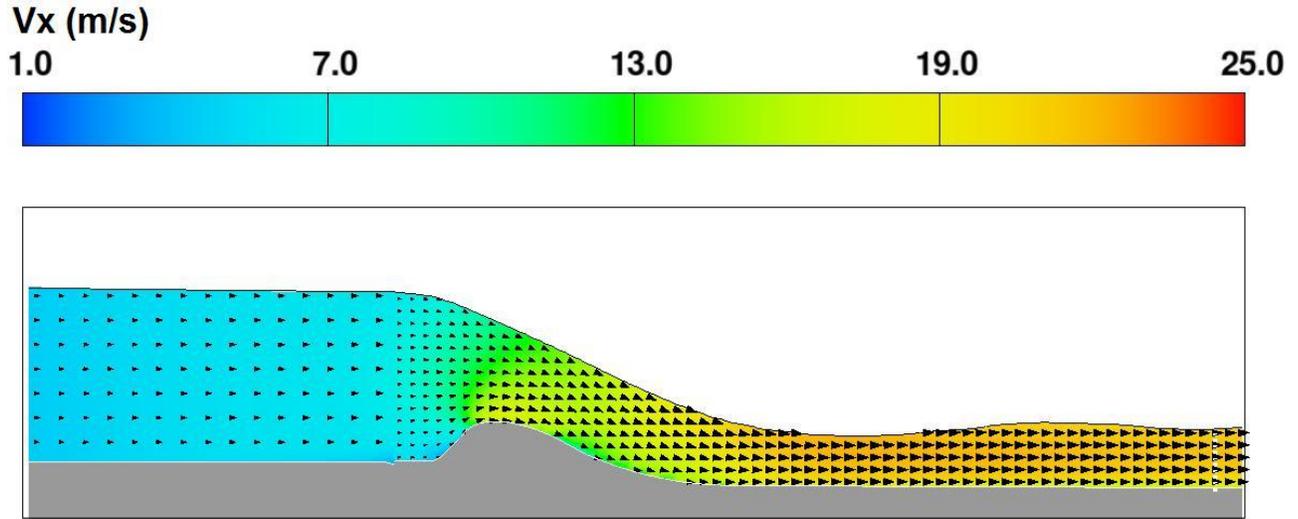


Figura 3.21 Distribución de la velocidad en X en la sección 4.

Sección 5

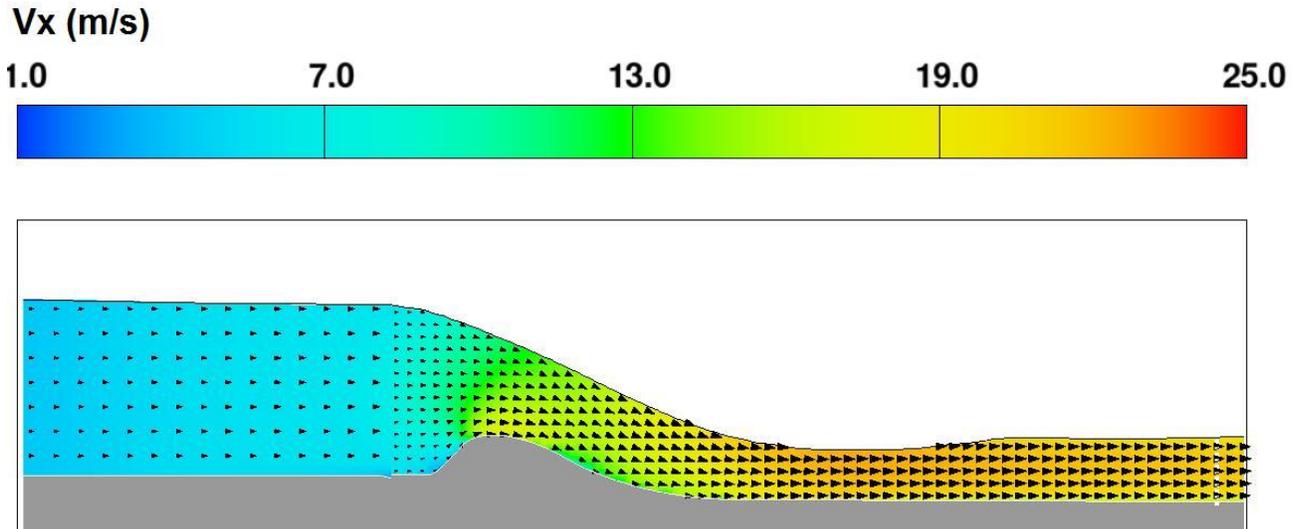


Figura 3.22 Distribución de la velocidad en X en la sección 5.

Sección 6

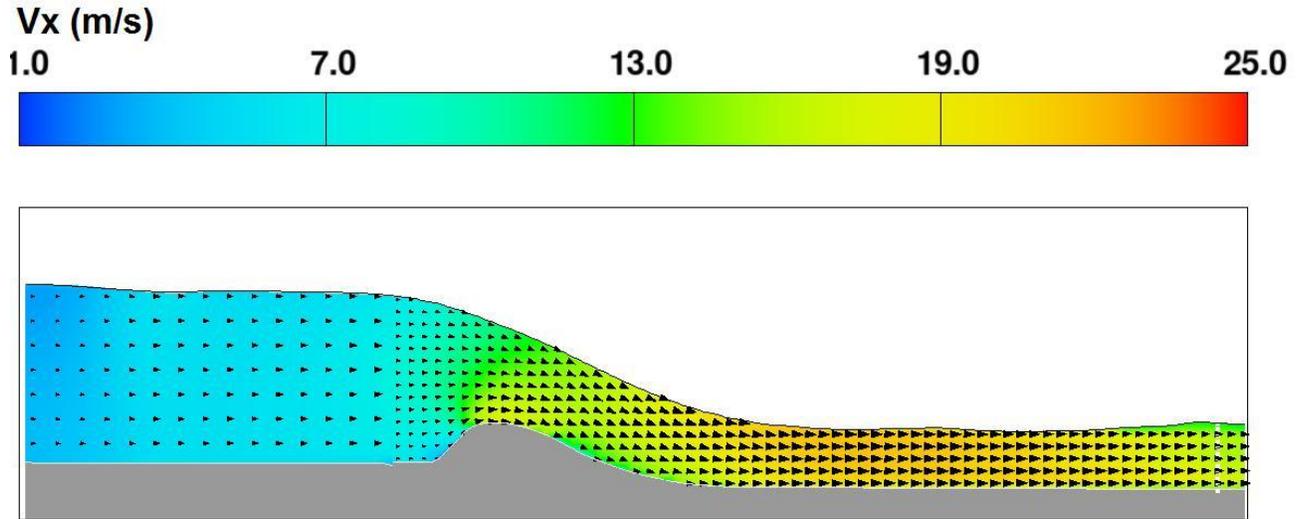


Figura 3.23 Distribución de la velocidad en X en la sección 6.

Sección 7

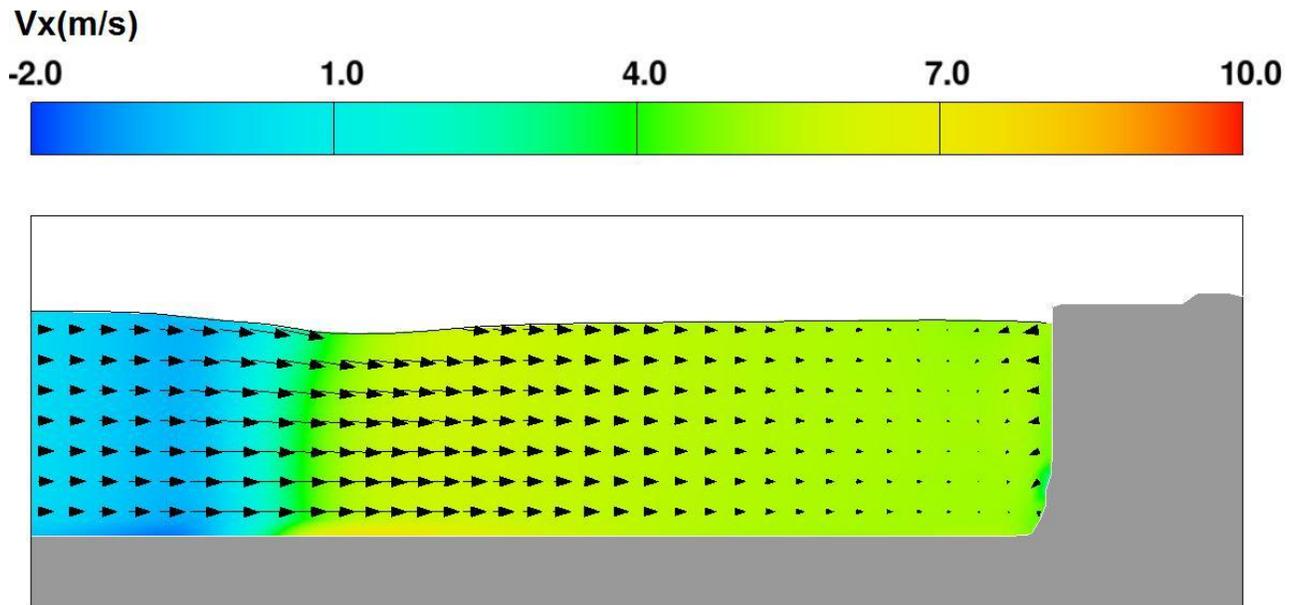


Figura 3.24 Distribución de la velocidad en X en la sección 7.

Sección 8

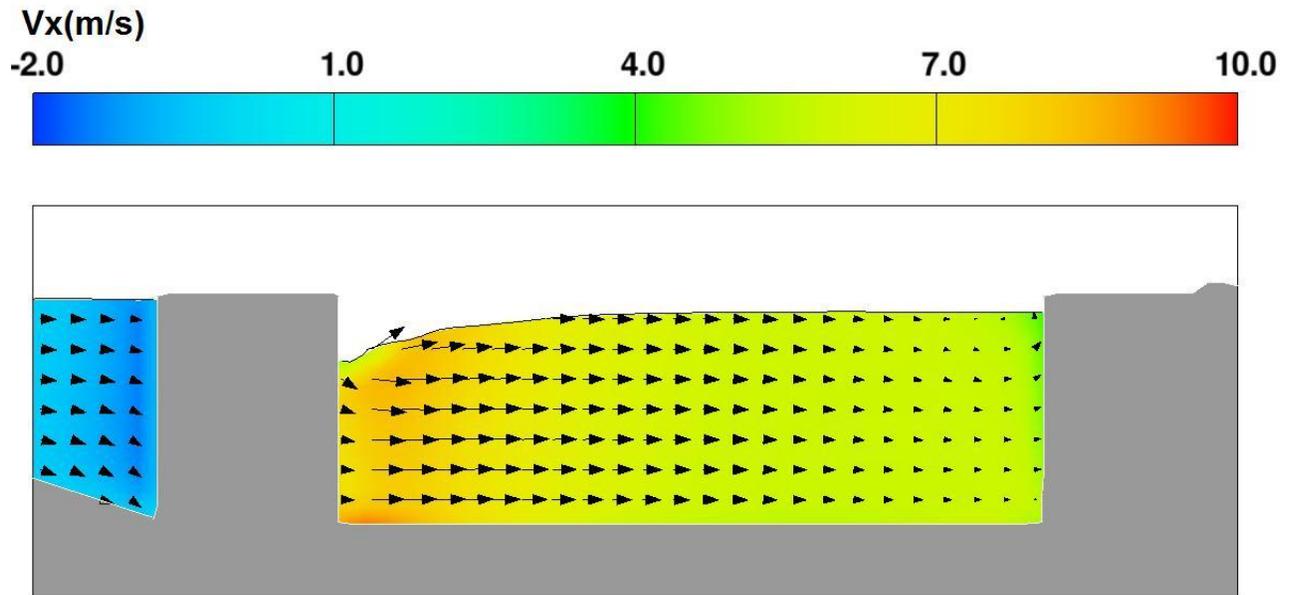


Figura 3.25 Distribución de la velocidad en X en la sección 8.

Sección 9

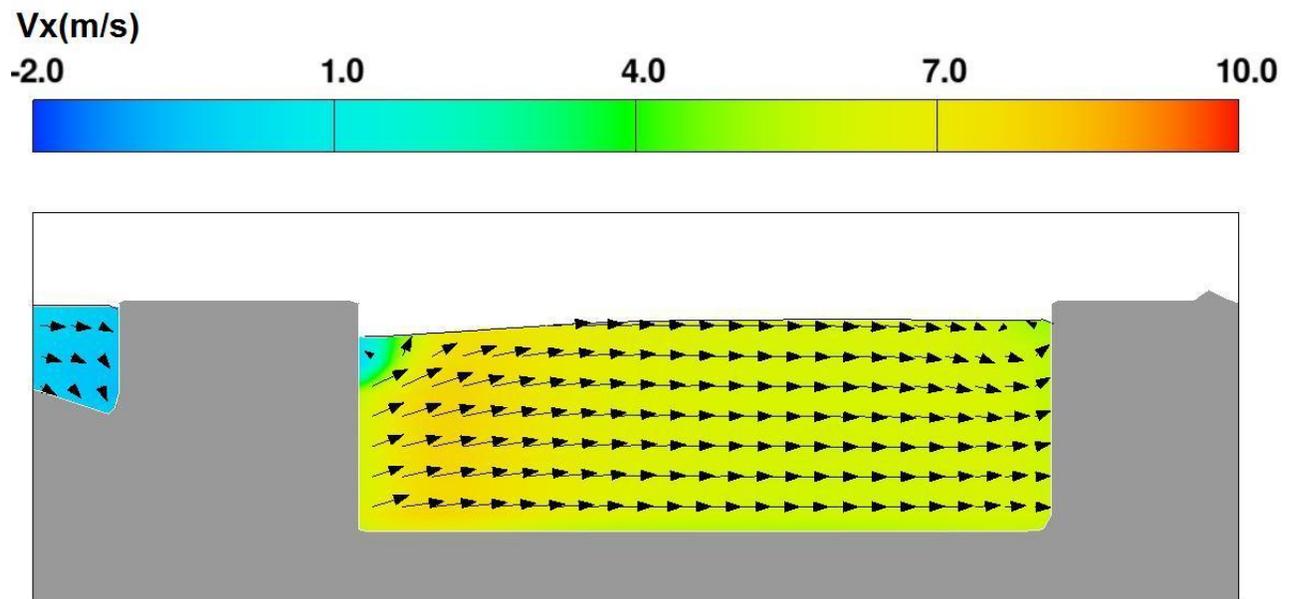


Figura 3.26 Distribución de la velocidad en X en la sección 9.

Sección 1

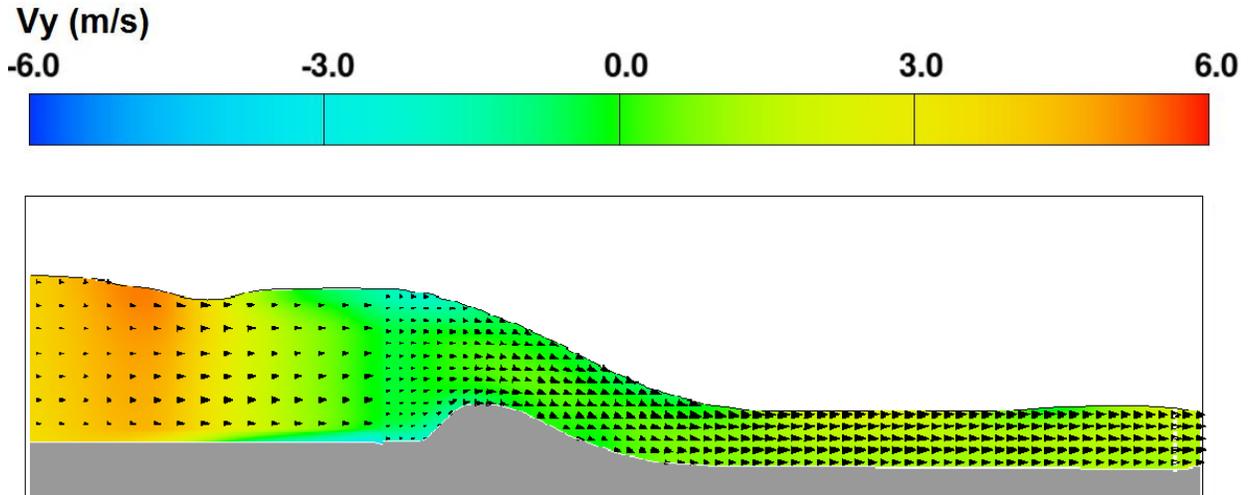


Figura 3.27 Distribución de la velocidad en Y en la sección 1.

Sección 2

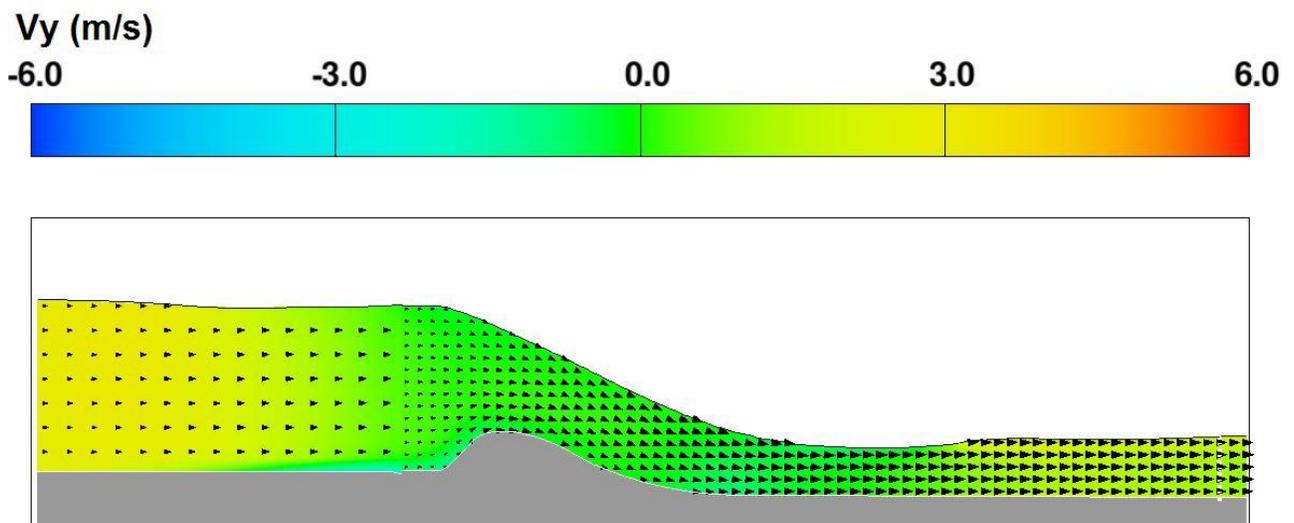


Figura 3.28 Distribución de la velocidad en Y en la sección 2.

Sección 3

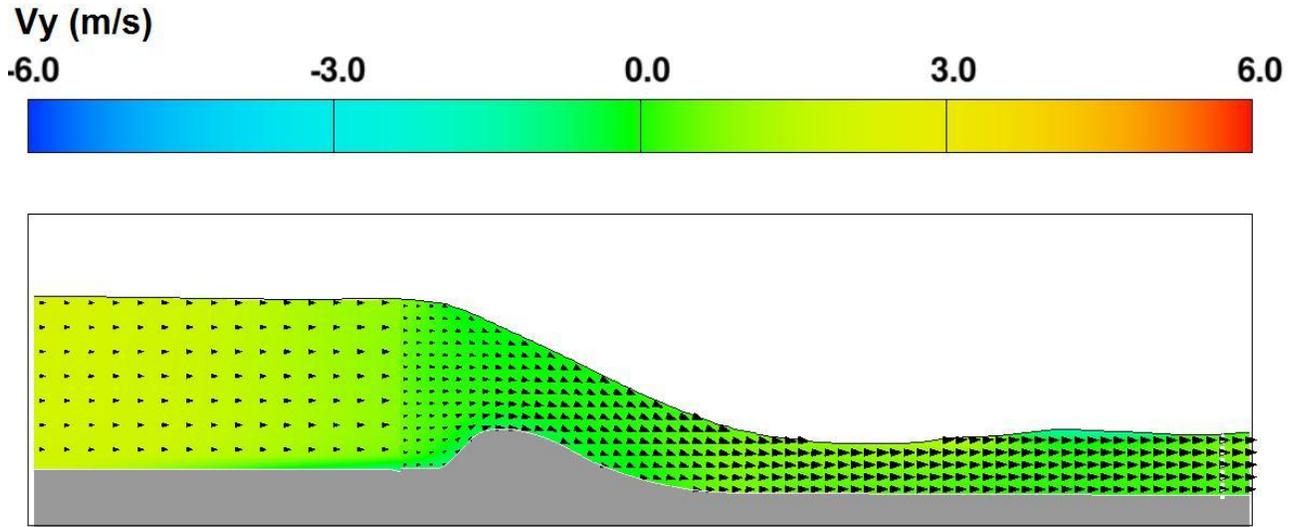


Figura 3.29 Distribución de la velocidad en Y en la sección 3.

Sección 4

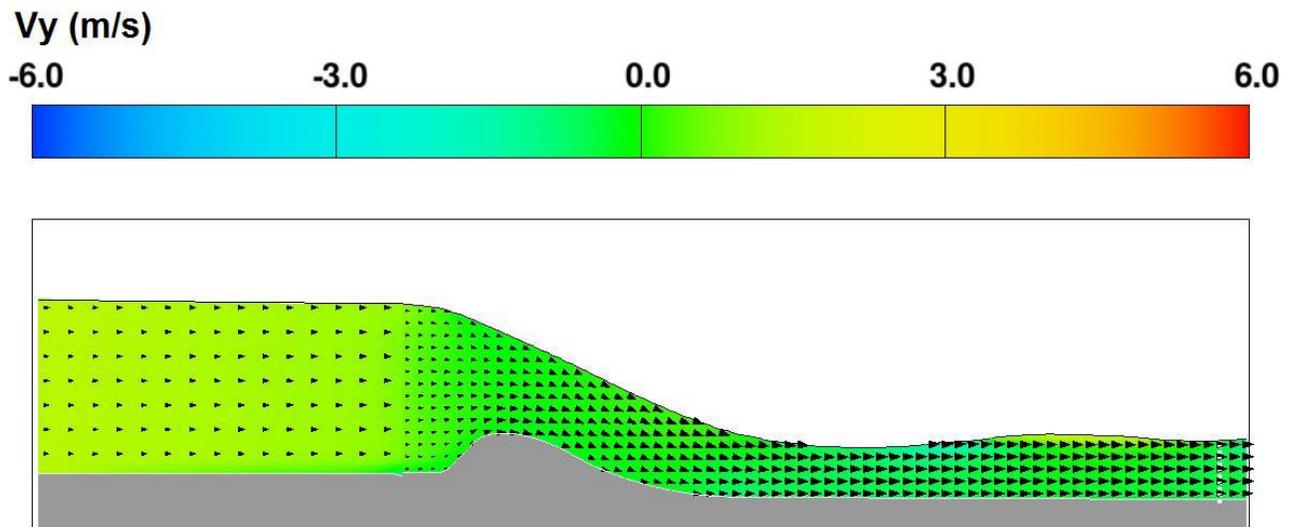


Figura 3.30 Distribución de la velocidad en Y en la sección 4.

Sección 5

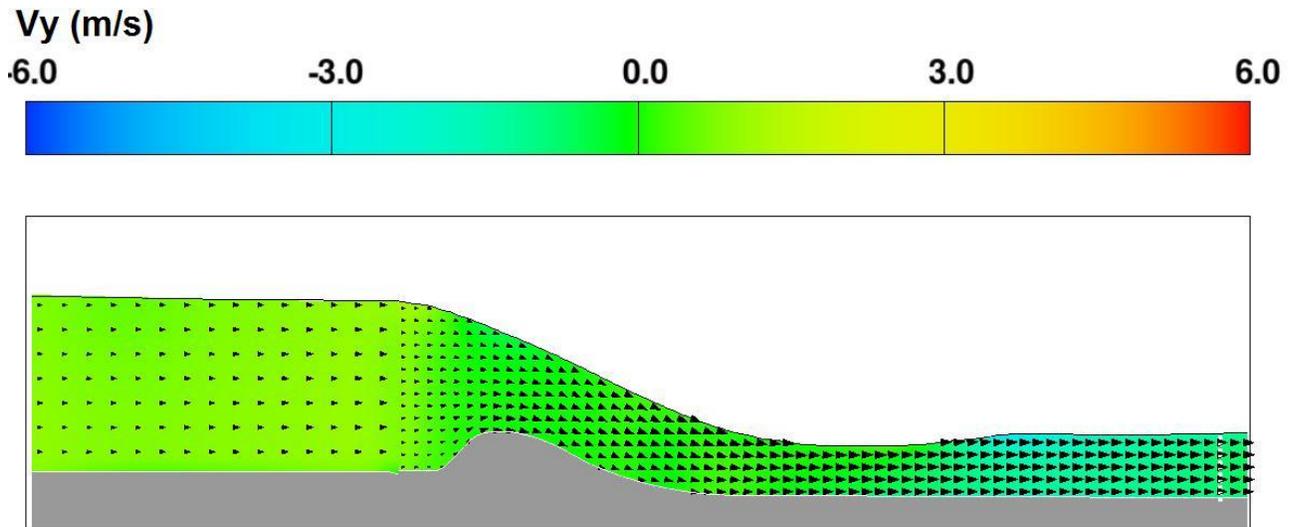


Figura 3.31 Distribución de la velocidad en Y en la sección 5.

Sección 6

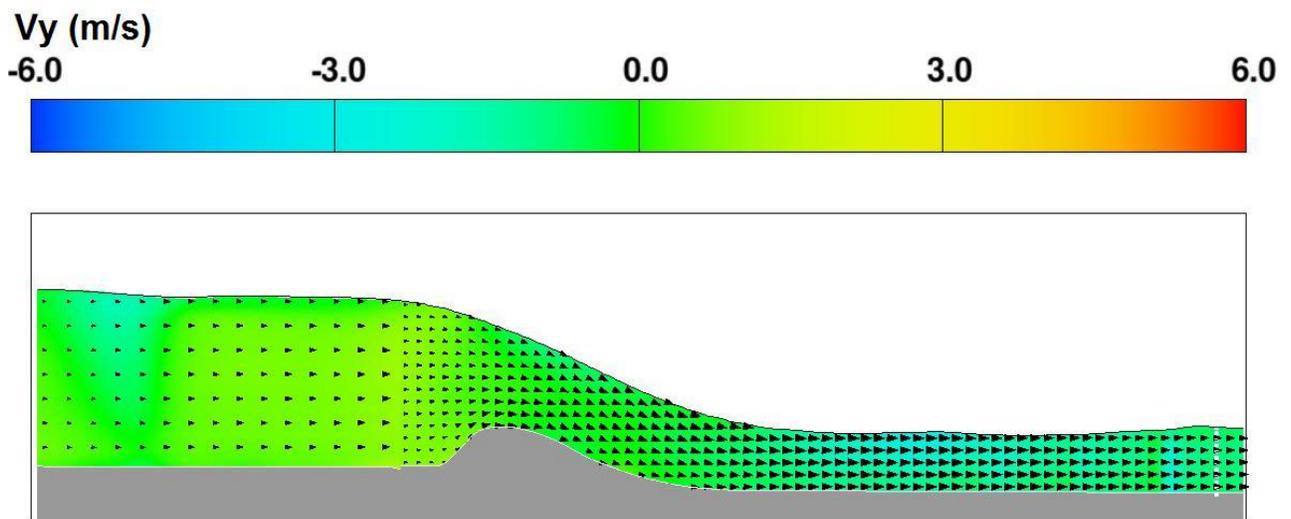


Figura 3.32 Distribución de la velocidad en Y en la sección 6.

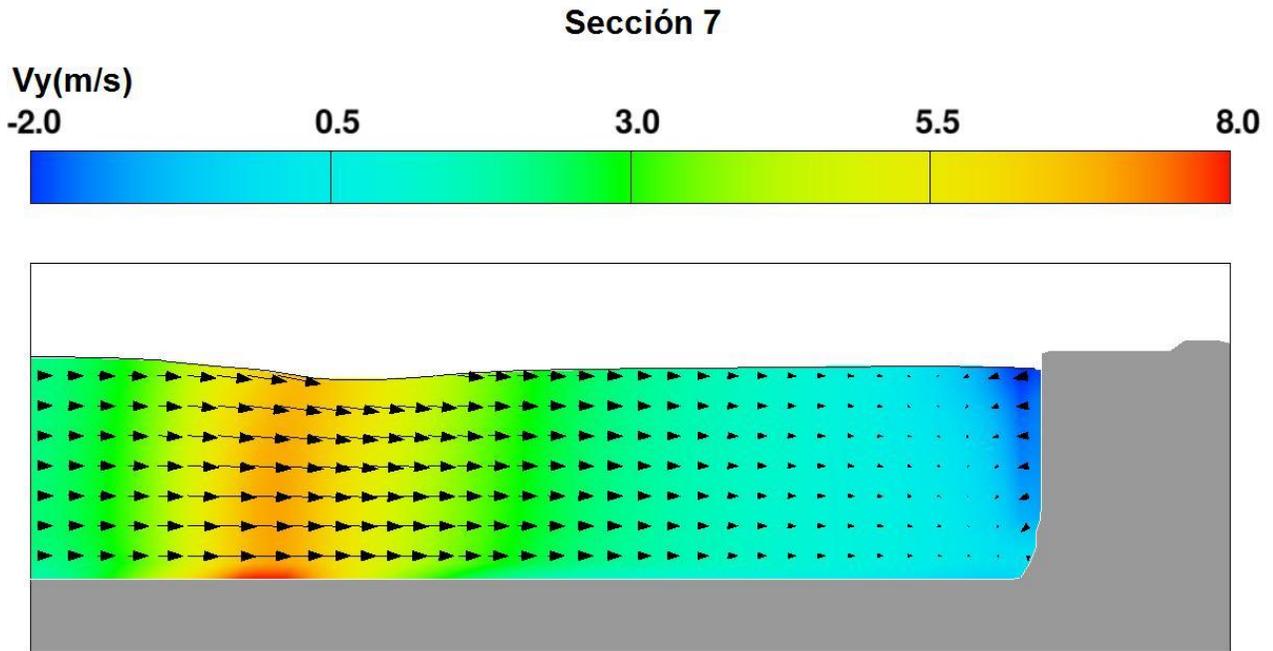


Figura 3.33 Distribución de la velocidad en Y en la sección 7.

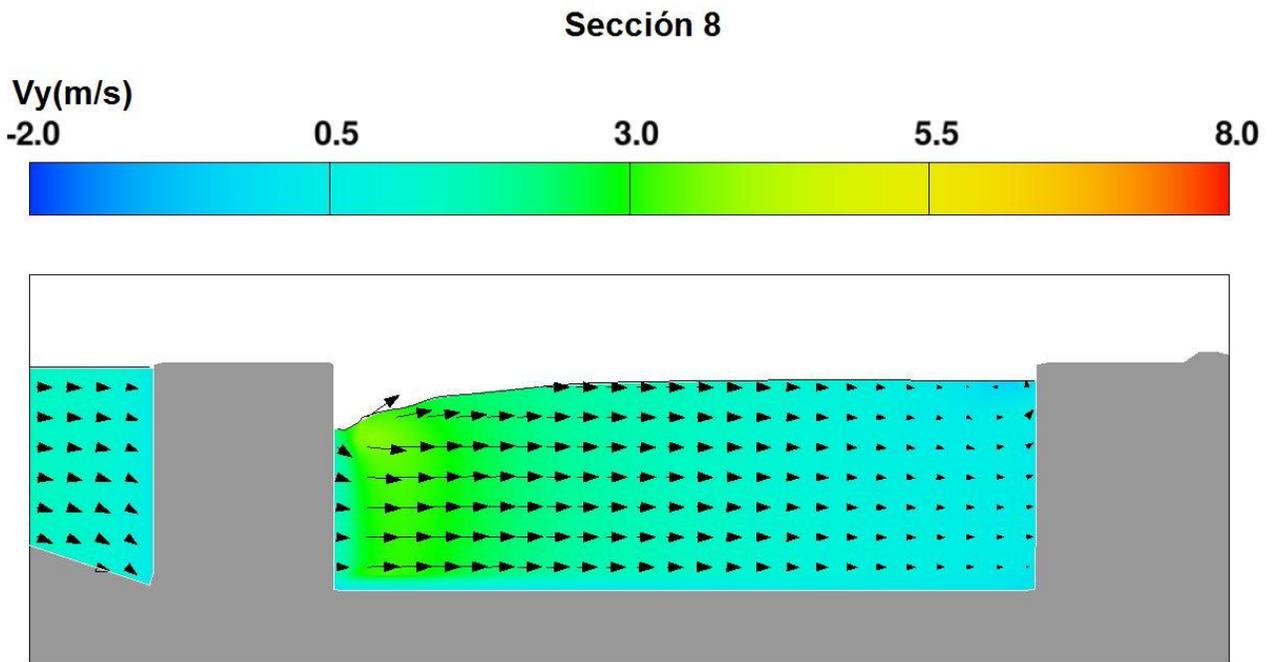


Figura 3.34 Distribución de la velocidad en Y en la sección 8.

Sección 9

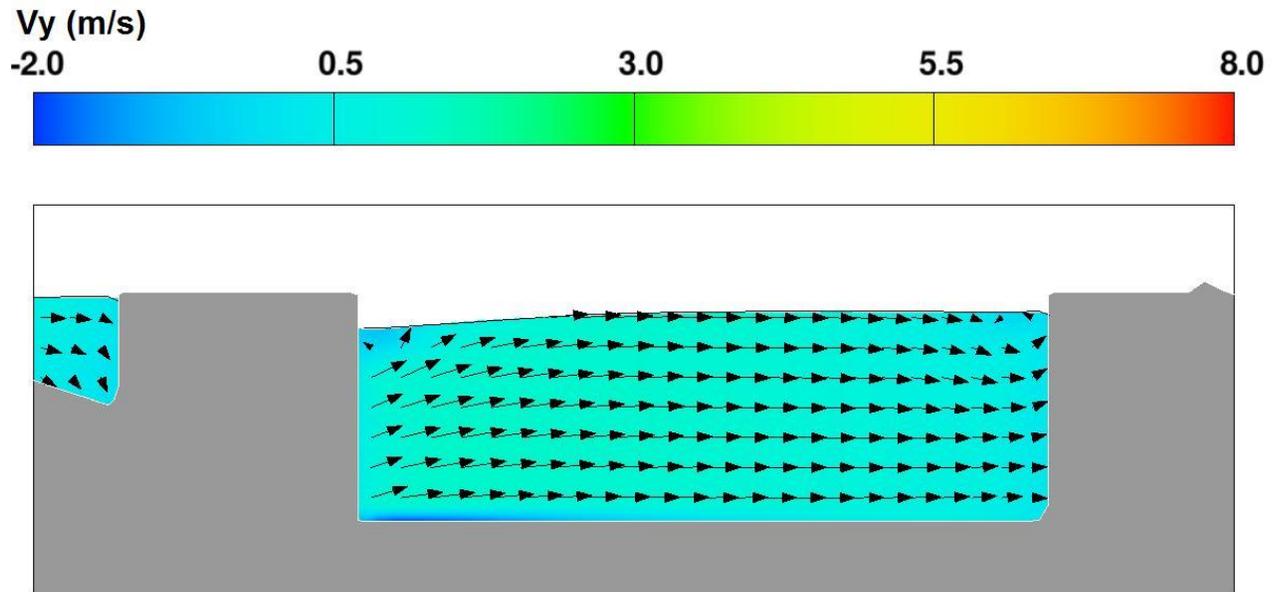


Figura 3.35 Distribución de la velocidad en Y en la sección 9.

Sección 1

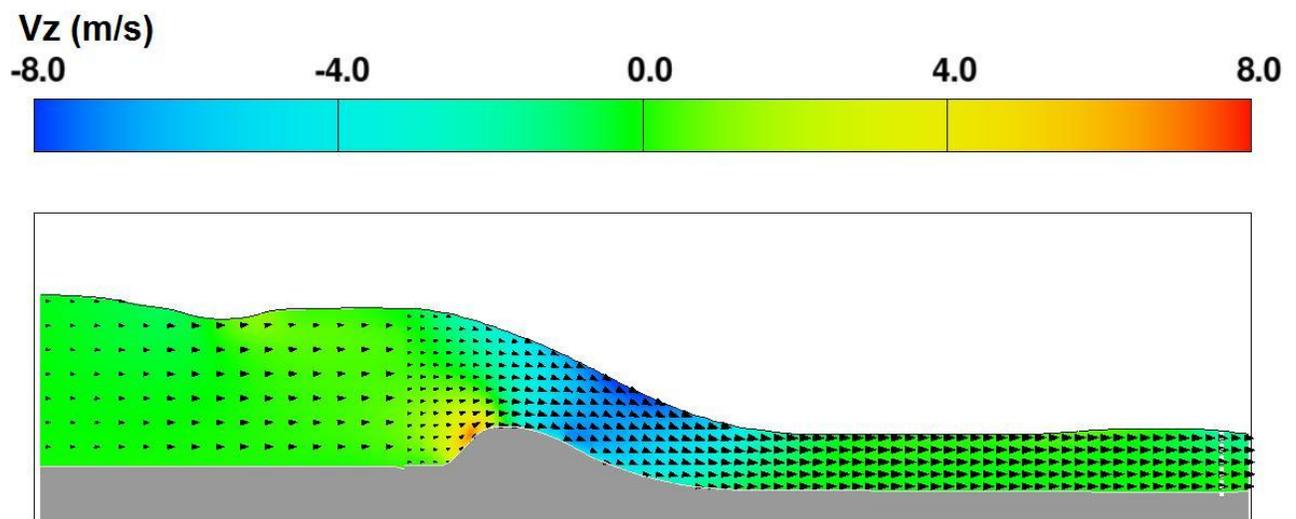


Figura 3.36 Distribución de la velocidad en Z en la sección 1.

Sección 2

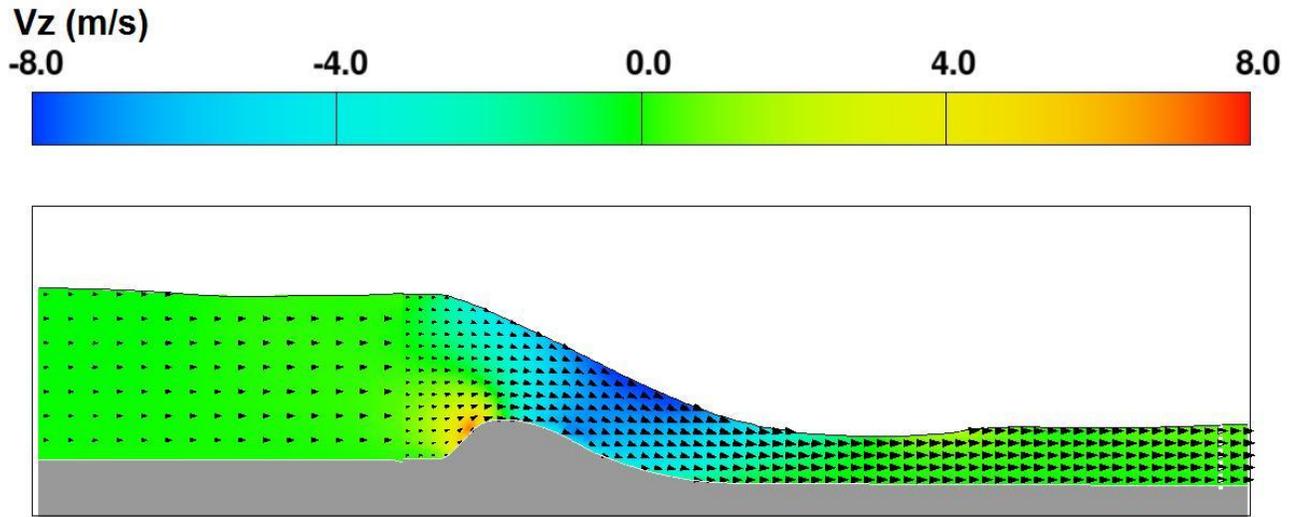


Figura 3.37 Distribución de la velocidad en Z en la sección 2.

Sección 3

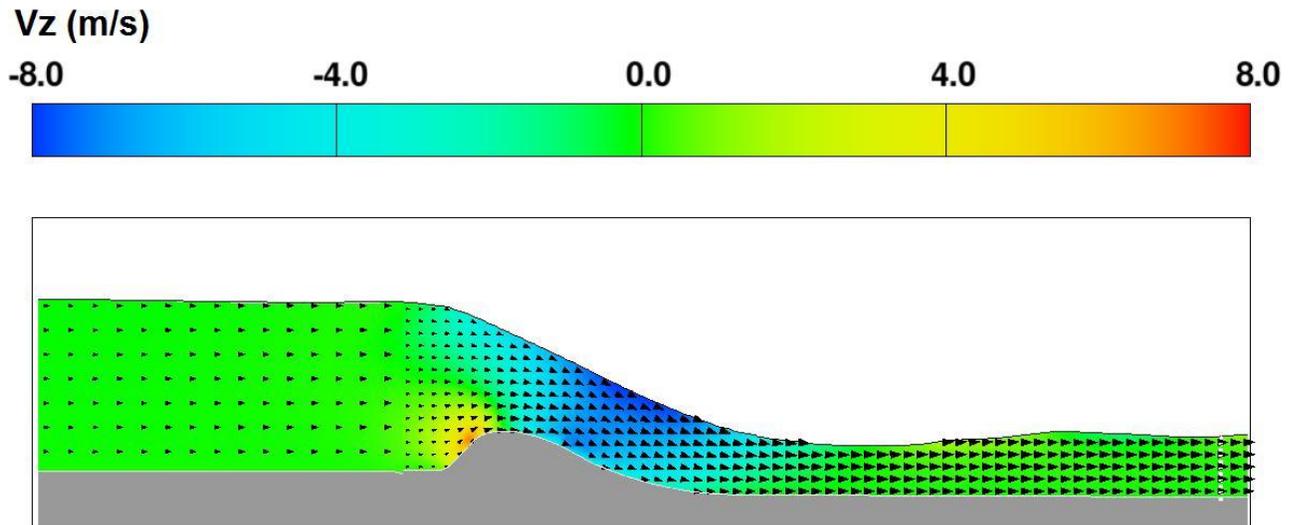


Figura 3.38 Distribución de la velocidad en Z en la sección 3.

Sección 4

Vz (m/s)

8.0 -4.0 0.0 4.0 8.0

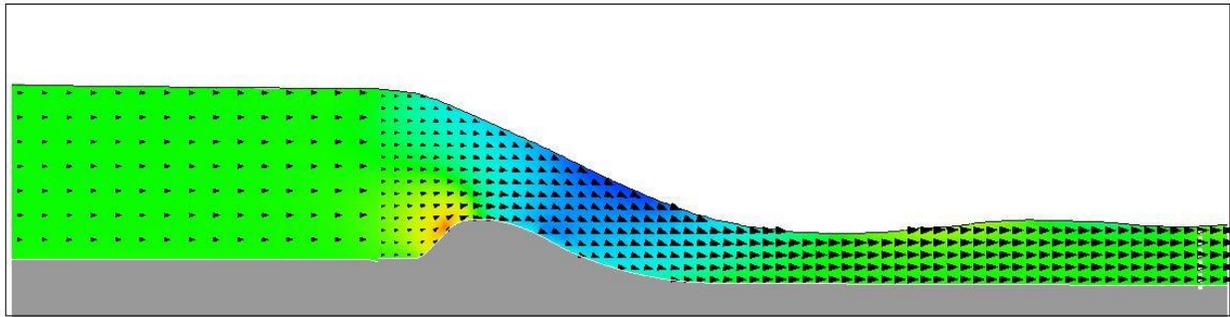
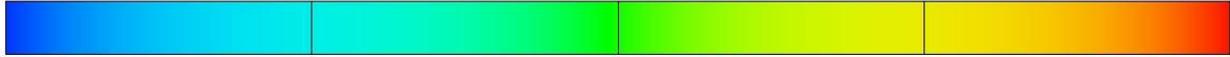


Figura 3.39 Distribución de la velocidad en Z en la sección 4.

Sección 5

Vz (m/s)

-8.0 -4.0 0.0 4.0 8.0

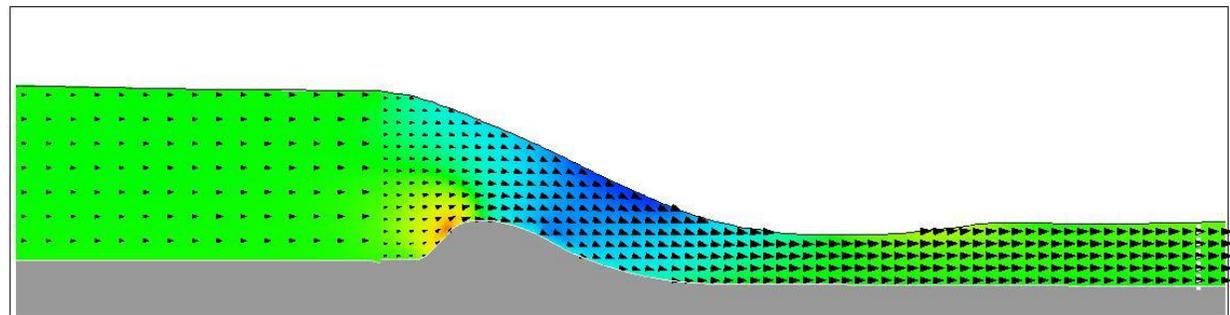


Figura 3.40 Distribución de la velocidad en Z en la sección 5.

Sección 6

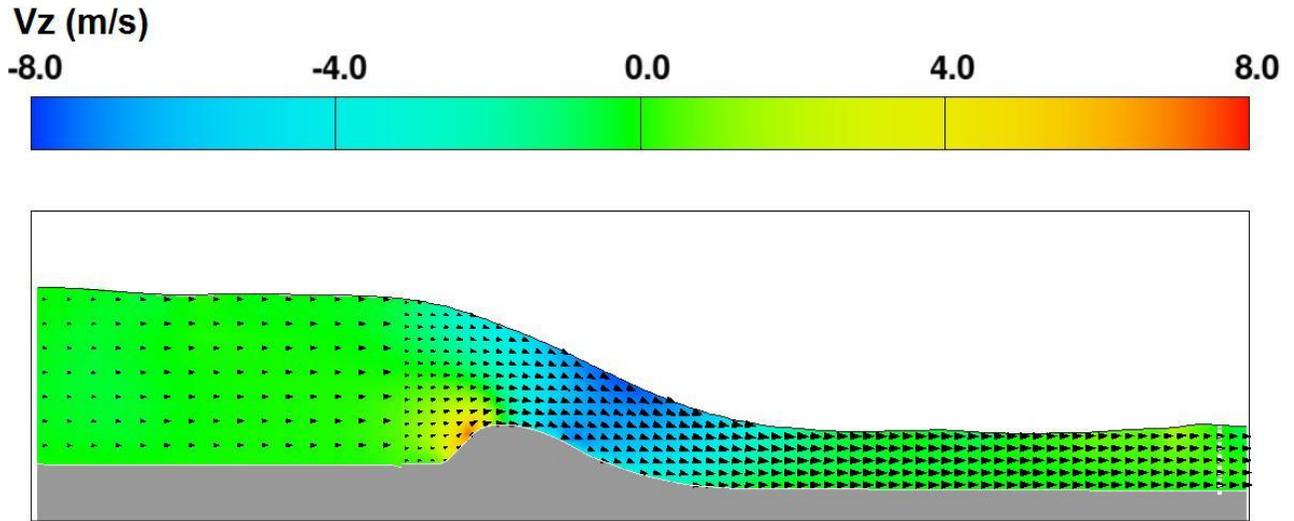


Figura 3.41 Distribución de la velocidad en Z en la sección 6.

Sección 7

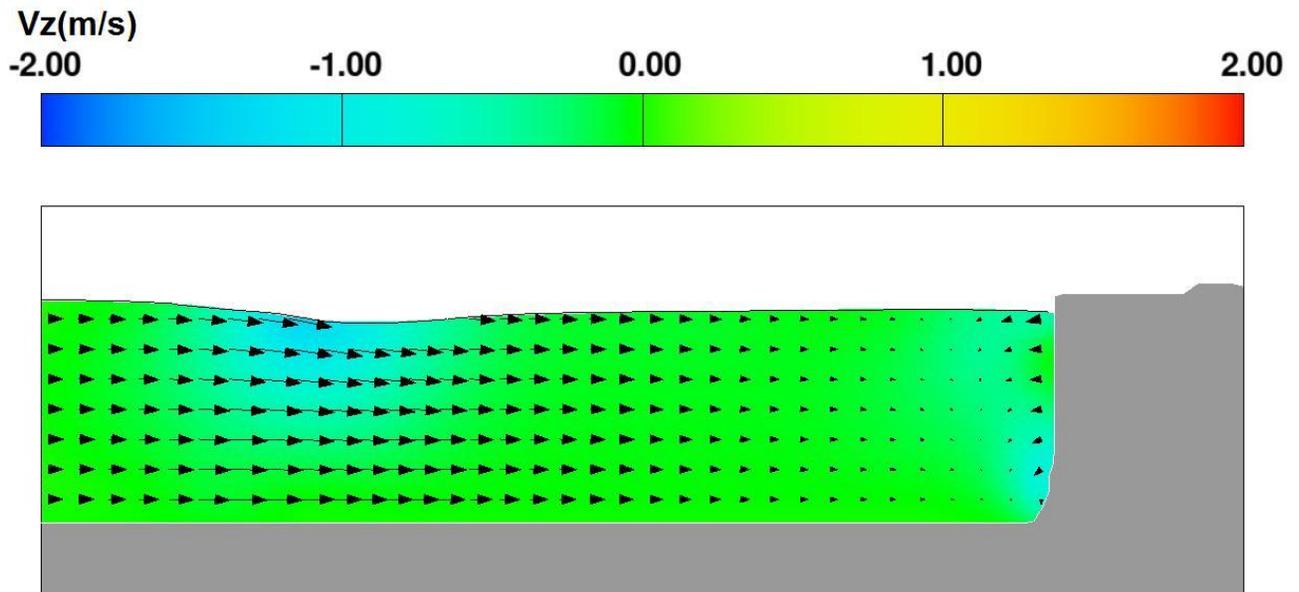


Figura 3.42 Distribución de la velocidad en Z en la sección 7.

Sección 8

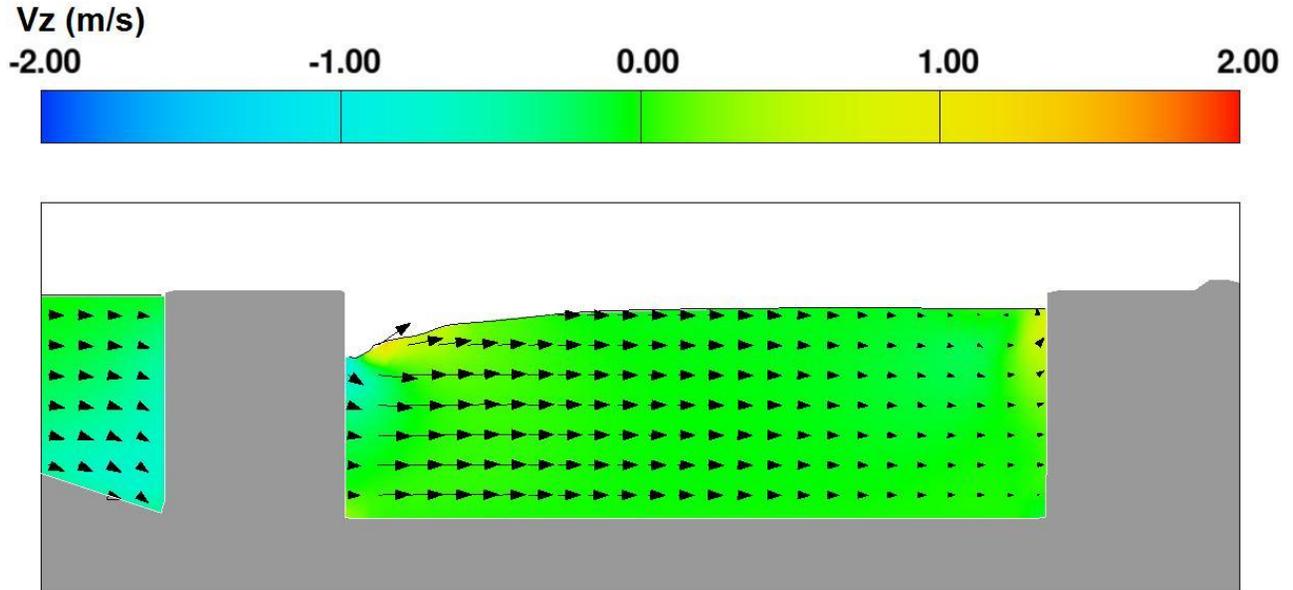


Figura 3.43 Distribución de la velocidad en Z en la sección 8.

Sección 9

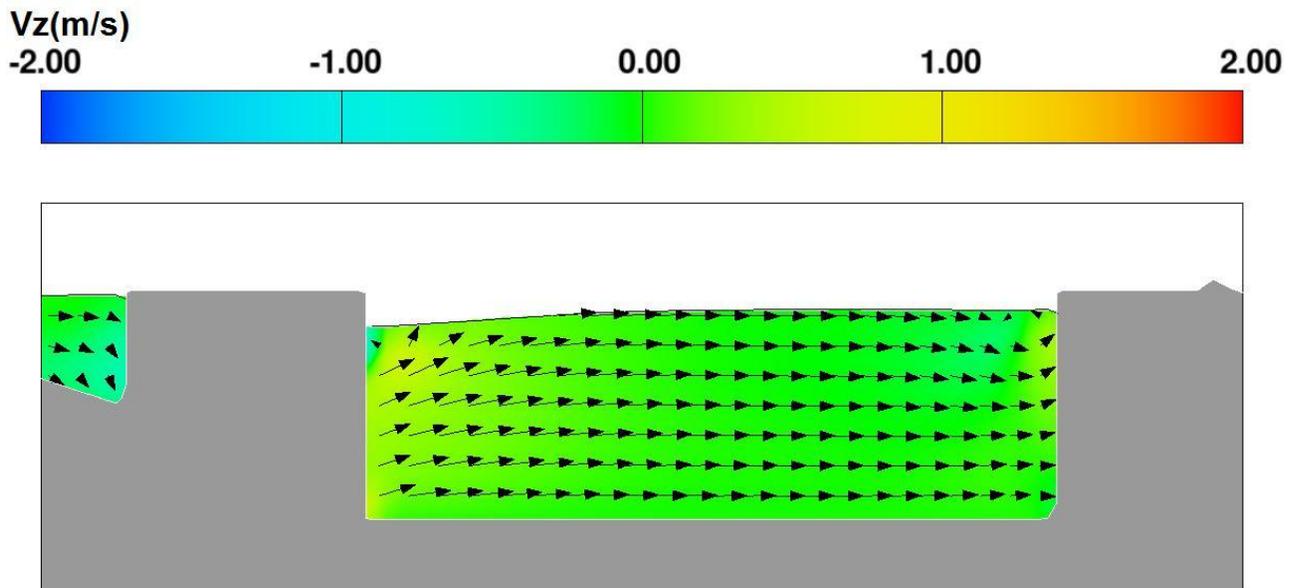


Figura 3.44 Distribución de la velocidad en Z en la sección 9.

Con el fin de tener una idea más clara del campo de flujo se obtuvieron las líneas de corriente para los 250 s de simulación, mismas que se presentan tanto en planta (Figura 3.45) como en perspectiva (Figura 3.46). Ésta última es una vista tridimensional con la magnitud de la velocidad total. Puede observarse que no se presentan estructuras vorticosas en el canal de llamada.

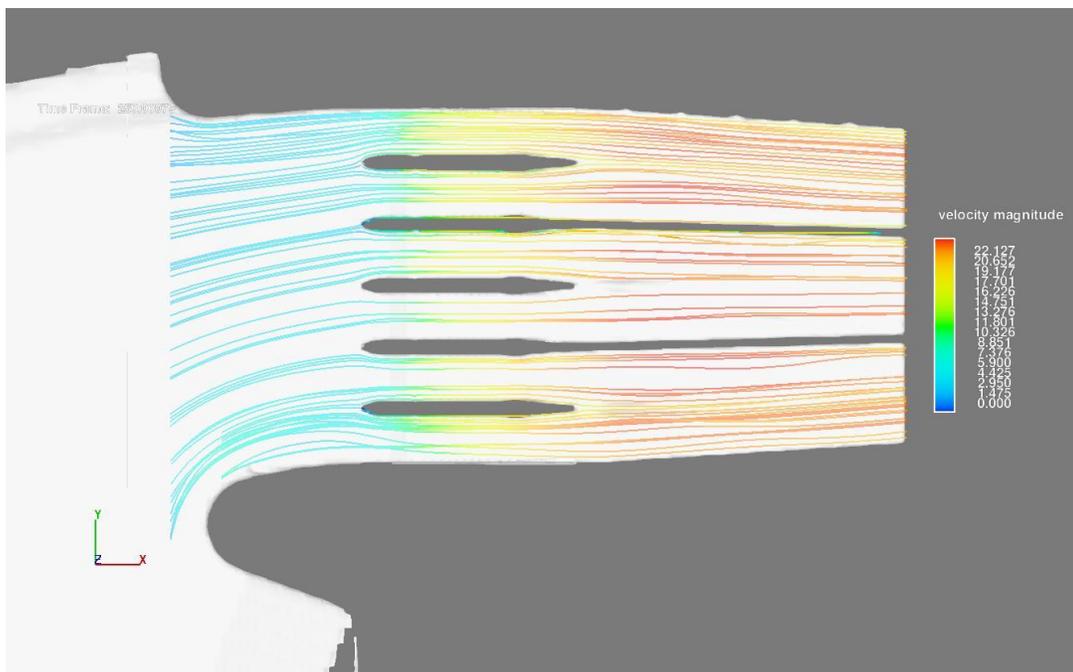


Figura 3.45 Vista en planta de las líneas de corriente con magnitud de velocidad.

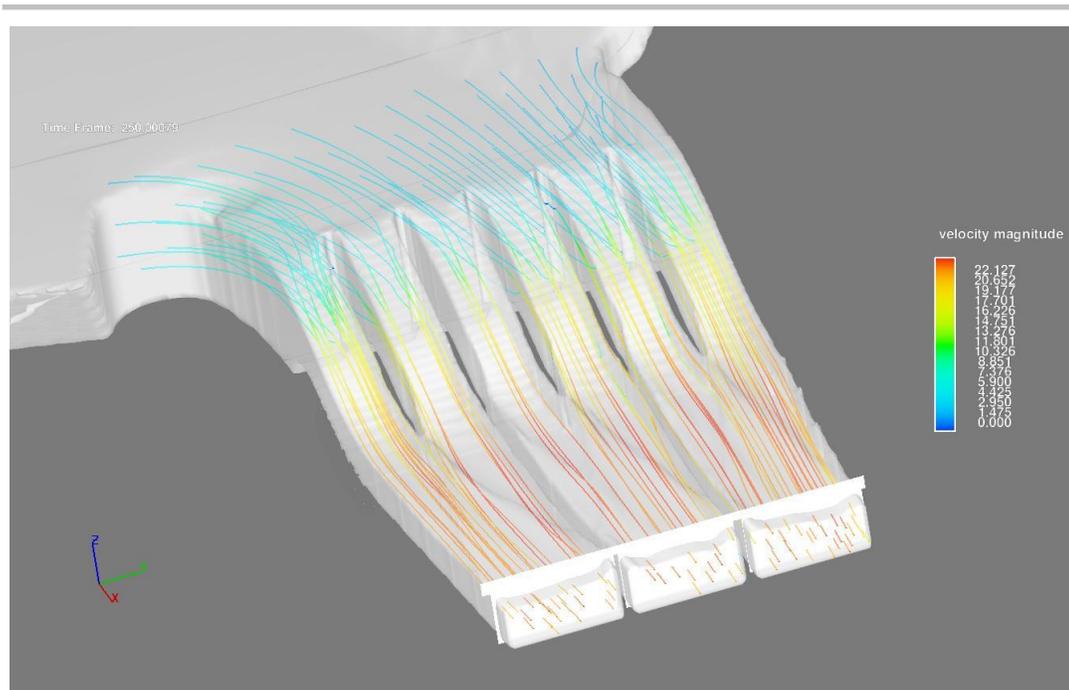


Figura 3.46 Perspectiva de las líneas de corriente con magnitud de velocidad.

3.3 Escenario de modelación 2. Canal de llamada con fosa.

Para la simulación del escenario dos se tomaron como base los archivos utilizados para el escenario 1, agregando únicamente la fosa propuesta para mitigar el efecto del descenso de la superficie libre. Para ello se creó un archivo *stl* con la geometría de la fosa y se agregó a la geometría como un *hole* (Flow3D, 2009). La geometría resultante se muestra en la Figura 3.47. La condición de frontera en la cara X mínima fue exactamente igual que el caso anterior (Figura 3.4), y terminó una vez que se alcanzó la condición de flujo permanente (Figura 3.48). A diferencia del escenario 1, se le dieron segundos adicionales para mostrar que la variación de los gastos en cada uno de los canales es mínima.

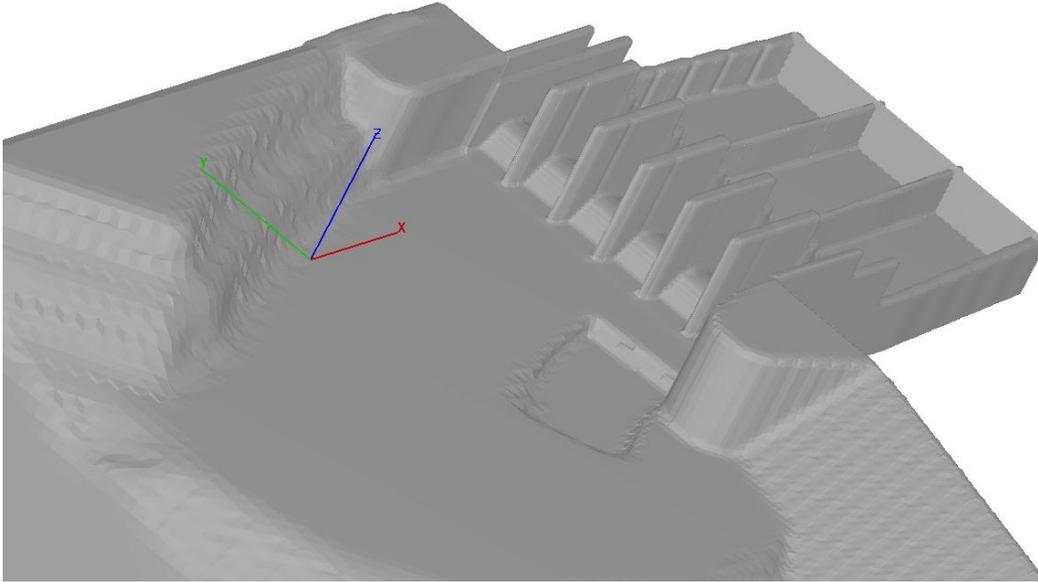


Figura 3.47 Geometría de simulación para el escenario 2..

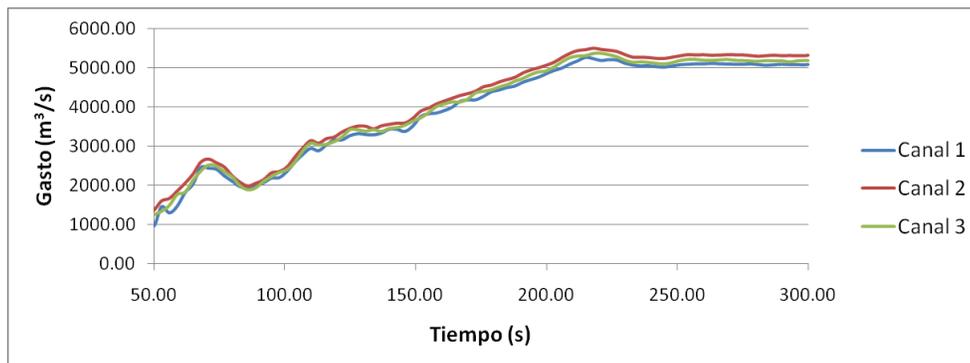


Figura 3.48 Monitoreo del gasto en los canales durante el tiempo de simulación. Escenario 2.

Puede observarse que aún con la presencia de la fosa la depresión de la superficie libre del agua se sigue formando (Figura 3.49). De acuerdo con los resultados obtenidos, la diferencia máxima entre los niveles aguas arriba y de la depresión es de 7 m, además de que el gradiente es menor en la zona de la fosa.

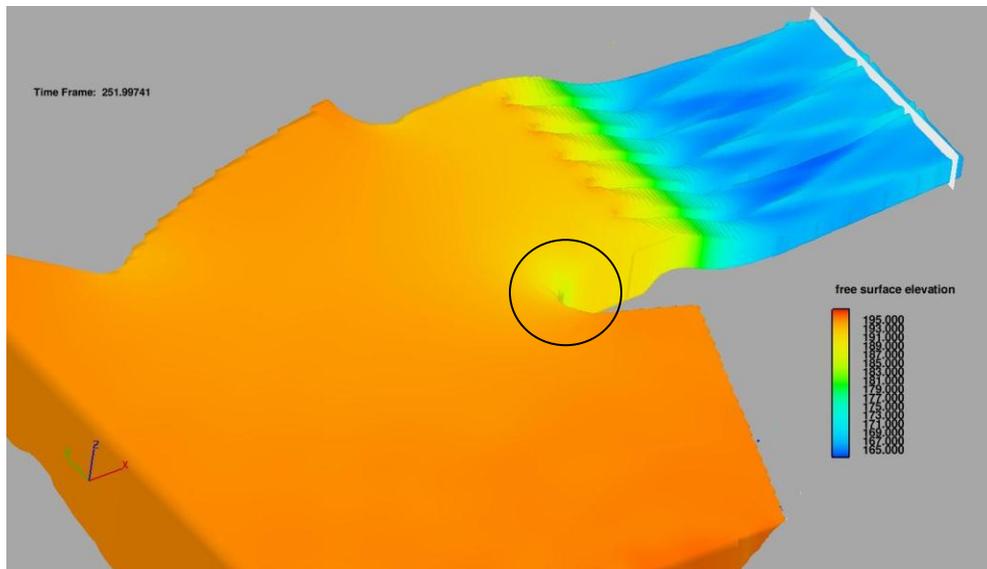


Figura 3.49 Elevación de la superficie libre del agua. Escenario 2.

Al igual que el escenario anterior, de la Figura 3.50 a la Figura 3.58 se muestran los campos de presión para cada una de las secciones. Para este escenario, en las secciones 1, 2, 7 y 8 se observa la presencia de la fosa. En las secciones 1 a 6 se observa que no existen presiones negativas en el cimacio.

De la Figura 3.59 a la Figura 3.85 se muestra la distribución de velocidades en X, Y y Z para cada una de las seis secciones. Los rangos de velocidad para este escenario de simulación son parecidos a los obtenidos al escenario 1, sin embargo la presencia de la fosa ha modificado el patrón de flujo. En la sección 1, los valores de velocidad en X (Figura 3.18) y Y (Figura 3.27) disminuyen en comparación con el escenario 1. Sin embargo para la sección 9 la velocidad en Z aumenta considerablemente entre los escenarios 1 (Figura 3.44) y 2 (Figura 3.85).

Sección 1

Presión (Pa)

80 72560 145040 217520 290000

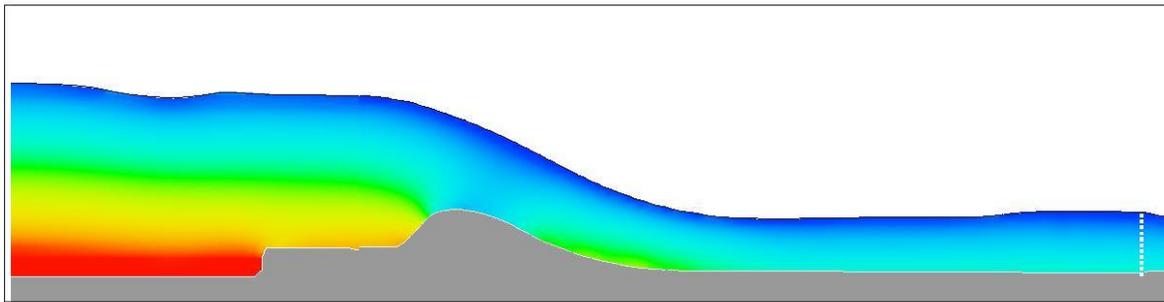


Figura 3.50 Distribución de la presión en la sección 1. Escenario 2.

Sección 2

Presión (Pa)

80 72560 145040 217520 290000

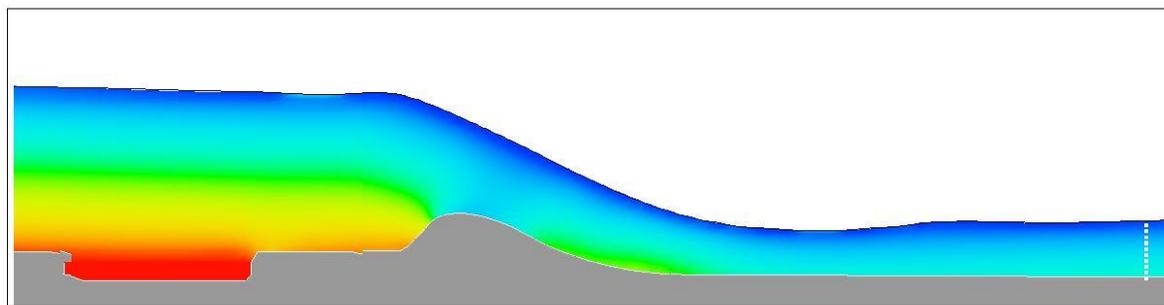


Figura 3.51 Distribución de la presión en la sección 2. Escenario 2.

Sección 3

Presión (Pa)

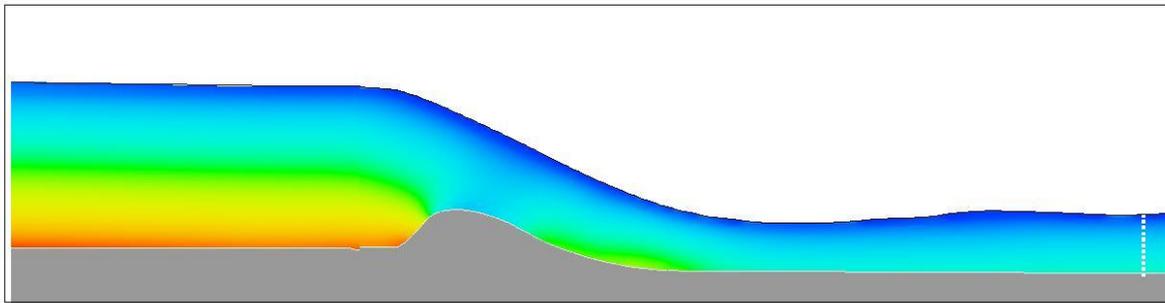
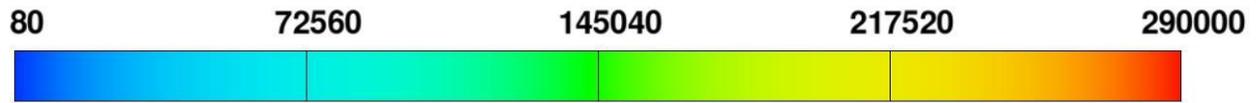


Figura 3.52 Distribución de la presión en la sección 3. Escenario 2.

Sección 4

Presión (Pa)

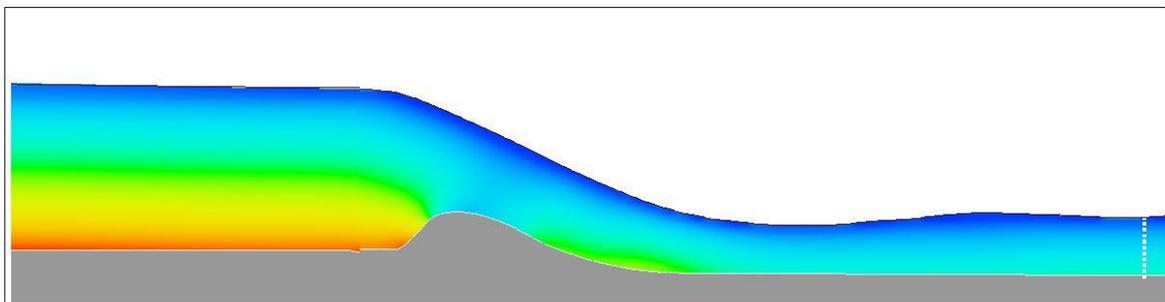


Figura 3.53 Distribución de la presión en la sección 4. Escenario 2.

Sección 5

Presión (Pa)

80 72560 145040 217520 290000

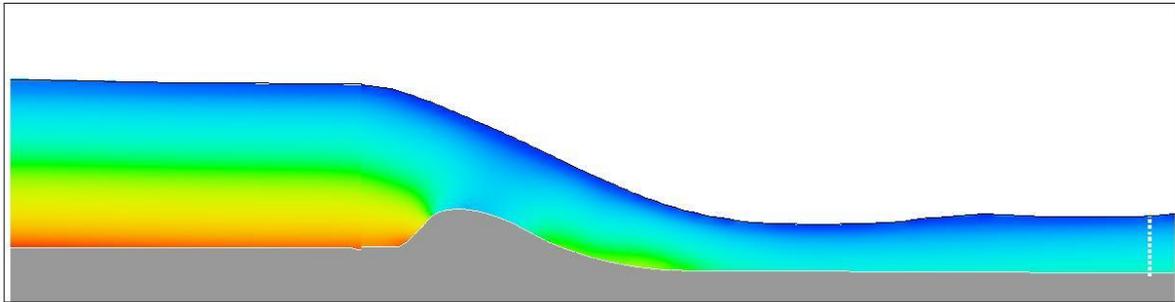
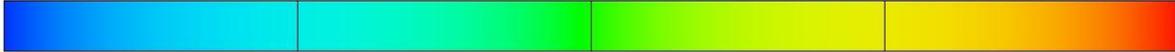


Figura 3.54 Distribución de la presión en la sección 5. Escenario 2.

Sección 6

Presión (Pa)

80 72560 145040 217520 290000

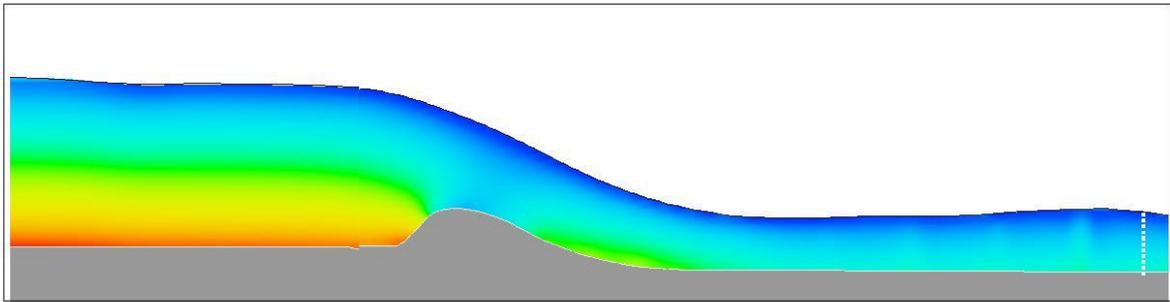


Figura 3.55 Distribución de la presión en la sección 6. Escenario 2.

Sección 7

Presión (Pa)

80

72560

145040

217520

290000

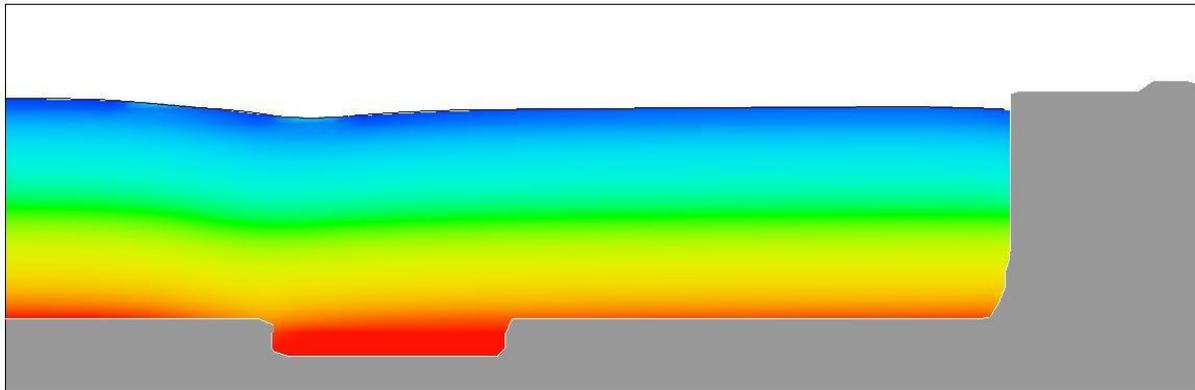
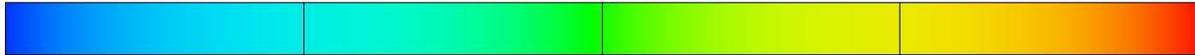


Figura 3.56 Distribución de la presión en la sección 7. Escenario 2.

Sección 8

Presión (Pa)

80

72560

145040

217520

290000

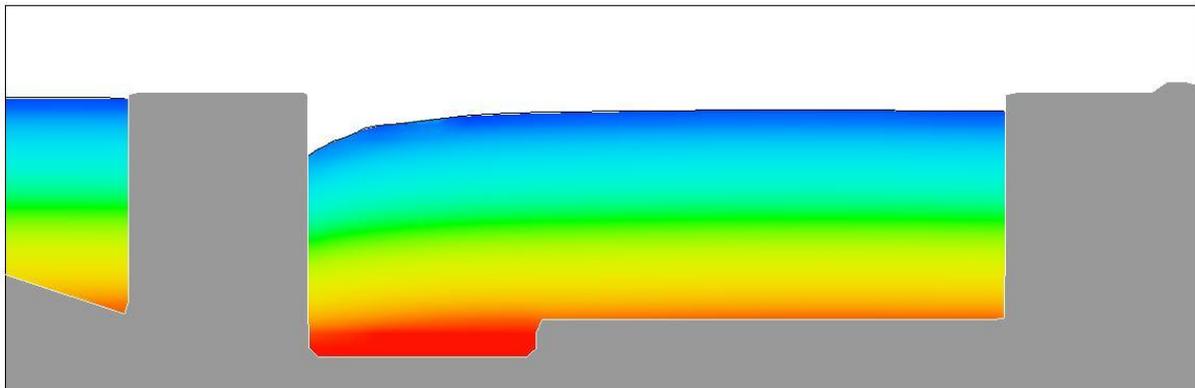


Figura 3.57 Distribución de la presión en la sección 8. Escenario 2.

Sección 9

Presión (Pa)

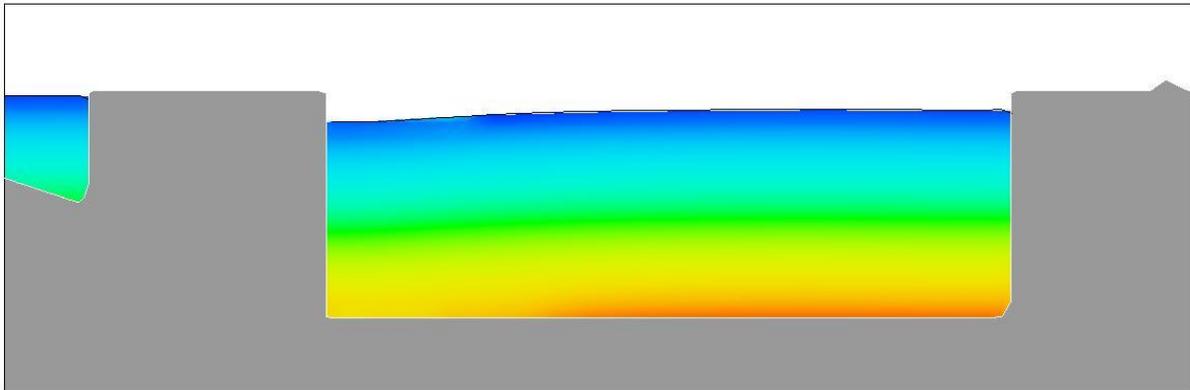


Figura 3.58 Distribución de la presión en la sección 9. Escenario 2.

Sección 1

Vx (m/s)

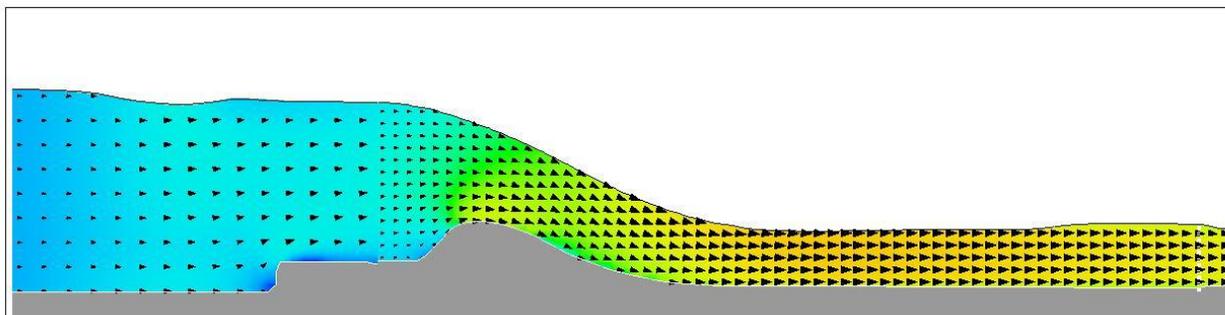


Figura 3.59 Distribución de la velocidad en X en la sección 1. Escenario 2.

Sección 2

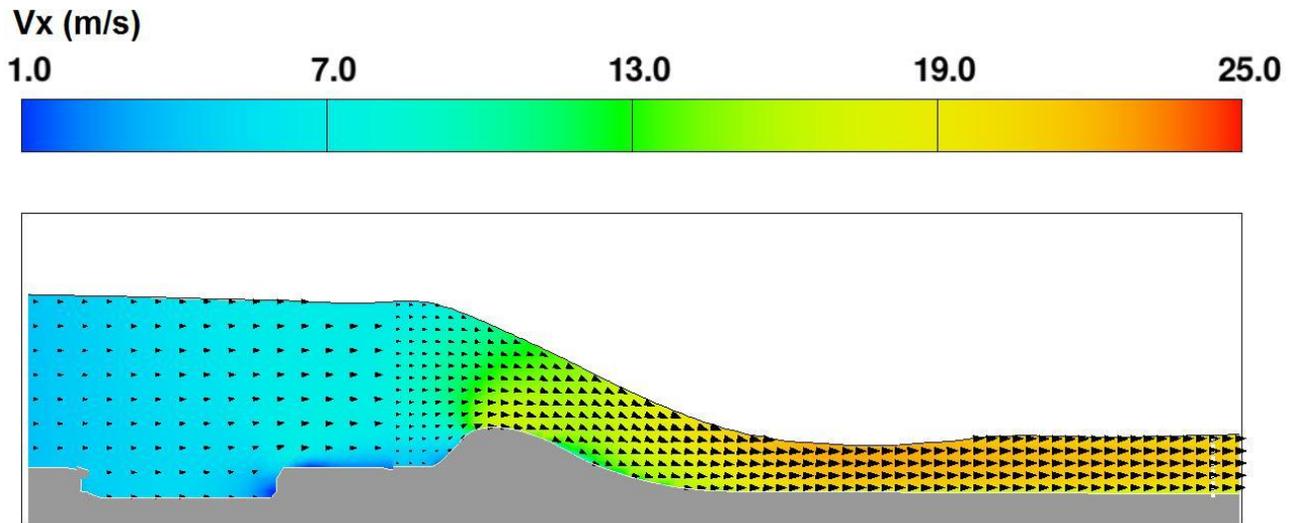


Figura 3.60 Distribución de la velocidad en X en la sección 2. Escenario 2.

Sección 3

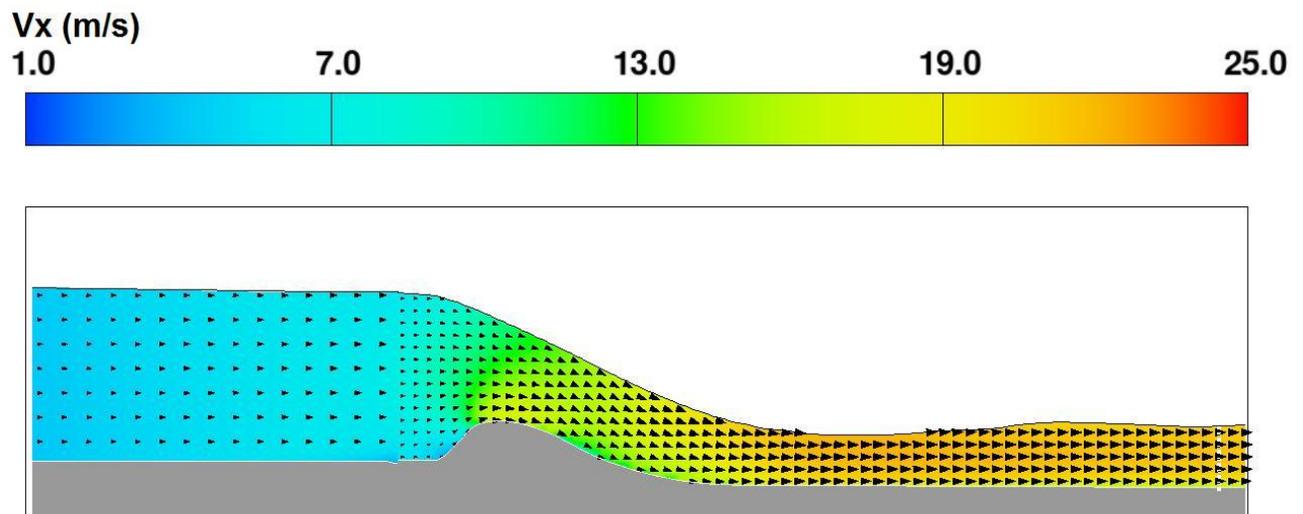


Figura 3.61 Distribución de la velocidad en X en la sección 3. Escenario 2.

Sección 4

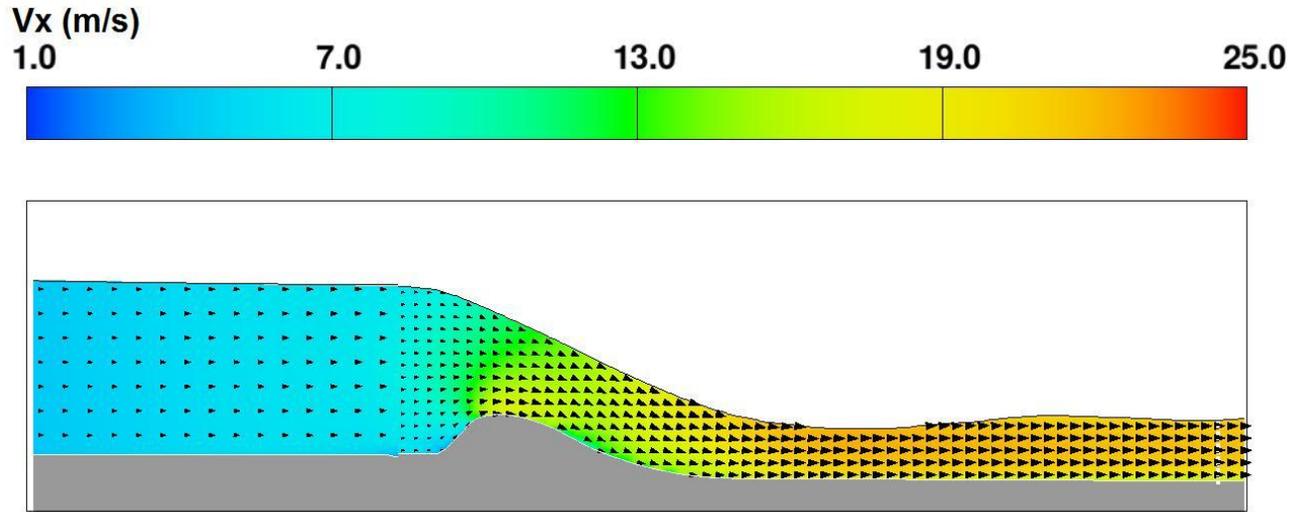


Figura 3.62 Distribución de la velocidad en X en la sección 4. Escenario 2.

Sección 5

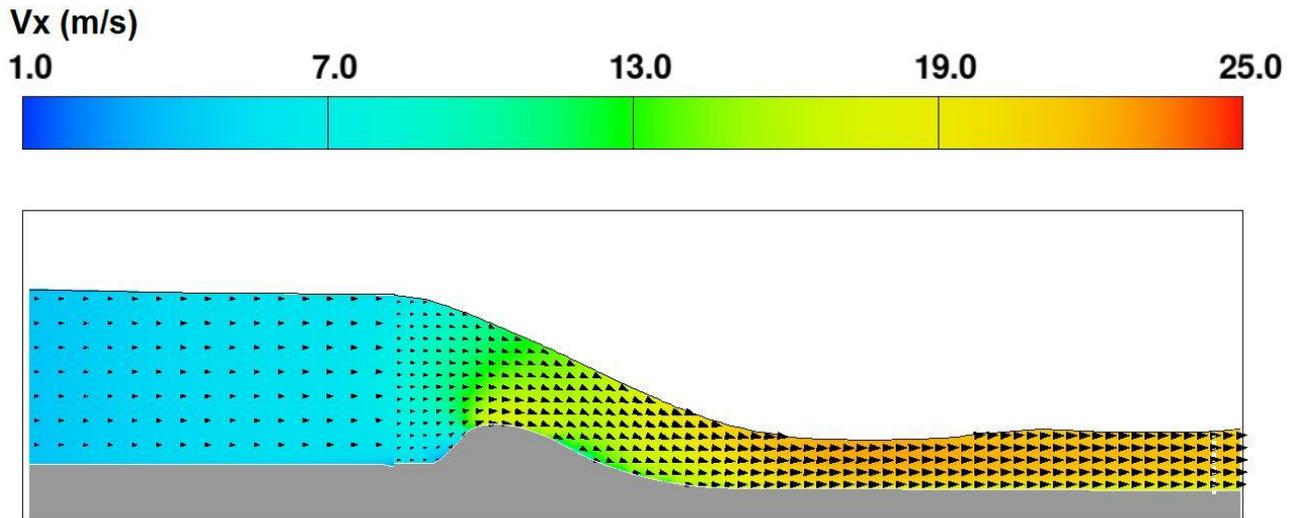


Figura 3.63 Distribución de la velocidad en X en la sección 5. Escenario 2.

Sección 6

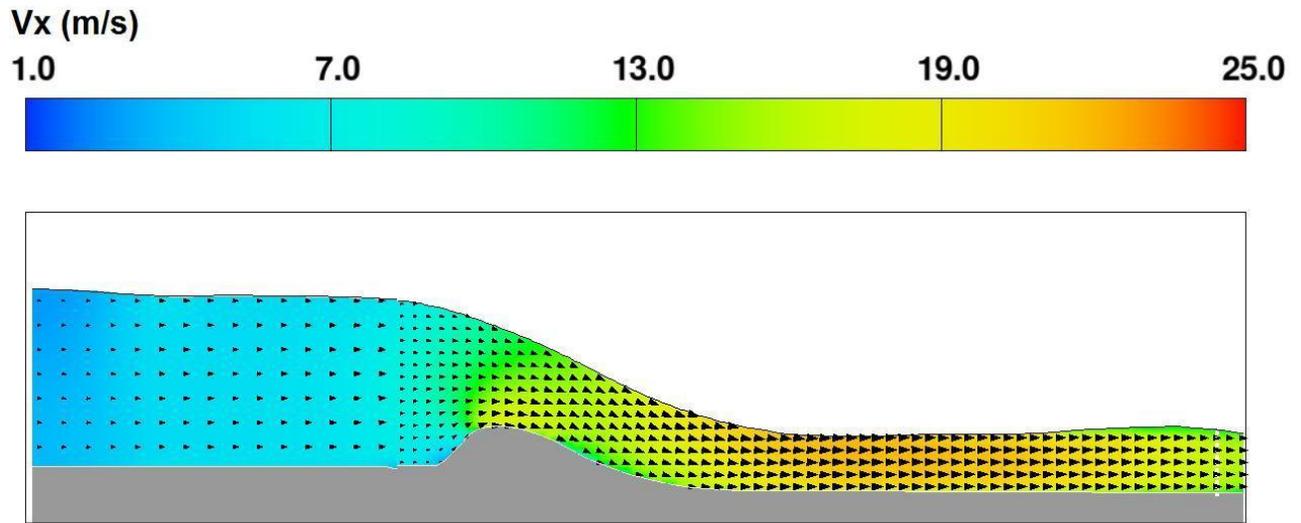


Figura 3.64 Distribución de la velocidad en X en la sección 6. Escenario 2.

Sección 7

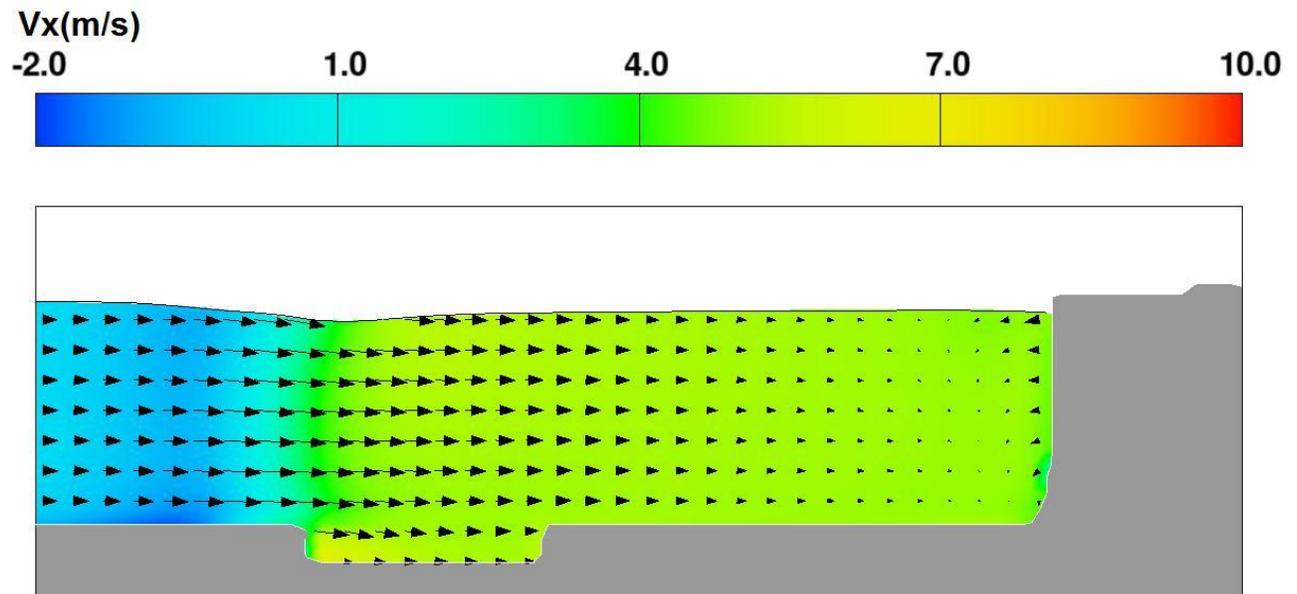


Figura 3.65 Distribución de la velocidad en X en la sección 7. Escenario 2.

Sección 8

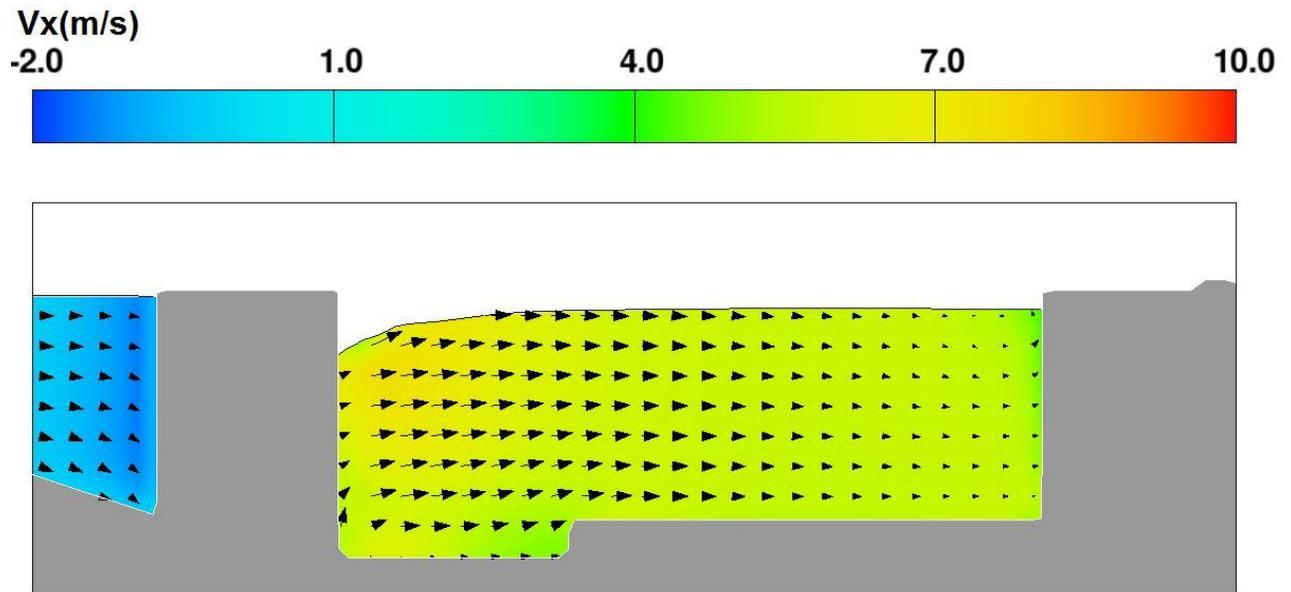


Figura 3.66 Distribución de la velocidad en X en la sección 8. Escenario 2.

Sección 9

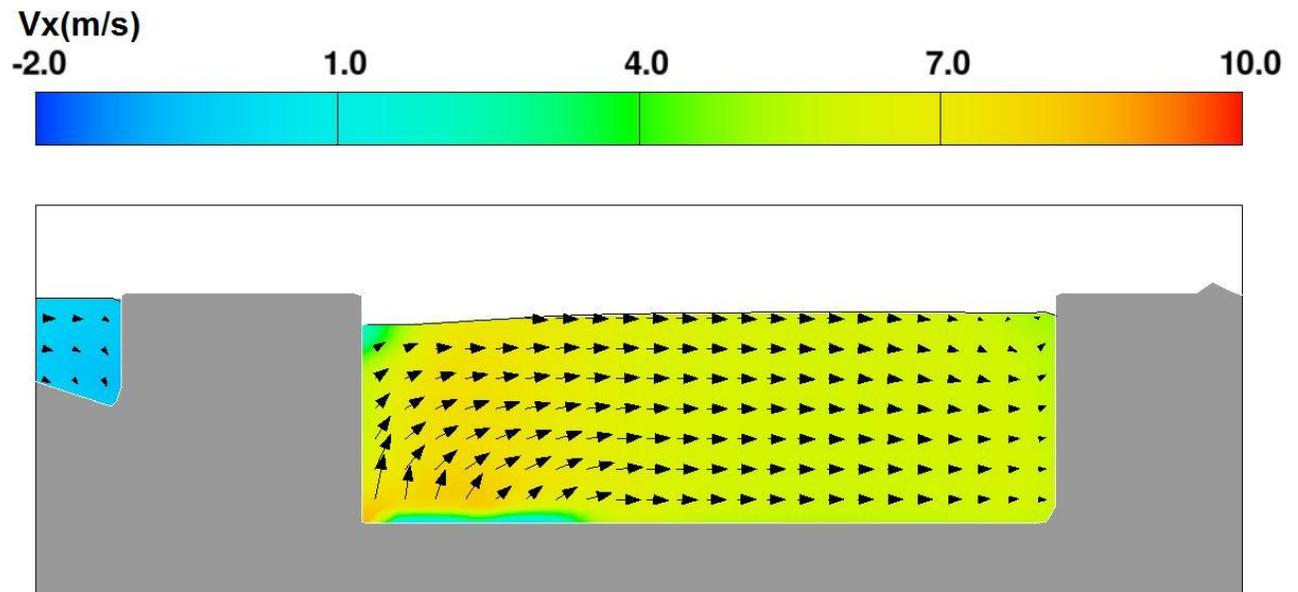


Figura 3.67 Distribución de la velocidad en X en la sección 9. Escenario 2.

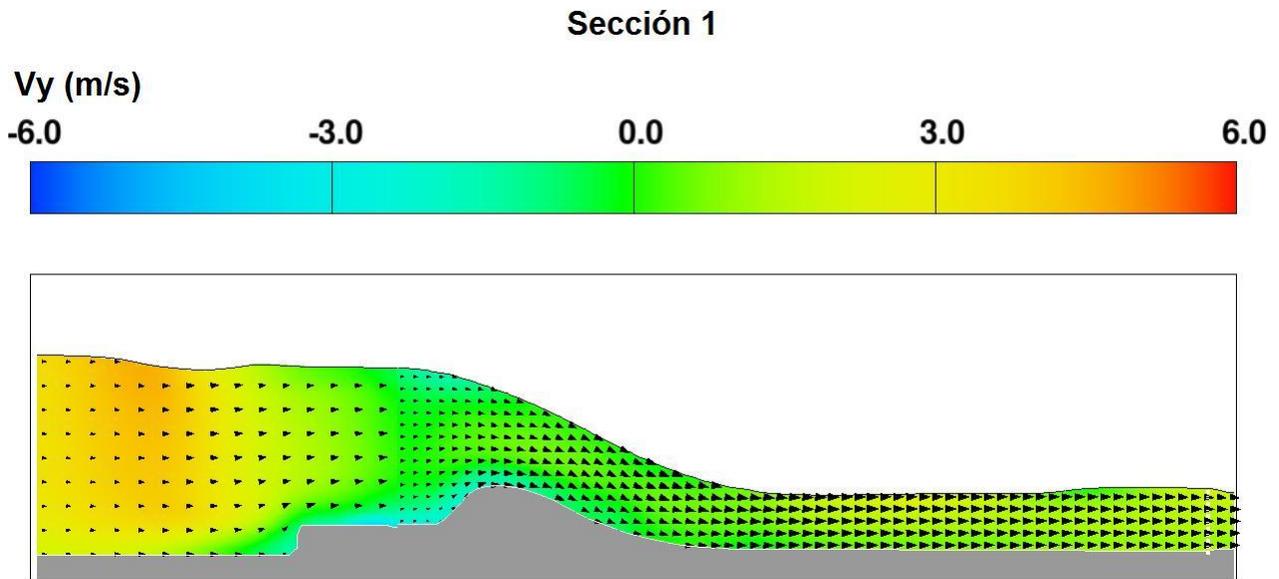


Figura 3.68 Distribución de la velocidad en Y en la sección 1. Escenario 2.

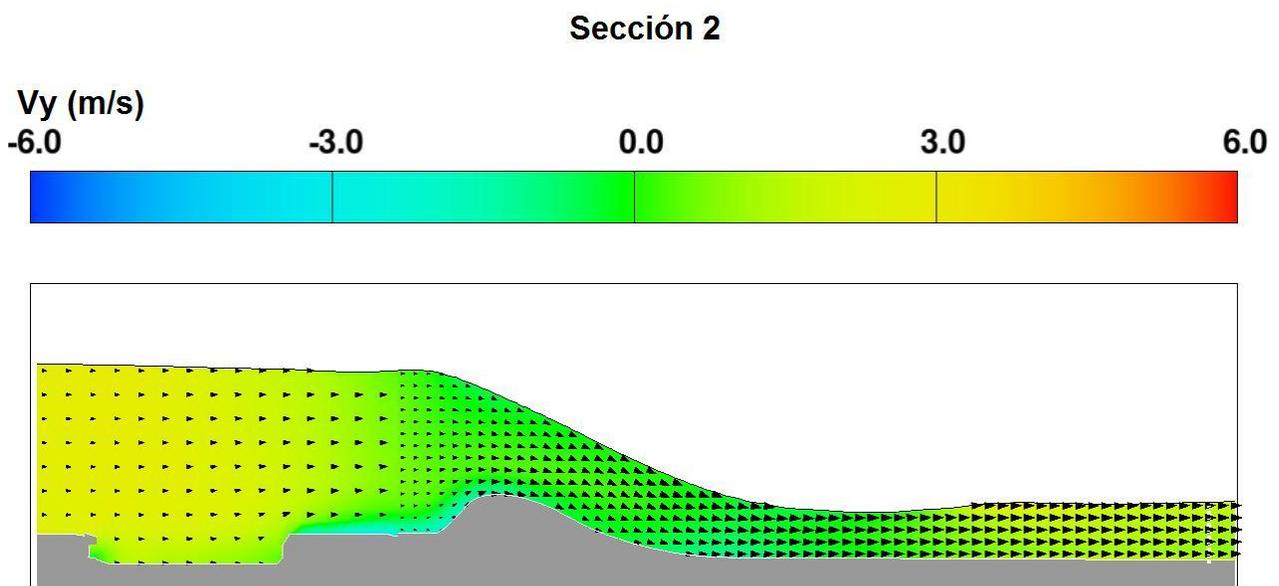


Figura 3.69 Distribución de la velocidad en Y en la sección 2. Escenario 2.

Sección 3

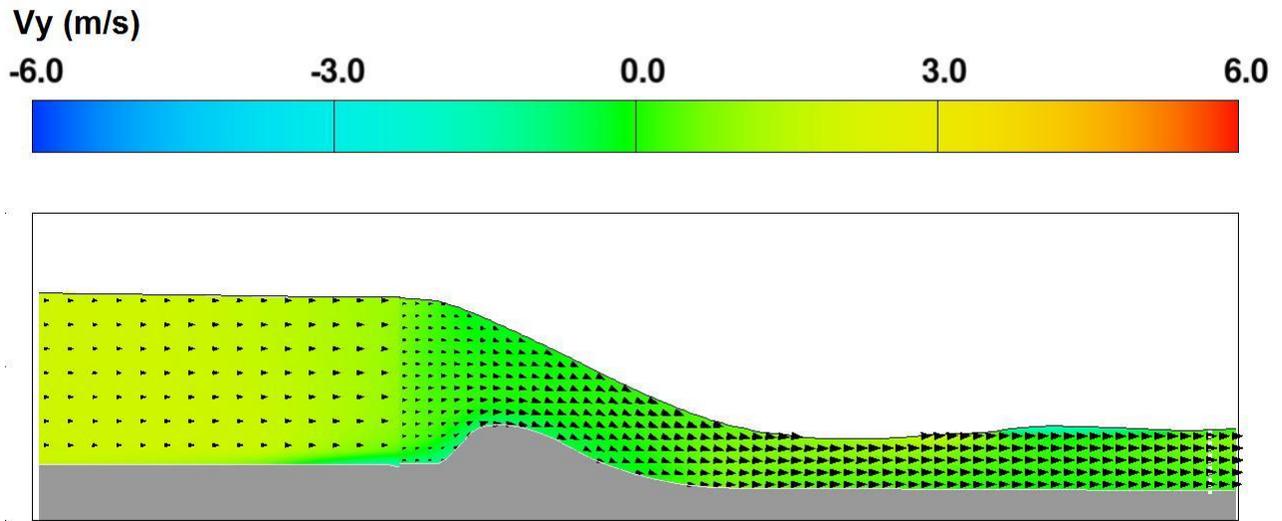


Figura 3.70 Distribución de la velocidad en Y en la sección 3. Escenario 2.

Sección 4

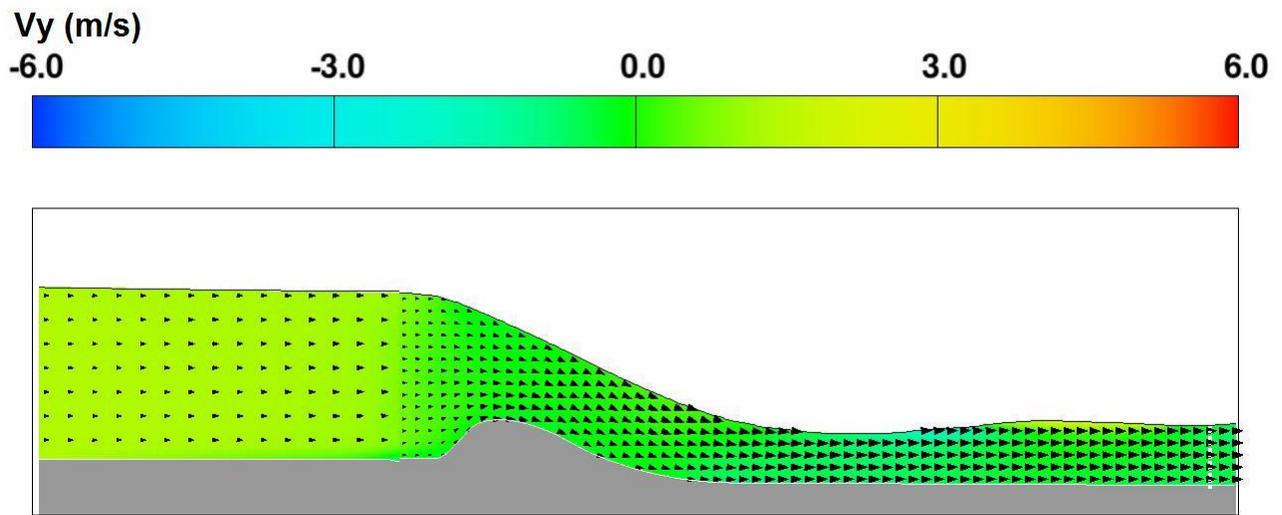


Figura 3.71 Distribución de la velocidad en Y en la sección 4. Escenario 2.

Sección 5

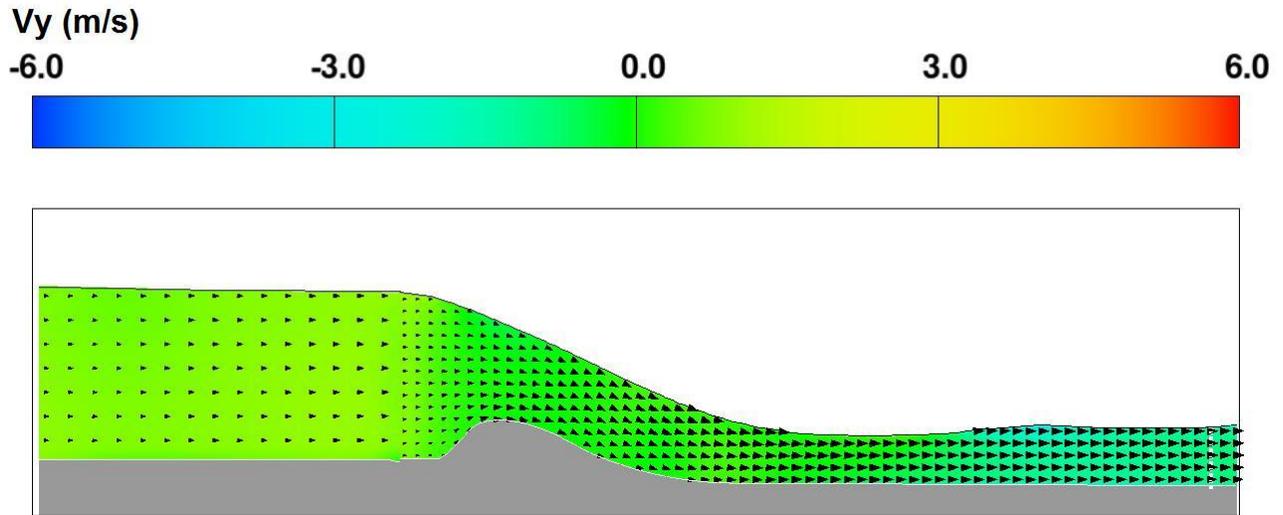


Figura 3.72 Distribución de la velocidad en Y en la sección 5. Escenario 2.

Sección 6

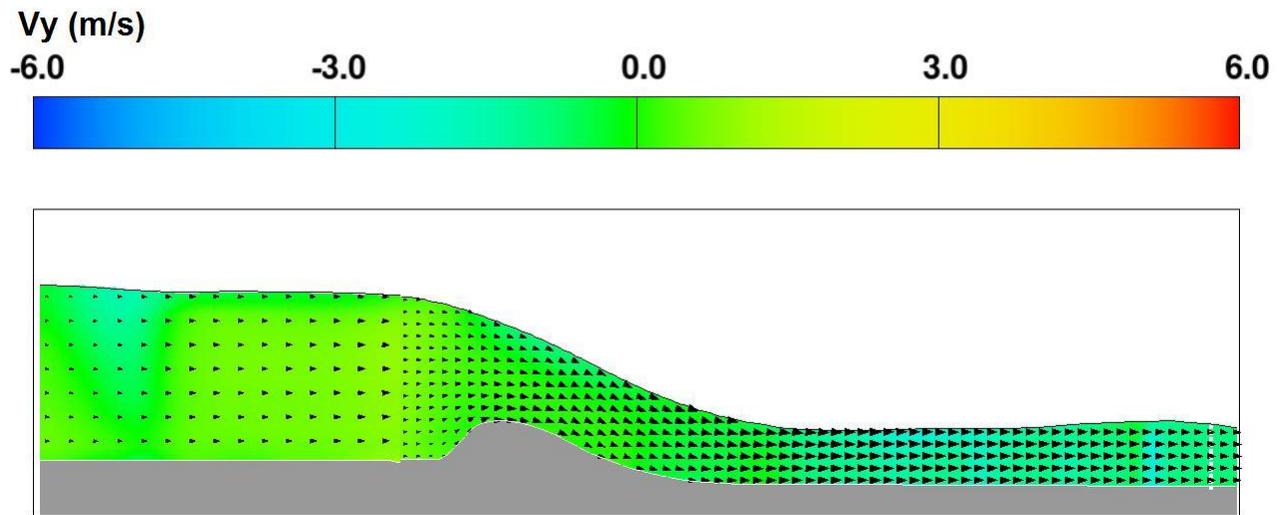


Figura 3.73 Distribución de la velocidad en Y en la sección 6. Escenario 2.

Sección 7

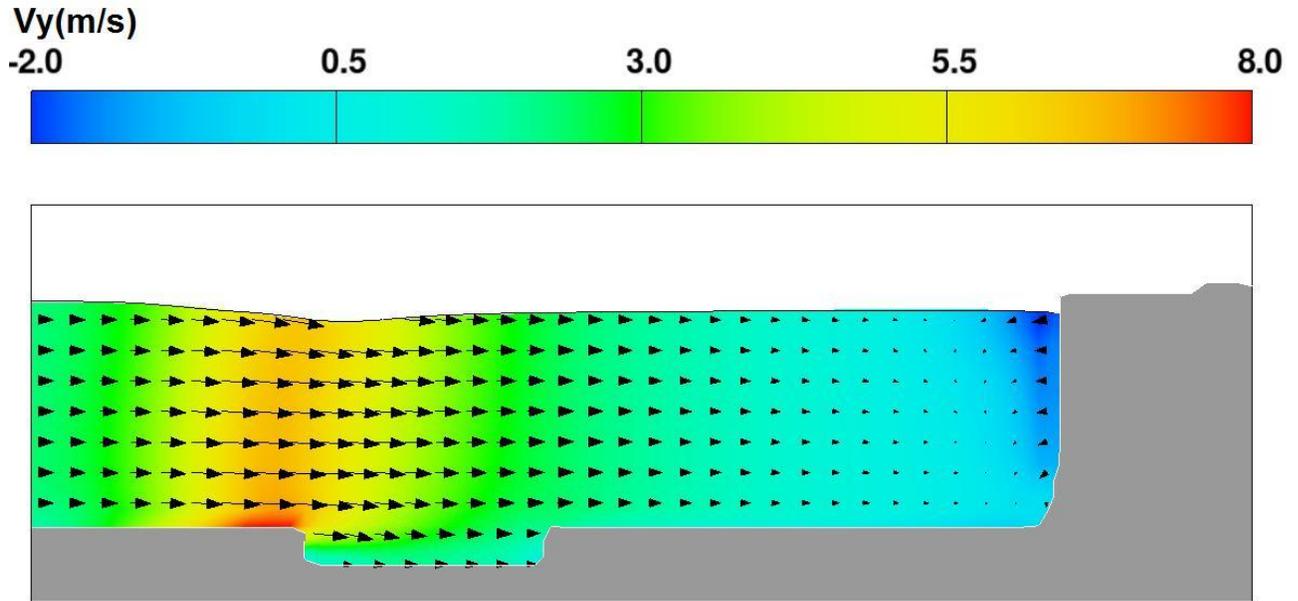


Figura 3.74 Distribución de la velocidad en Y en la sección 7. Escenario 2.

Sección 8

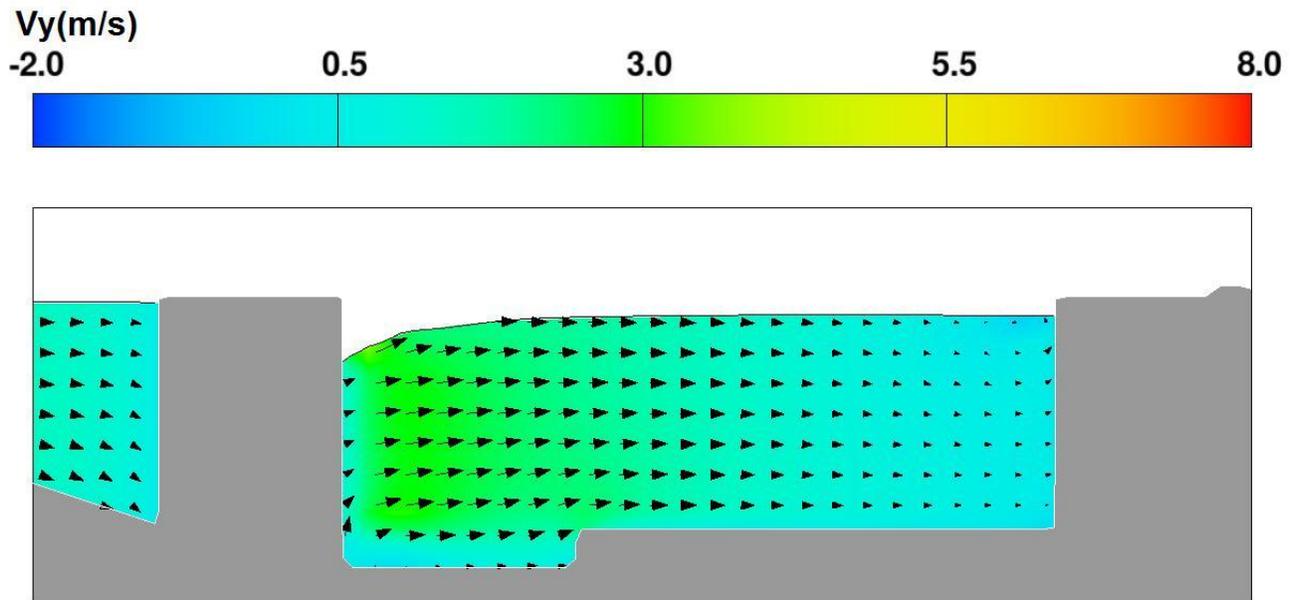


Figura 3.75 Distribución de la velocidad en Y en la sección 8. Escenario 2.

Sección 9

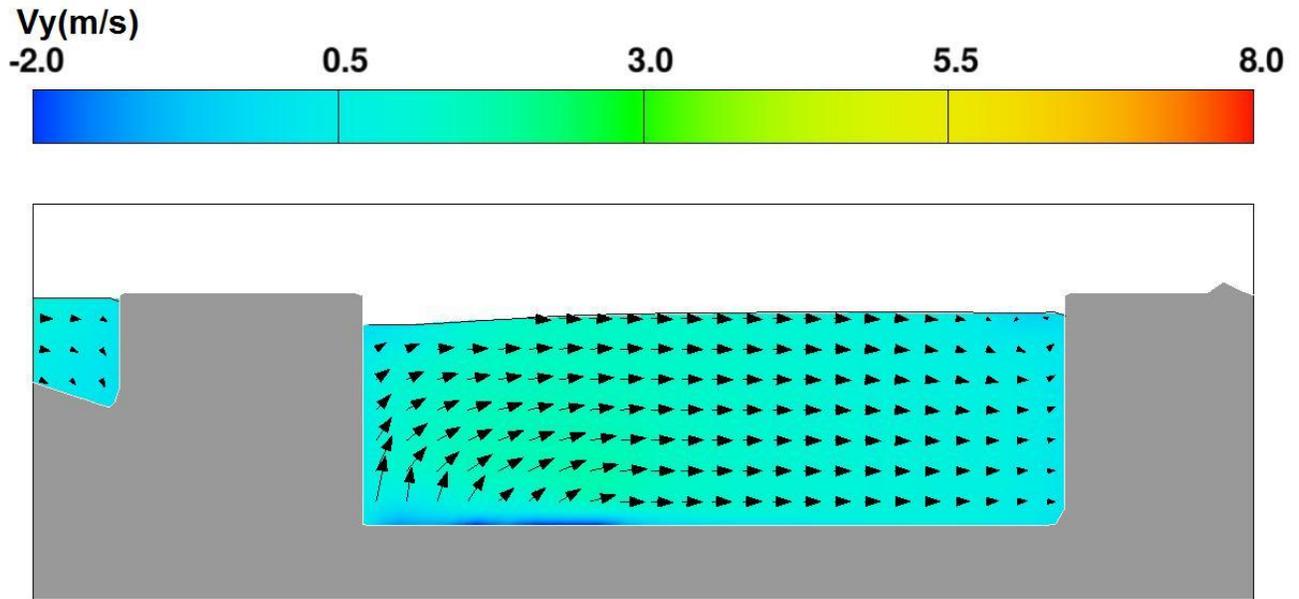


Figura 3.76 Distribución de la velocidad en Y en la sección 9. Escenario 2.

Sección 1

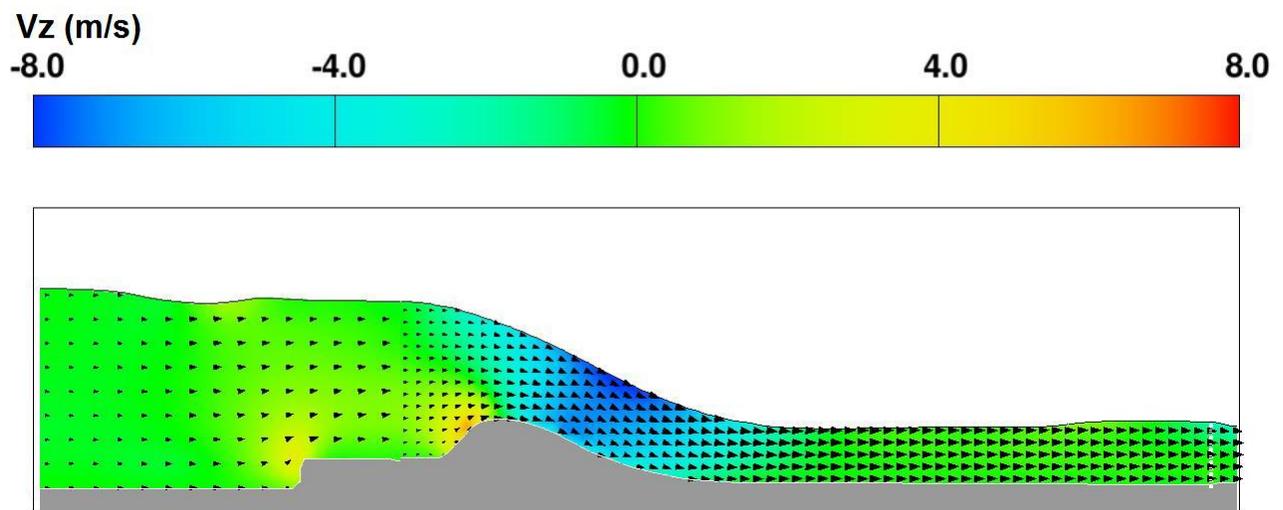


Figura 3.77 Distribución de la velocidad en Z en la sección 1. Escenario 2.

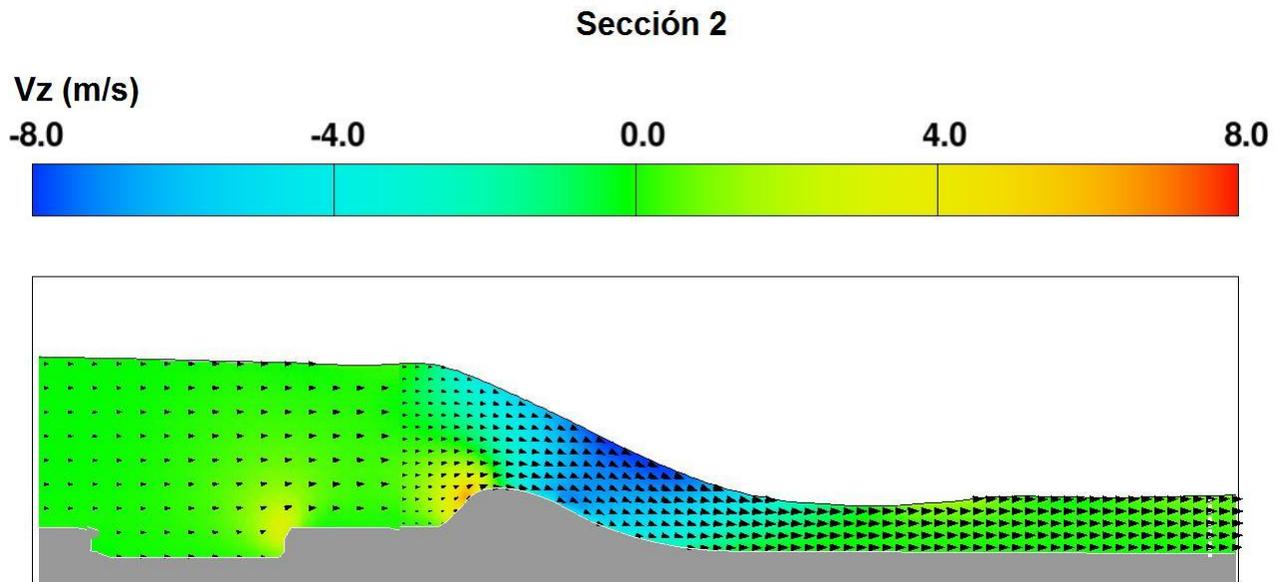


Figura 3.78 Distribución de la velocidad en Z en la sección 2. Escenario 2.

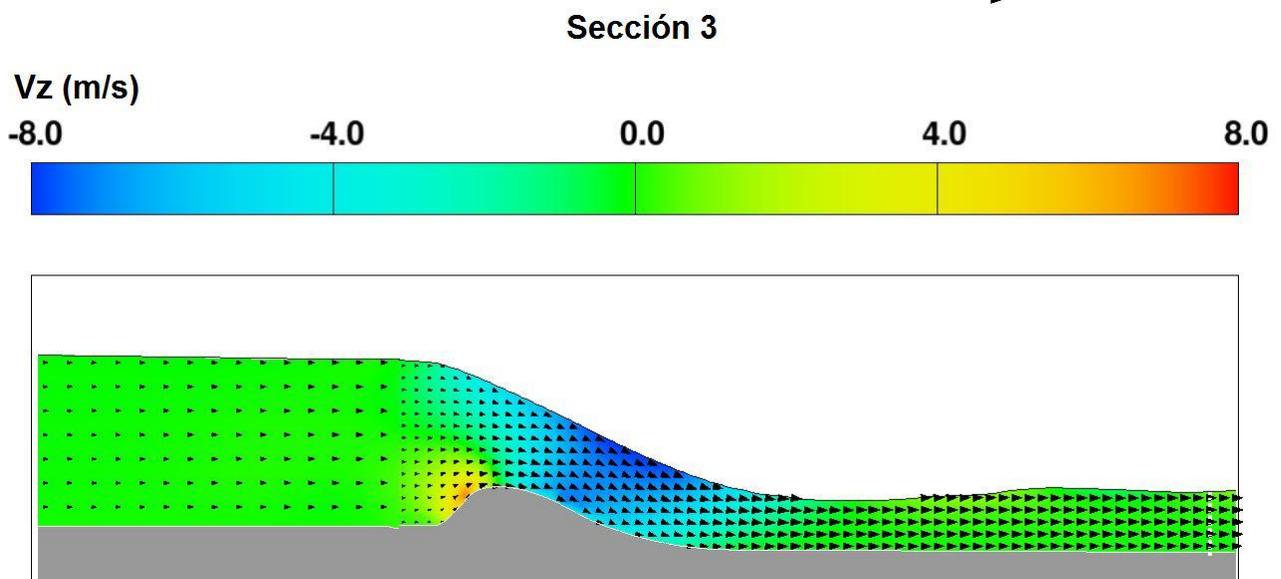


Figura 3.79 Distribución de la velocidad en Z en la sección 3. Escenario 2.

Sección 4

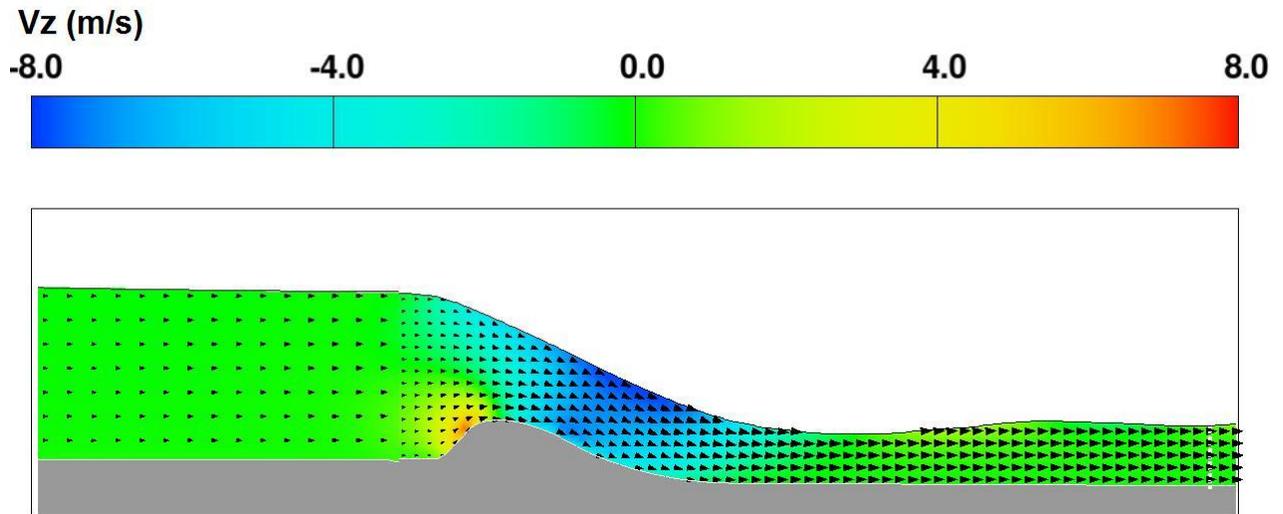


Figura 3.80 Distribución de la velocidad en Z en la sección 4. Escenario 2.

Sección 5

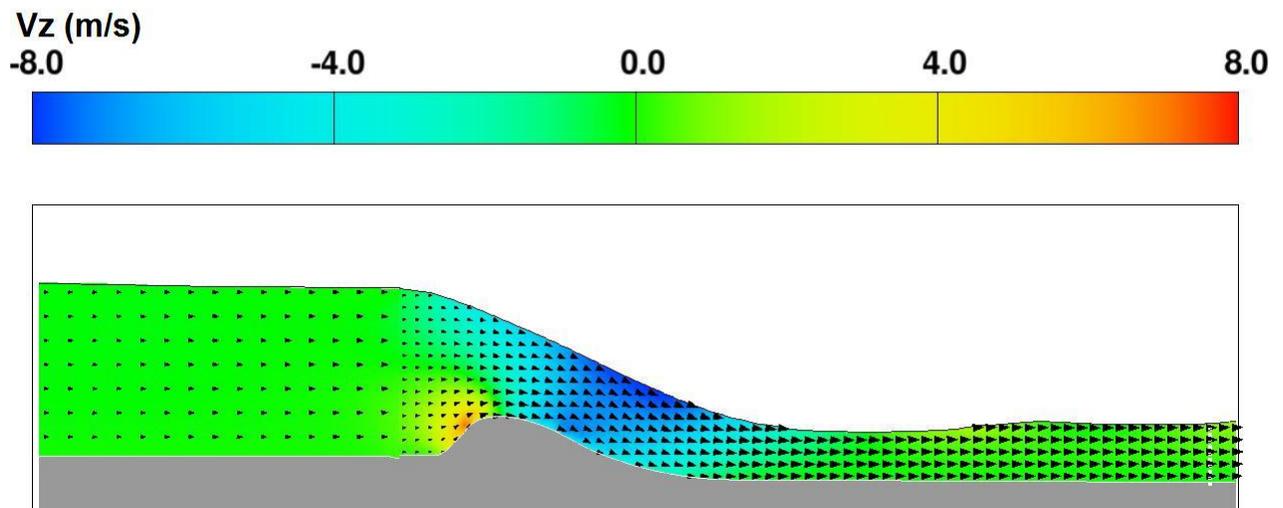


Figura 3.81 Distribución de la velocidad en Z en la sección 5. Escenario 2.

Sección 6

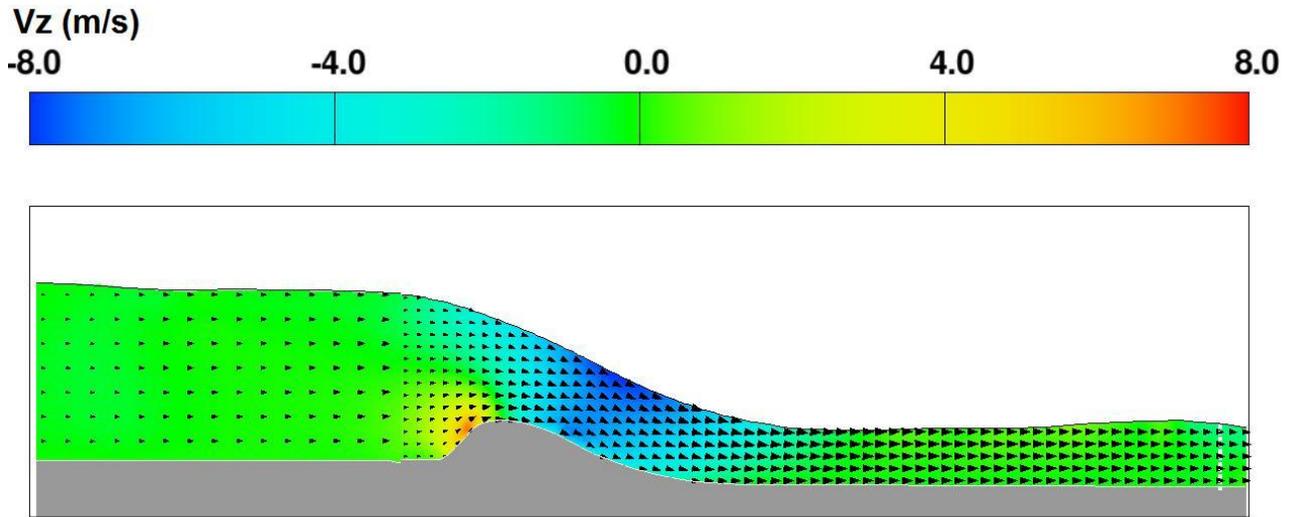


Figura 3.82 Distribución de la velocidad en Z en la sección 6. Escenario 2.

Sección 7

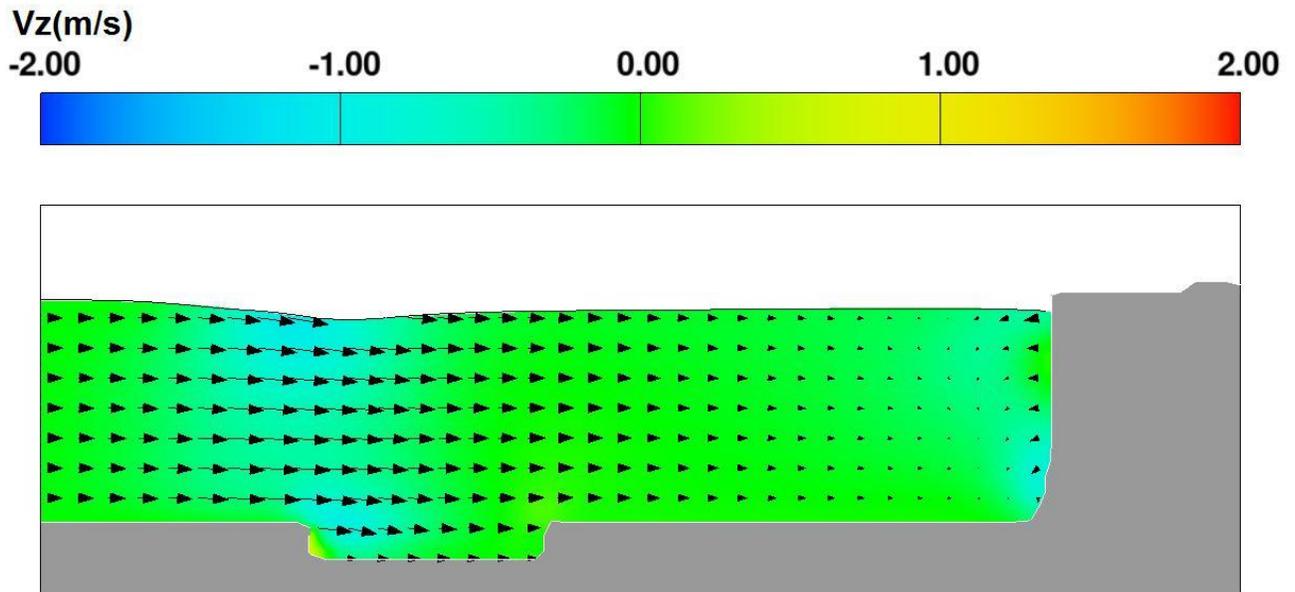


Figura 3.83 Distribución de la velocidad en Z en la sección 7. Escenario 2.

Sección 8

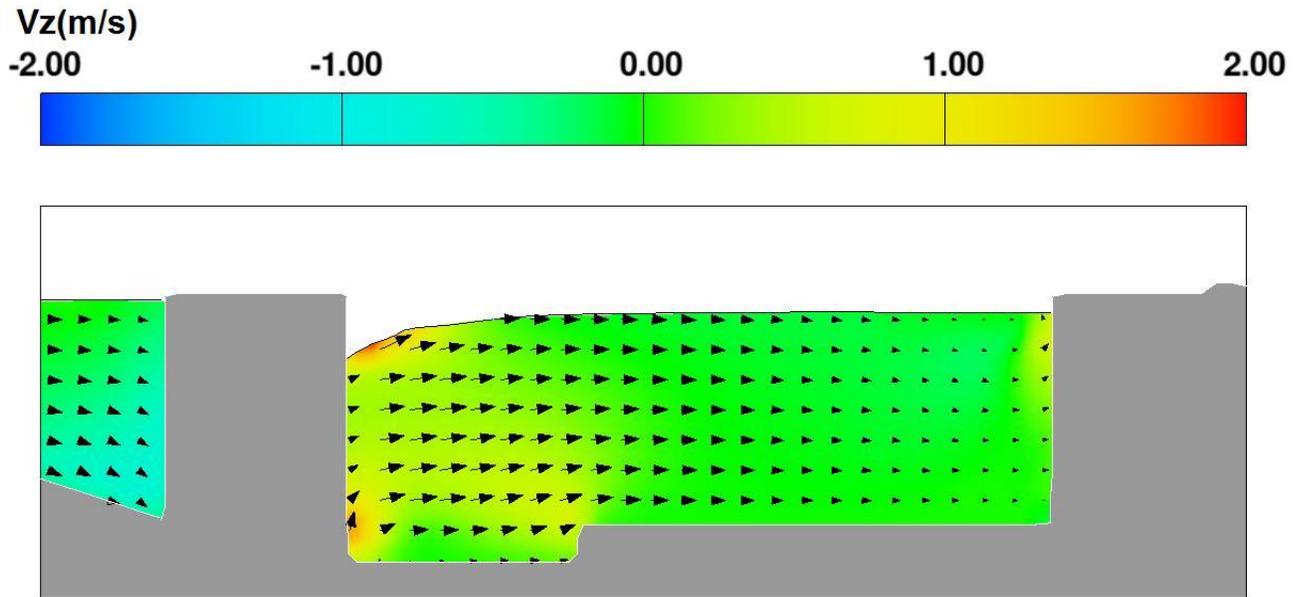


Figura 3.84 Distribución de la velocidad en Z en la sección 8. Escenario 2.

Sección 9

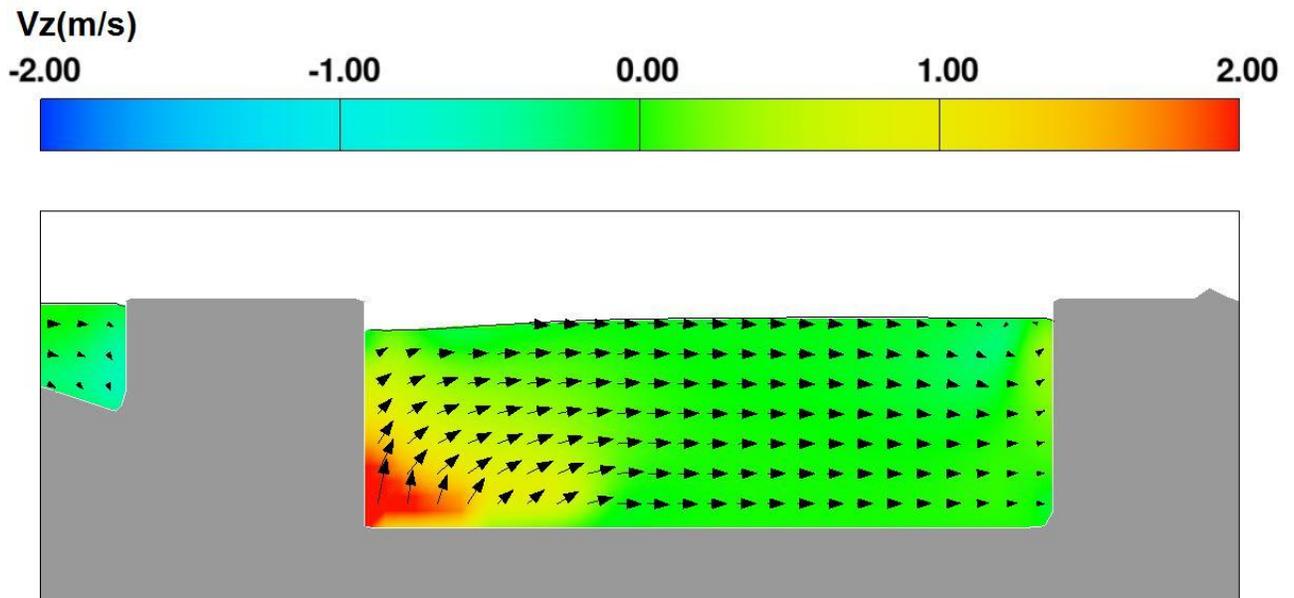


Figura 3.85 Distribución de la velocidad en Z en la sección 9. Escenario 2.

Para observar un poco mejor los cambios en la distribución del flujo, se muestran las líneas de corriente tanto en planta (Figura 3.86) como en perspectiva (Figura 3.87). A diferencia del escenario 1, puede observarse que la fosa tiene gran influencia en el campo de flujo.

Finalmente, para evaluar el desempeño de la fosa en la disminución de la magnitud de la depresión de la superficie libre, se graficó ésta para ambos escenarios de simulación (Figura 3.88). Como se mencionó al inicio de este inciso la diferencia máxima entre los niveles aguas arriba y los de la depresión fue de 7 m, es decir, un metro menos que en el caso del canal de llamada sin fosa. Ello puede observarse en la figura anterior donde la depresión del campo de flujo fue menor, ya que se disminuyó el gradiente de la superficie libre en la toda la región de la fosa.

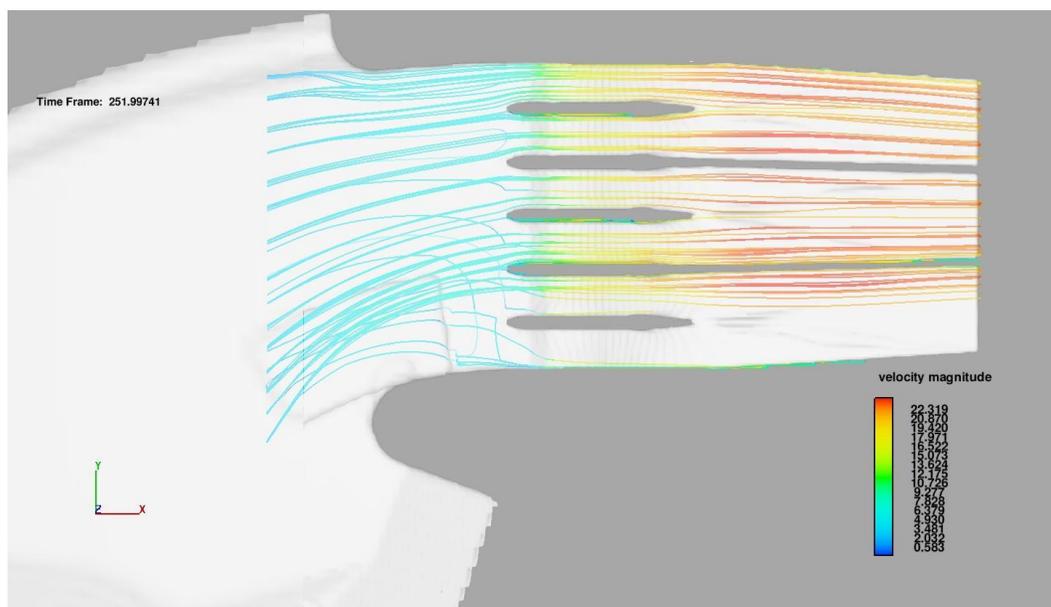


Figura 3.86 Vista en planta de las líneas de corriente. Escenario 2.

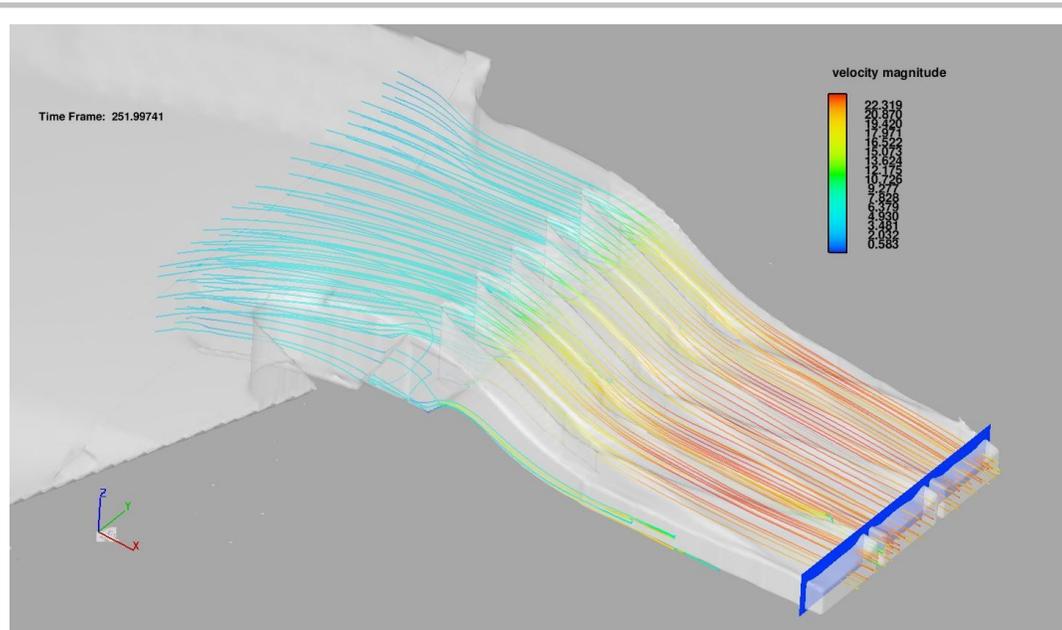


Figura 3.87 Perspectiva de las líneas de corriente. Escenario 2.

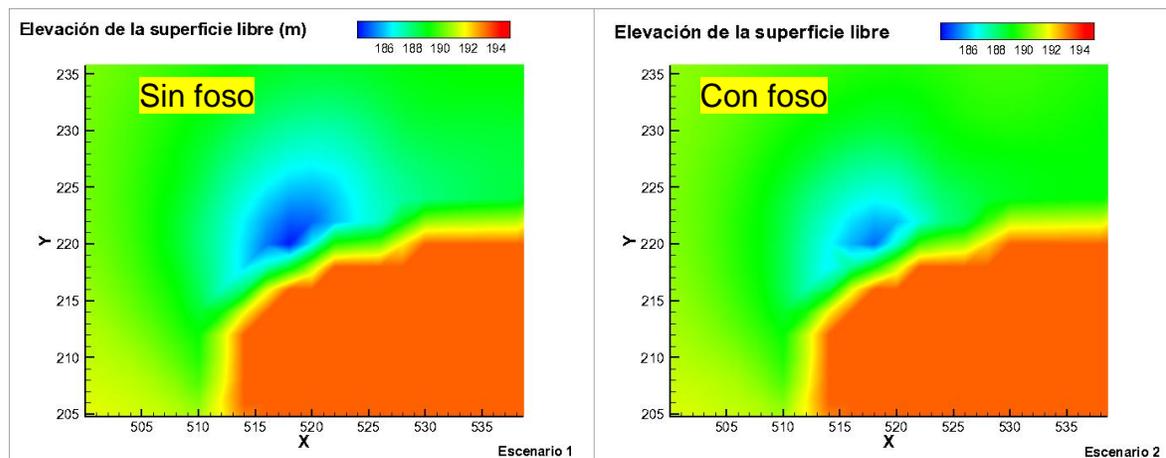


Figura 3.88 Comparación de la elevación de la superficie libre en la zona de la depresión.

3.4 Comparación de resultados medidos contra simulados.

Con fin de validar las simulaciones numéricas, se hizo una comparación entre los valores medidos y calculados de velocidades y tirantes dentro del canal de llamada. Para ello se hizo uso de la nomenclatura utilizada en la Figura 2.3.

De la Figura 3.89 a la Figura 3.92 se muestran las comparaciones de los niveles medidos de la superficie libre contra los simulados a lo largo de los ejes de medición. En estas gráficas se incluyen los dos escenarios de simulación sin (SF) y con fosa (CF) que corresponden a los escenarios 1 y 2, respectivamente. Los datos medidos se tomaron como los correspondientes al escenario de modelación 1.

Para el eje *a'*, la diferencia máxima entre los niveles de la superficie libre medidos contra los calculados fue del orden de los 50 cm, la cual se presentó en el punto o posición *a-6* (Figura 3.89). Puede observarse que en general los tirantes disminuyen ligeramente con la fosa como se muestra en los puntos *a-4* a *a-6* y aumenta en el *a-7*. Sin embargo es importante señalar que estas variaciones son menores al 1%. En el caso de los ejes *b*, *c* y *d* las diferencias máximas se presentan en los puntos 7 (Figura 3.90), 8 (Figura 3.91) y 12 (Figura 3.92), con valores del 1.9, 2.38 y 7.26% respectivamente. Llama la atención este último valor, sin embargo como se verá más adelante, la magnitud de velocidad también presenta una variación importante incluso en el perfil de velocidades medido.

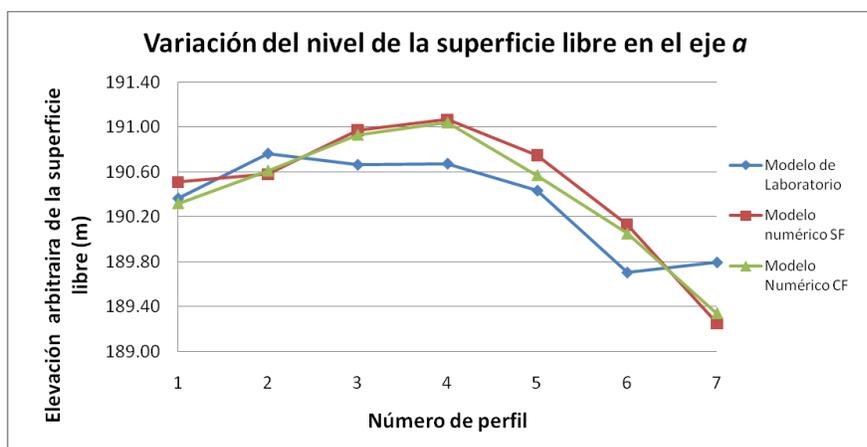


Figura 3.89 Variación del nivel de la superficie libre del agua a lo largo del eje *a*.

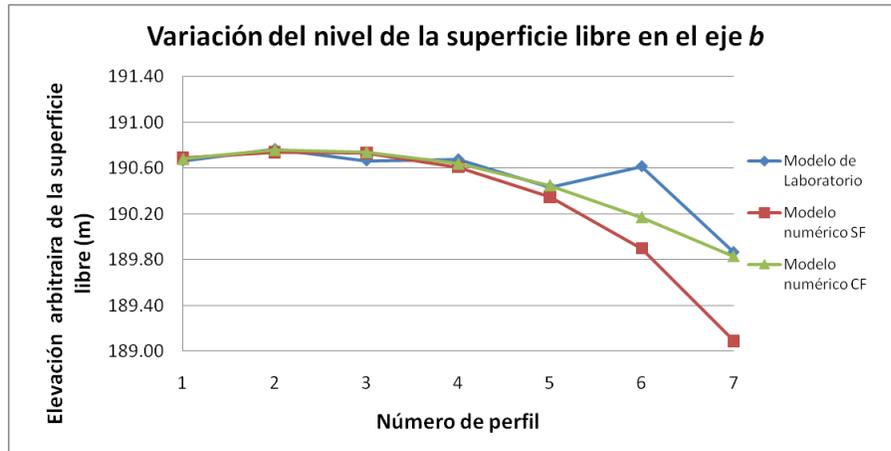


Figura 3.90 Variación del nivel de la superficie libre del agua a lo largo del eje b.

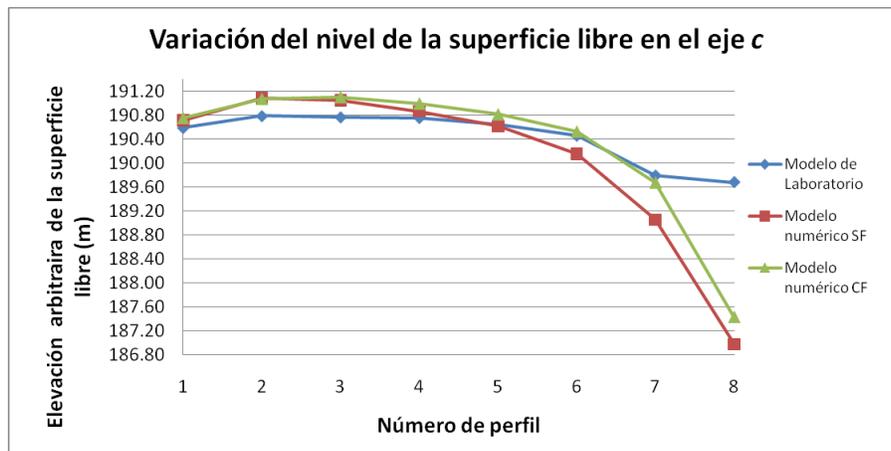


Figura 3.91 Variación del nivel de la superficie libre del agua a lo largo del eje c.

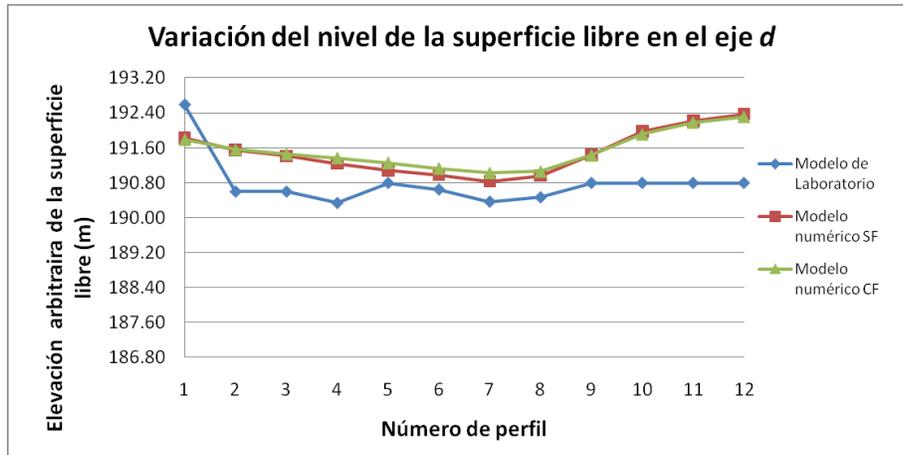


Figura 3.92 Variación del nivel de la superficie libre del agua a lo largo del eje *d*.

De la Figura 3.93 a la Figura 3.103, se presentan las comparaciones entre los valores medidos y calculados de los perfiles de velocidad con la profundidad. Es importante señalar que la velocidad comparada corresponde a la componente de velocidad en X.

A diferencia de la similitud que existe entre la comparación de gastos y tirantes, para estos datos las diferencias llegan a ser en muchos casos del orden del 25%. En este caso hay muchas cosas que se deben en tomar en cuenta ante tales diferencias, como la escala del modelo, el equipo de medición de la velocidad y su precisión, así como la orientación del mismo. Puede observarse en toda la serie de figuras, que muchos de los perfiles medidos y calculados coinciden en forma y orden de magnitud. También puede observarse que en algunas zonas la velocidad disminuye ligeramente con la fosa.

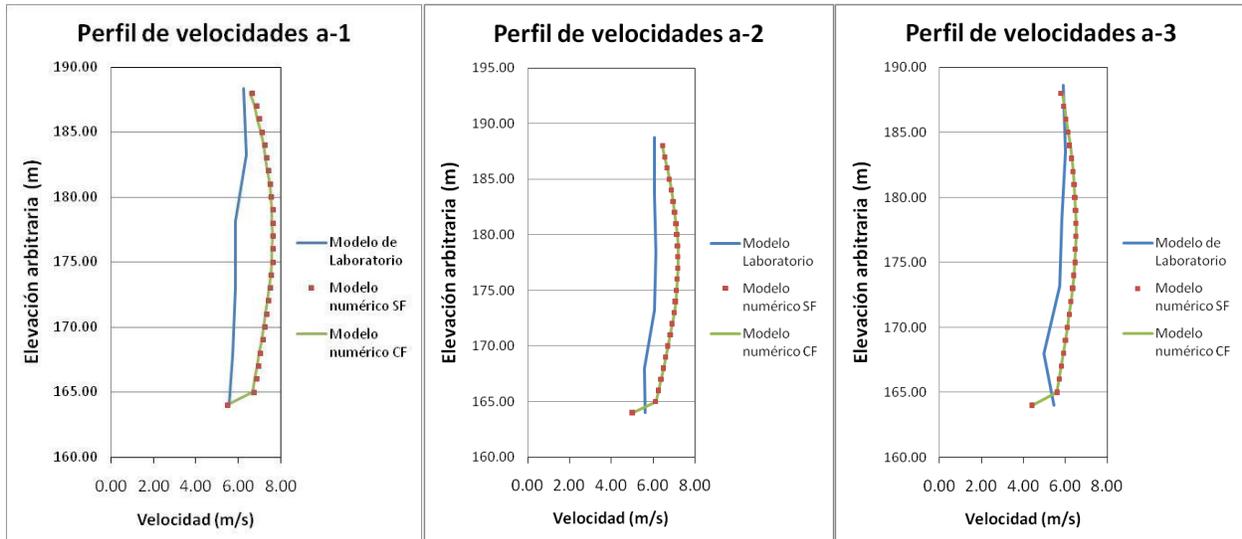


Figura 3.93 Perfiles de velocidad para las posiciones a-1, a-2 y a-3.

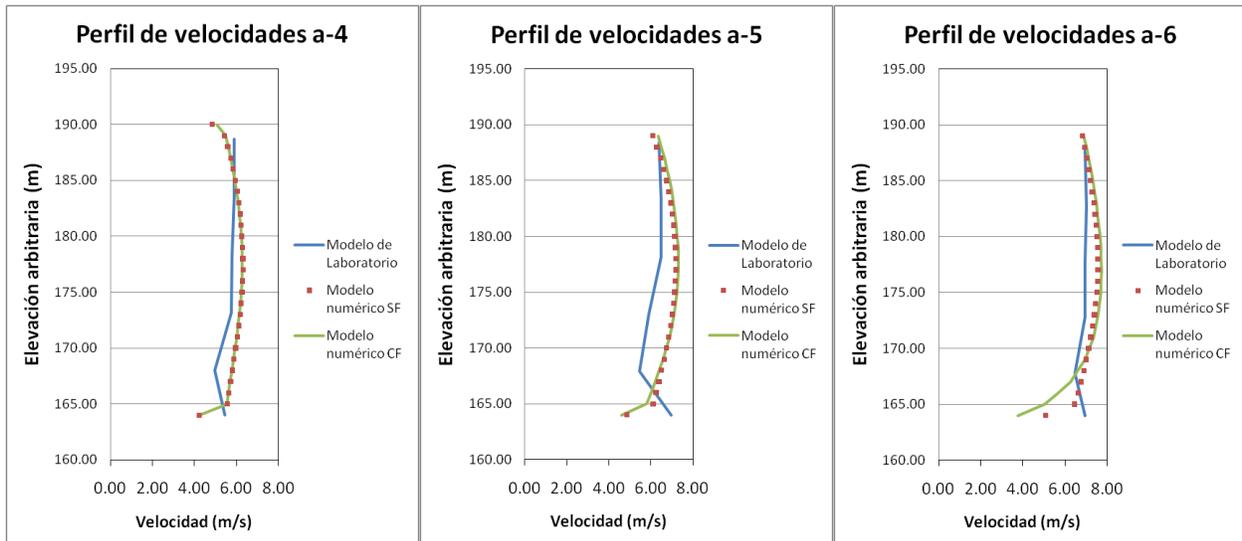


Figura 3.94 Perfiles de velocidad para las posiciones a-4, a-5 y a-6.

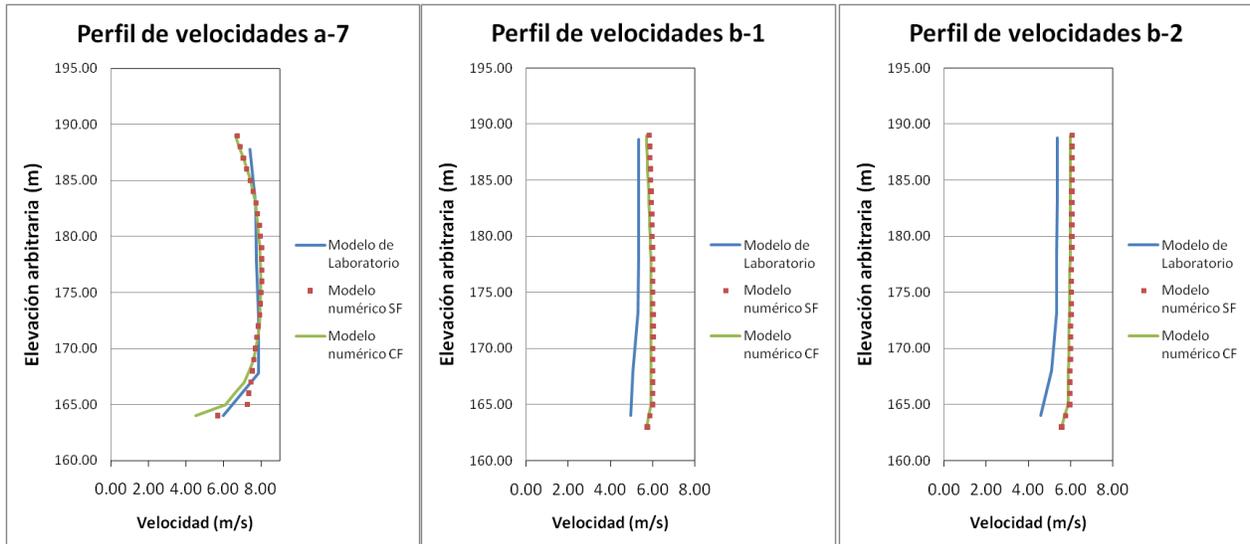


Figura 3.95 Perfiles de velocidad para las posiciones a-7, b-1 y b-2.

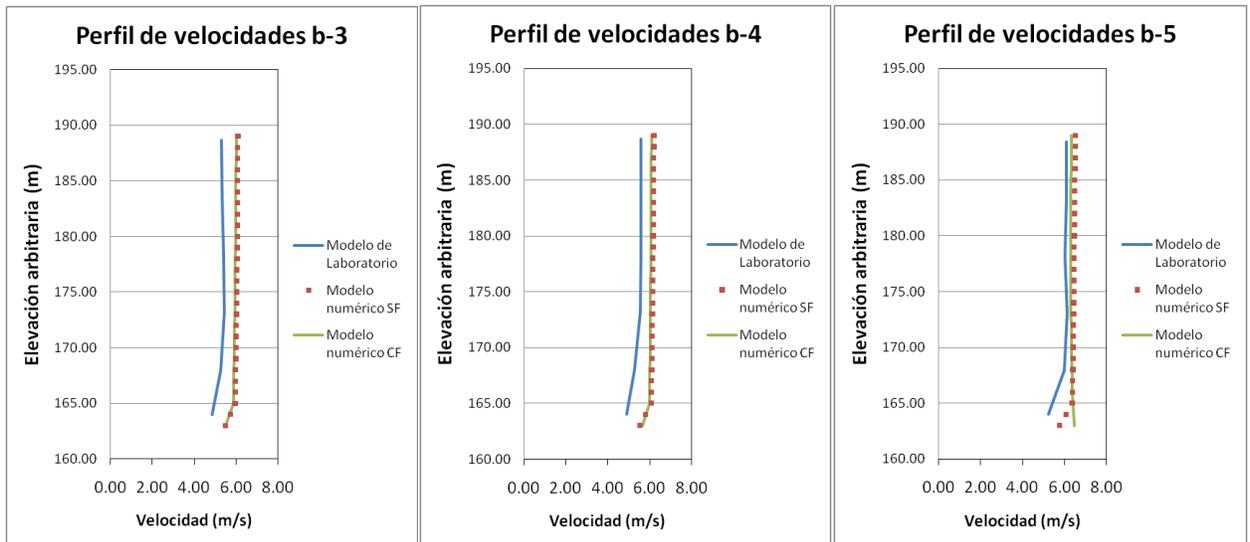


Figura 3.96 Perfiles de velocidad para las posiciones b-3, b-4 y b-5.

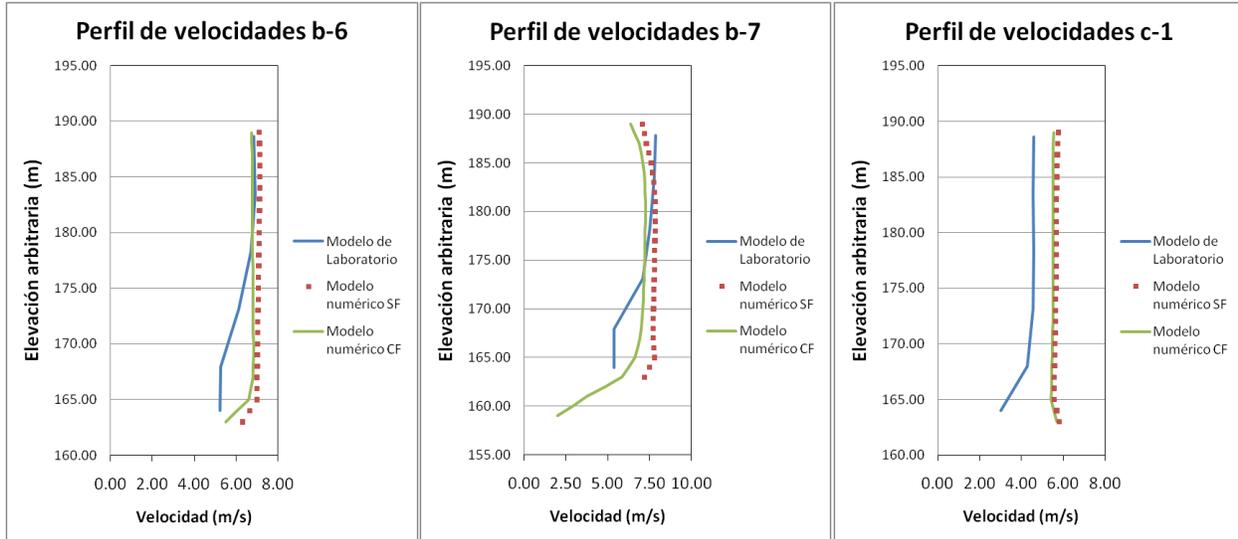


Figura 3.97 Perfiles de velocidad para las posiciones b-6, b-7 y c-1.

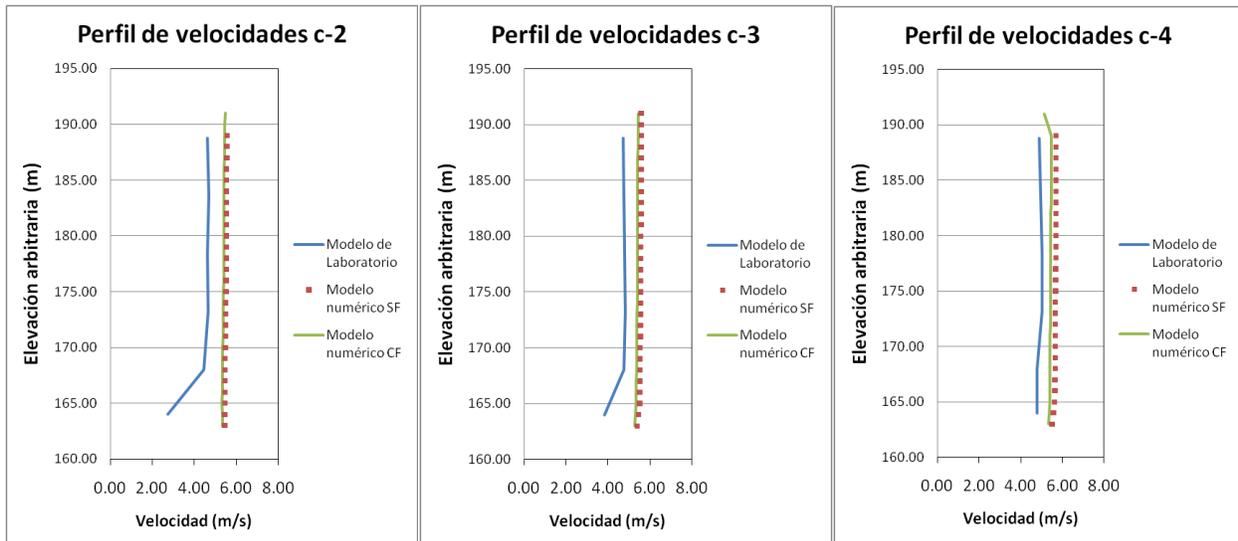


Figura 3.98 Perfiles de velocidad para las posiciones c-2, c-3 y c-4.

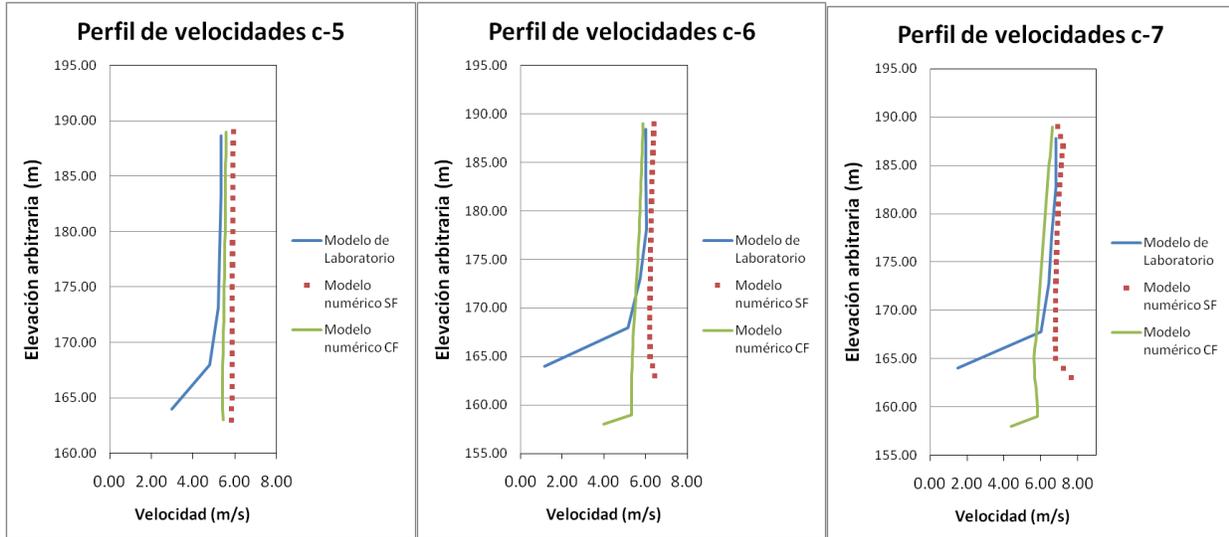


Figura 3.99 Perfiles de velocidad para las posiciones c-5, c-6 y c-7.

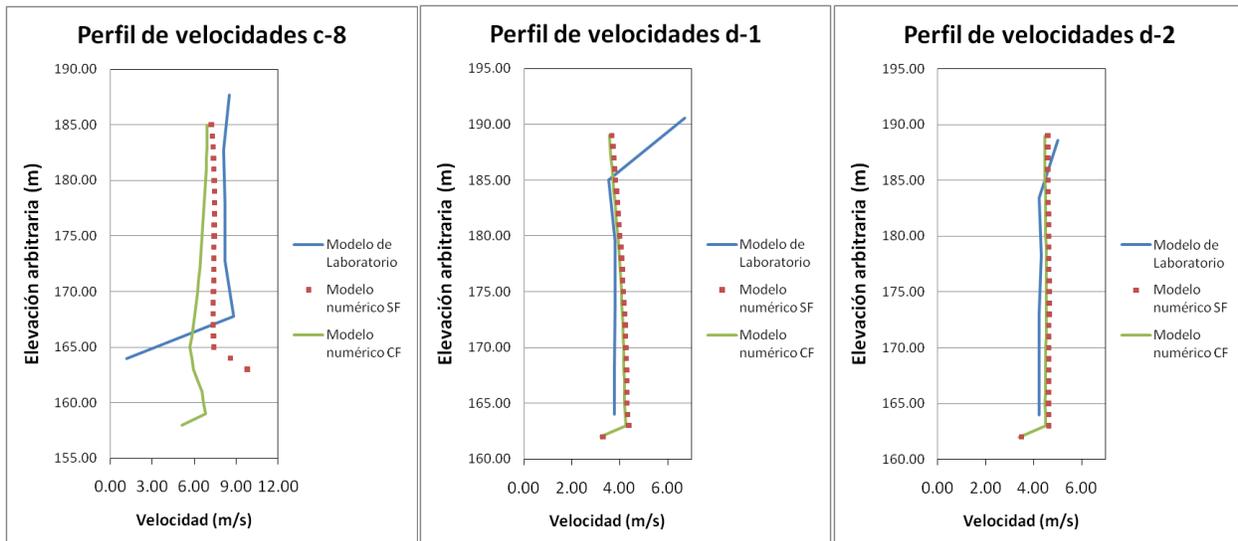


Figura 3.100 Perfiles de velocidad para las posiciones c-8, d-1 y d-2.

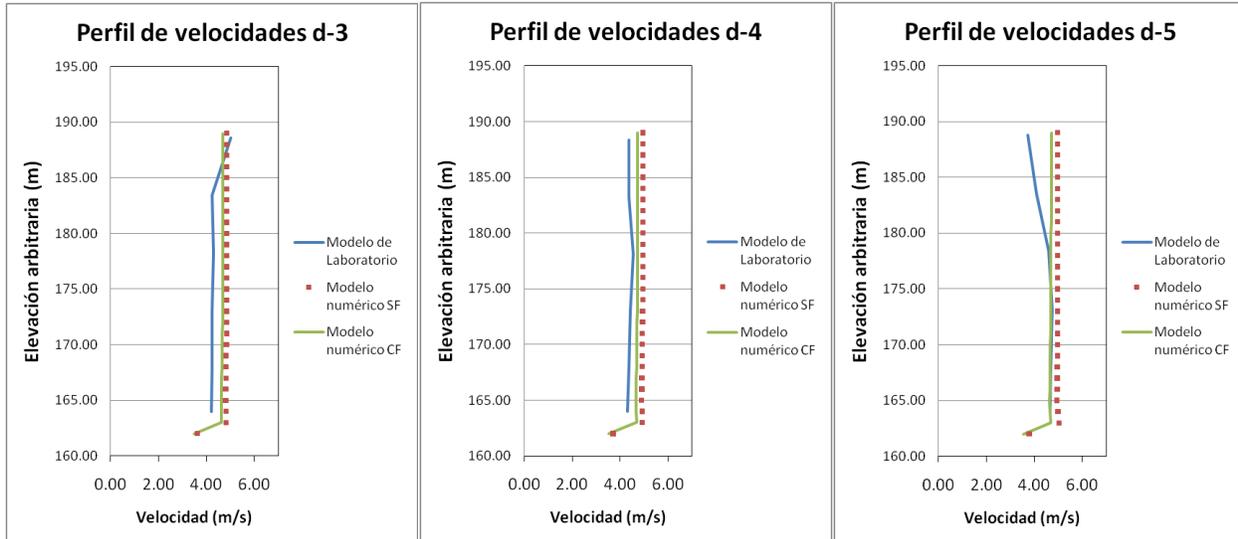


Figura 3.101 Perfiles de velocidad para las posiciones d-3, d-4 y d-5.

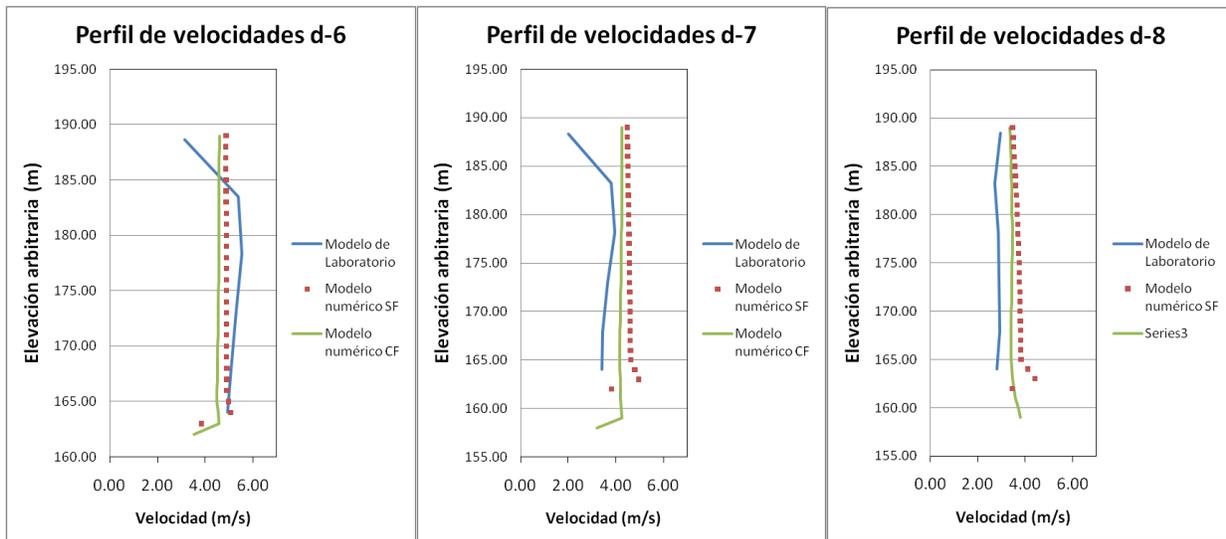


Figura 3.102 Perfiles de velocidad para las posiciones d-6, d-7 y d-8.

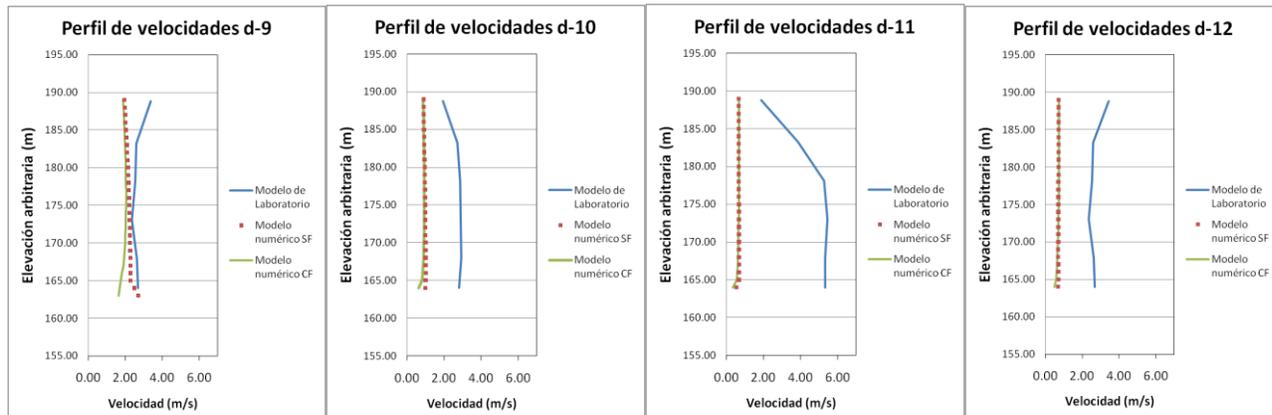


Figura 3.103 Perfiles de velocidad para las posiciones d-9, d-10, d-11 y d-12.

4. Modelación numérica de todo el sistema

Dado que la simulación tridimensional requiere la utilización de mucha memoria y tiempo de cómputo, en este inciso se muestra una estrategia a seguir para la implementación de una simulación para un dominio complejo con grandes dimensiones tanto en la vertical como en la horizontal en Flow3D. La simulación abarca desde el canal de llamada hasta las cubetas de lanzamiento.

Para llevar a cabo la simulación se hizo uso de seis bloques interconectados (Figura 4.1), cuyas dimensiones varían en las tres direcciones coordenadas. Los bloques uno y dos se tomaron iguales a los utilizados para la simulación del canal de llamada (Figura 3.2), sin embargo, el bloque 3 fue dimensionado diferente para considerar la geometría del cimacio y las pilas, una vez alcanzada la altura de las pilas-se decidió construir un cuarto bloque con una altura menor, la cual es suficiente para abarcar el primer tramo del canal de descarga que tiene menor pendiente (Figura 4.2). Finalmente, para las rápidas con pendientes geométricas grandes se decidió utilizar dos bloques (5 y 6) los cuales están desfasados en la vertical. Nótese que se está evitando a toda costa utilizar celdas por donde no va a pasar agua, ya que esto implica mucha memoria además de tiempo de

cómputo. Los tamaños de las celdas en cada uno de los bloques se distribuyeron de la siguiente manera:

| Bloque | dx (m) | dy (m) | dz (m) | Número de celdas |
|------------------------|--------|--------|--------|------------------|
| 1 | 4.00 | 4.00 | 4.00 | 85800 |
| 2 | 2.00 | 2.00 | 2.00 | 85800 |
| 3 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 271600 |
| 4 | 1.00 | 1.00 | 1.00 | 215040 |
| 5 | 0.50 | 1.00 | 0.50 | 3702720 |
| 6 | 0.50 | 1.00 | 0.50 | 8426880 |
| Número total de celdas | | | | 12787840 |

Tabla 1. Tamaños de celda para cada uno de los bloques utilizados.

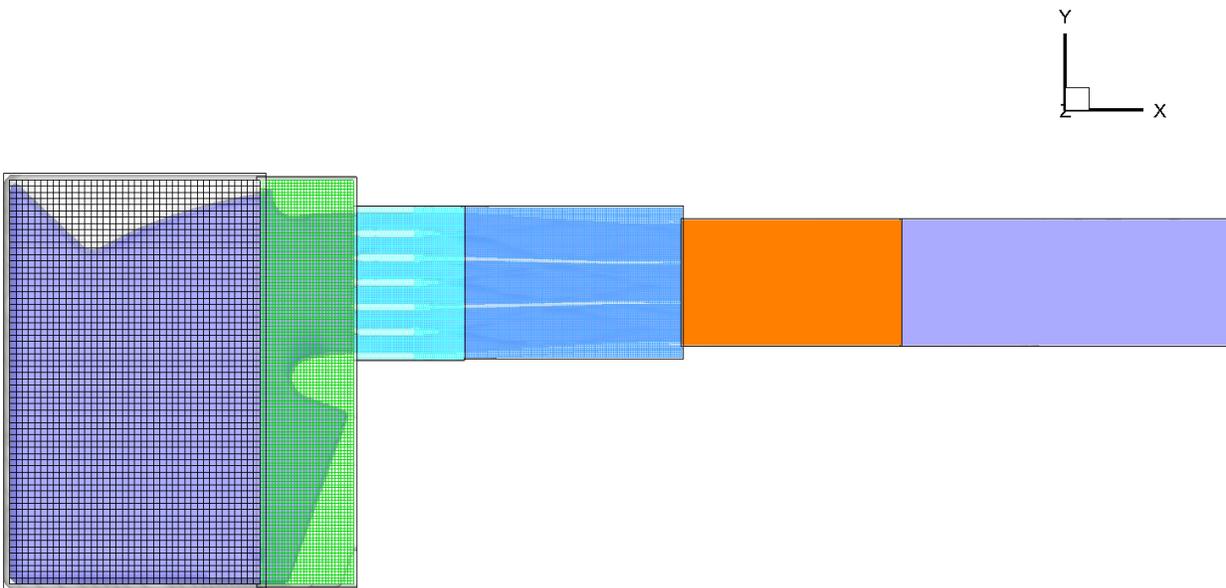


Figura 4.1 Vista XY de los bloques interconectados para la simulación.

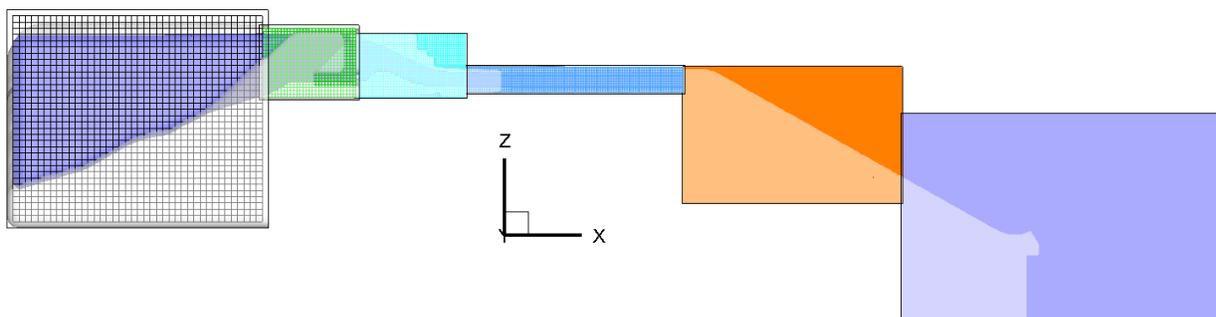


Figura 4.2 Vista XZ de los bloques interconectados para la simulación.

Una vez diseñada la malla se hace una revisión de la geometría mediante el *FAVOR*, mediante el cual se verifica que la geometría de la presa esté representada satisfactoriamente (Figura 4.3). Nótese que debajo de la superficie del terreno y en general la geometría de la presa, el sólido (*stf*) se continúa hasta la *Z* mínima de cada bloque, con lo que las celdas dentro de los sólidos se vuelven inactivas y ayudan a ahorrar tanto memoria como tiempo de cómputo. Para ésta configuración se cuenta con 7,565,298 de celdas activas, lo que requiere aproximadamente de 3.5 Gigabytes de memoria para la simulación.

El paso siguiente es establecer en el modelo las características del fluido, la magnitud de la aceleración de la gravedad y la inicialización del campo de flujo. Para esta simulación se colocó una masa de agua a una altura de 165 m (el sistema de coordenadas es arbitrario), con velocidad cero y con presión hidrostática variando con respecto al eje *Z* (Figura 4.4). Posteriormente, las condiciones de frontera se definieron de la siguiente manera: de presión en *Xmin* del bloque 1, con variación del nivel de la superficie libre del agua hasta alcanzar el gasto de diseño (Figura 4.5), y de salida (*outflow*) en *Xmax* del bloque 4, entre bloques la condición fue *inter-block*.

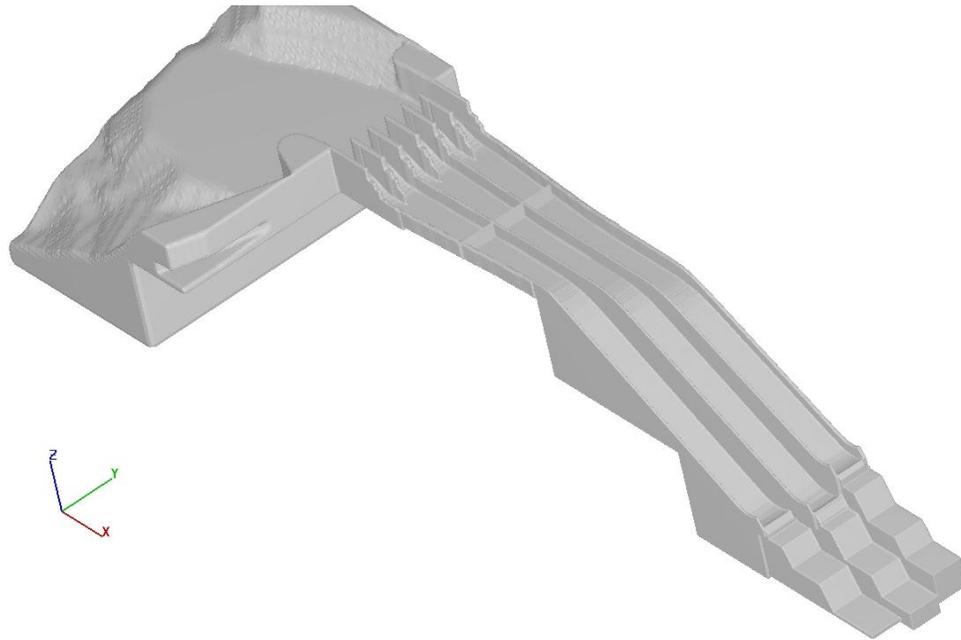


Figura 4.3 Geometría utilizada para la simulación de todo el sistema.

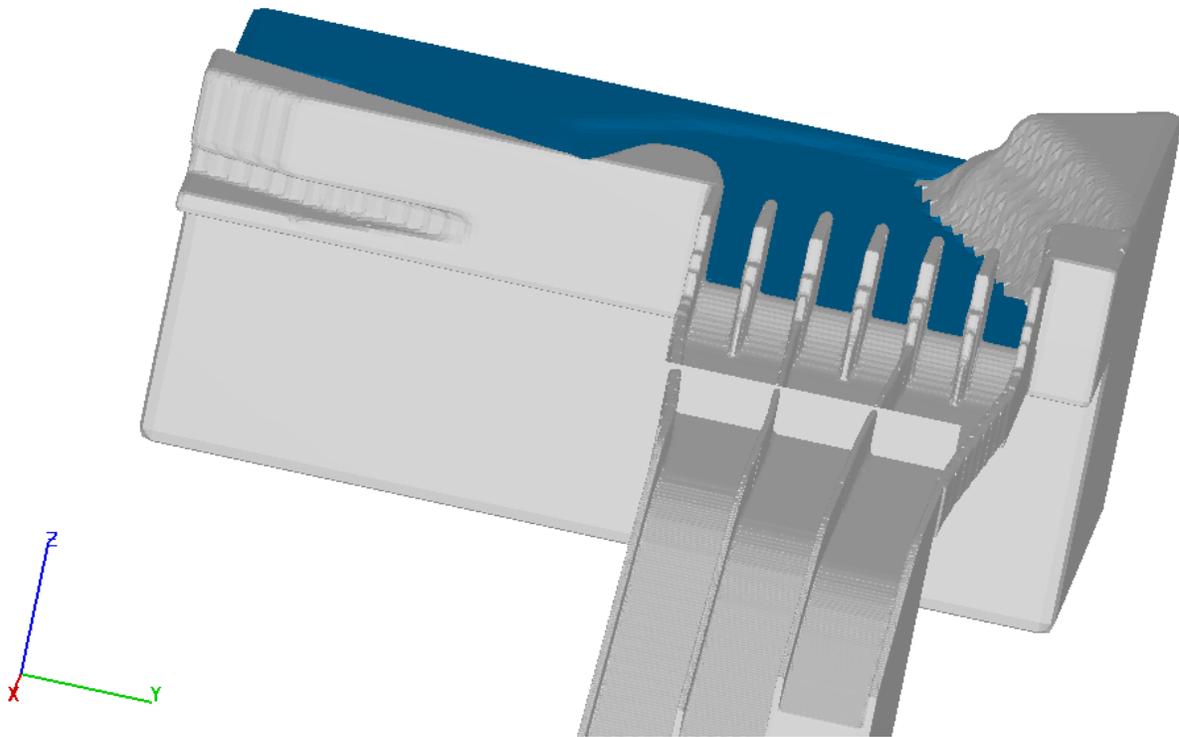


Figura 4.4 Inicialización del dominio con fluido.

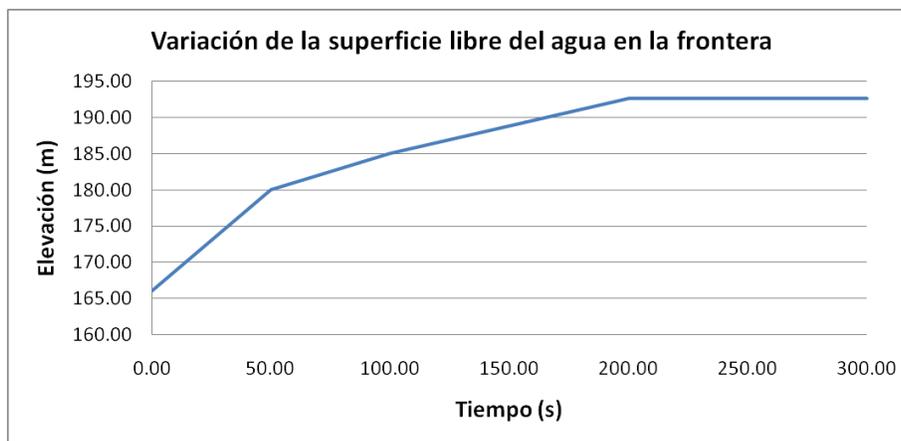


Figura 4.5 Condición de frontera en X_{min} .

Con el fin de ahorrar tiempo de cómputo, primeramente se inició la simulación utilizando los bloques del 1 al 4 terminándola a los 116.8 s de simulación (Figura 4.6). Posteriormente se le hizo un *restart* a esa configuración (Flow 3D, 2009), a la cual se le agregó el bloque 5 y se adecuaron las condiciones de frontera (*inter-block* entre bloques 4 y 5, y *outflow* en X_{max} del bloque 5), con los que se continuó la simulación hasta los 210.4 s (Figura 4.7). Finalmente se hizo de nuevo un *restart* para agregar el bloque 6 y con ello se adecuaron de manera similar las condiciones de frontera (*inter-block* entre bloques 5 y 6, y *outflow* en X_{max} del bloque 6). La Figura 4.8 muestra la masa de fluido para los 228.9 s de simulación y los 6 bloques utilizados. Puede verse que con la reducción en dx y dy para los bloques 5 y 6 pudo captarse satisfactoriamente la curvatura de las cubetas de lanzamiento y los saltos de esquí. La Figura 4.9 muestra la distribución de la magnitud de velocidad en la superficie libre del agua para todo el dominio, y pueden observarse velocidades de hasta 46 m/s, un poco antes de la cubeta de lanzamiento en el canal 1 (margen derecha).

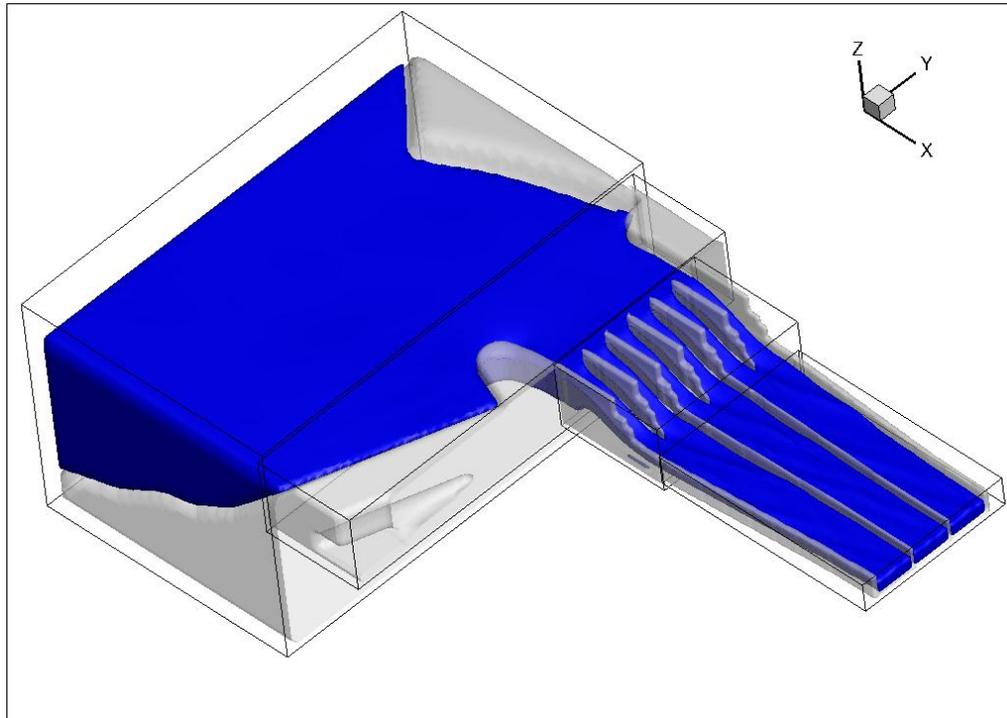


Figura 4.6 Masa del agua a los 116.8 s de simulación. Bloques 1 al 4.

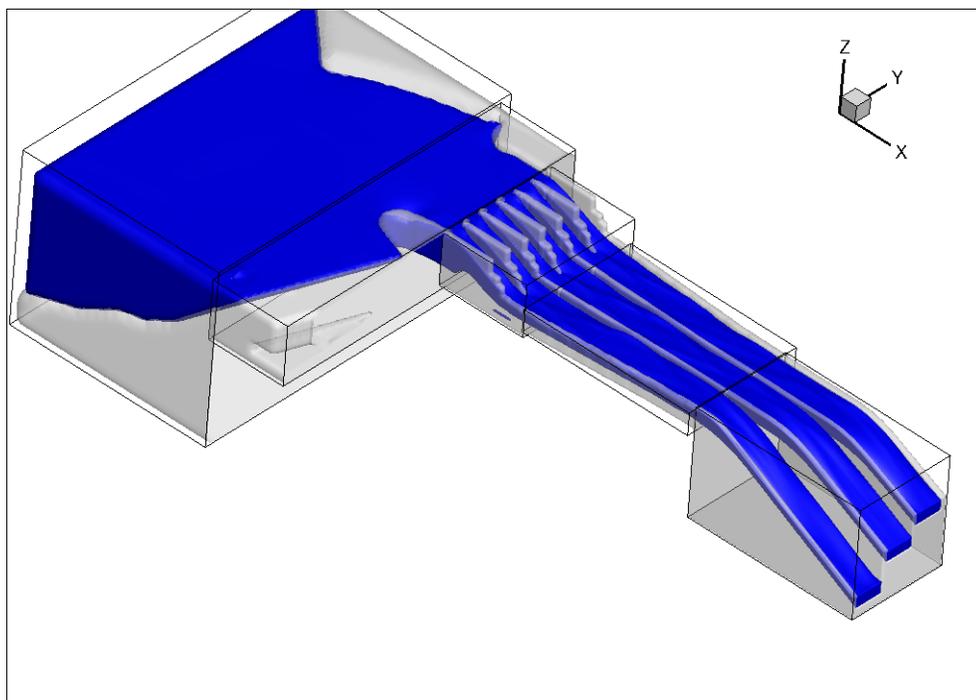


Figura 4.7 Masa del agua a los 210.4 s de simulación. Bloques 1 al 5.

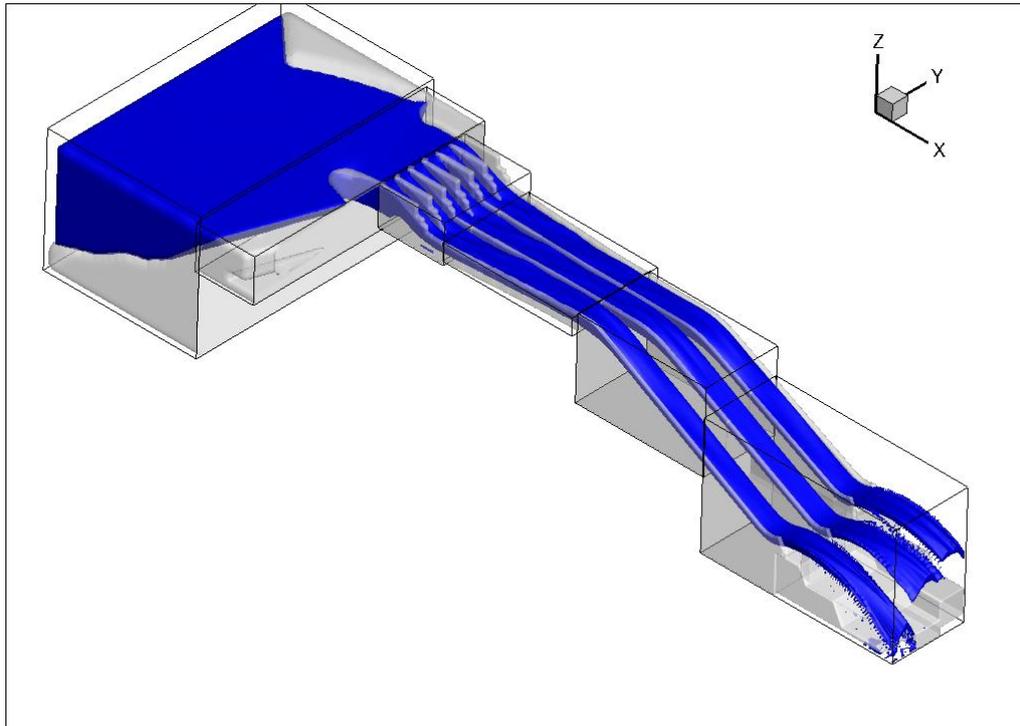


Figura 4.8 Masa del agua a los 228.9 s de simulación. Bloques 1 al 6.

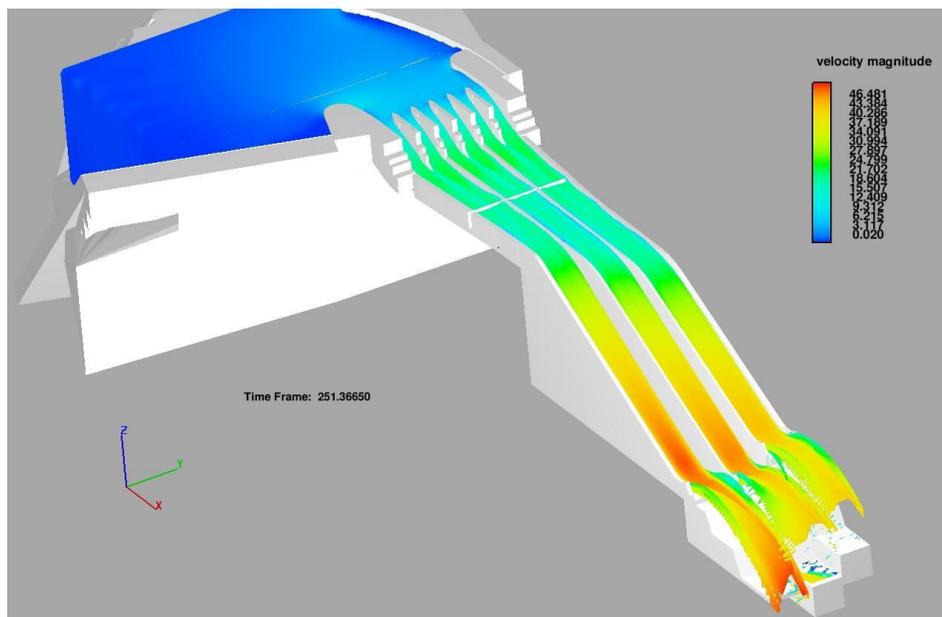


Figura 4.9 Distribución de velocidades en la superficie para todo el sistema.

De la Figura 4.10 a la Figura 4.15 se muestran los campos de presión y de velocidad al centro de cada uno de los canales. Puede observarse que la presión cae drásticamente en las rápidas donde empiezan las pendientes grandes (X_{min} del bloque 5), y de acuerdo a lo que se muestra en las figuras es casi nula. Es importante señalar que se calcularon presiones negativas justo al final de las cubetas de lanzamiento. Las velocidades máximas se presentaron al final de la rápida del canal 1, alcanzando valores de 45 m/s. Los vectores de velocidad no se presentan en éstas gráficas debido a la gran cantidad de celdas que se tienen en los bloques 4,5 y 6, además del tamaño tan pequeño del dibujo.

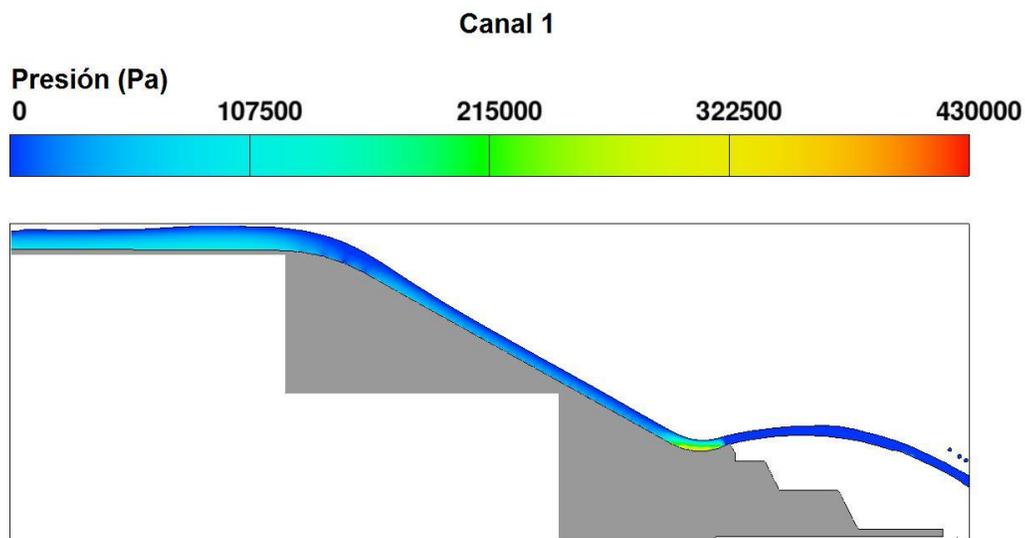


Figura 4.10 Distribución de presiones al centro del canal 1. Bloques 4,5 y 6.

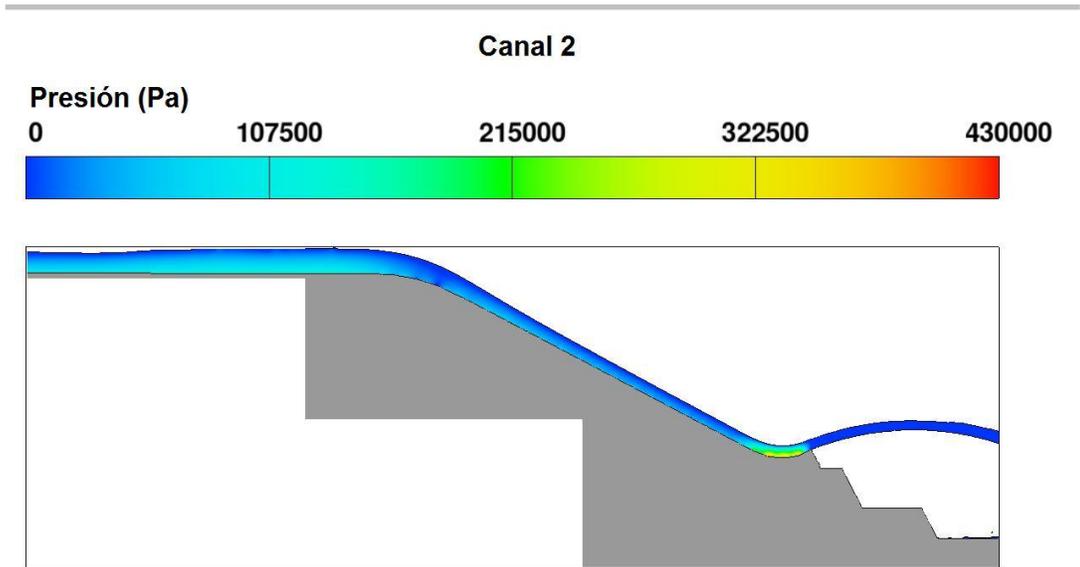


Figura 4.11 Distribución de presiones al centro del canal 2. Bloques 4,5 y 6.

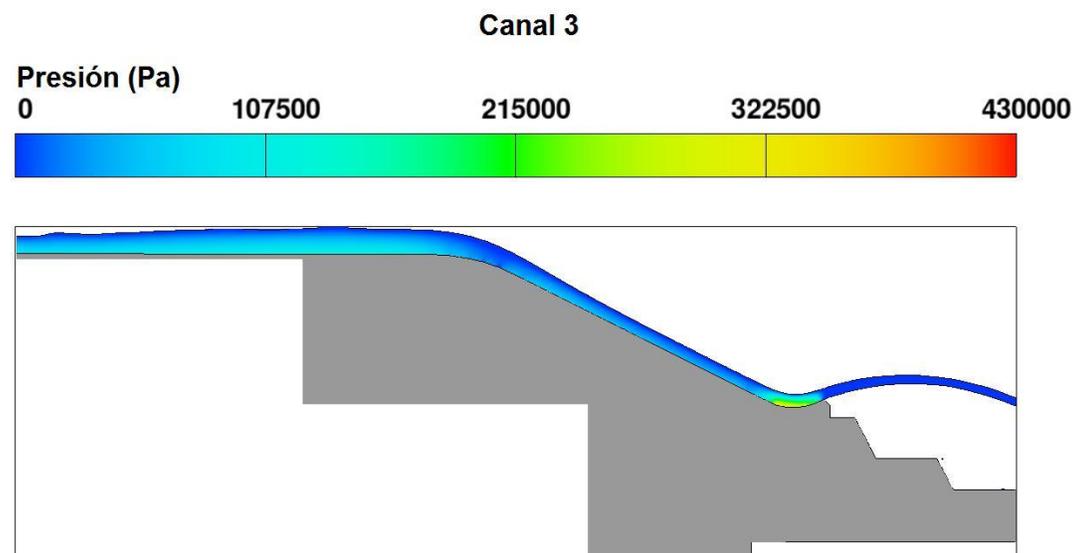


Figura 4.12 Distribución de presiones al centro del canal 3. Bloques 4,5 y 6.

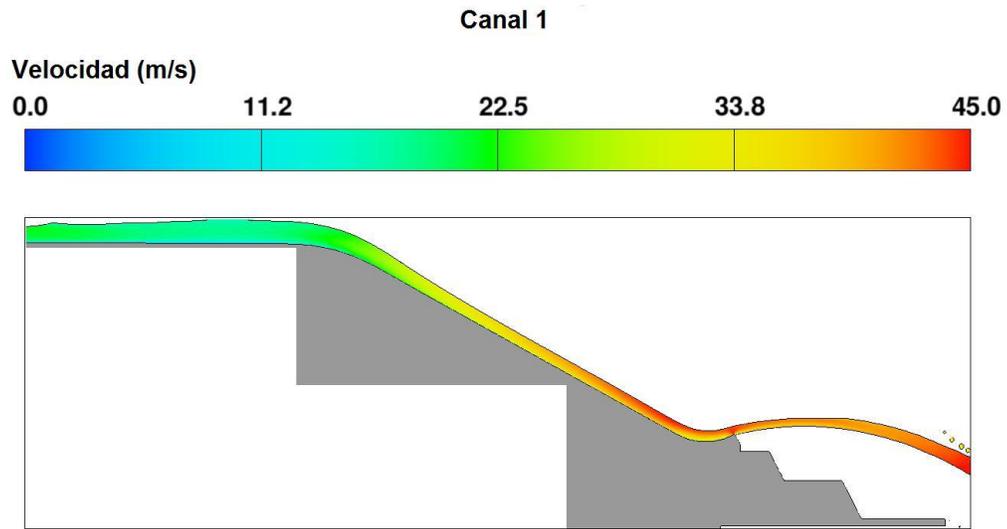


Figura 4.13 Distribución de velocidades al centro del canal 1. Bloques 4,5 y 6.

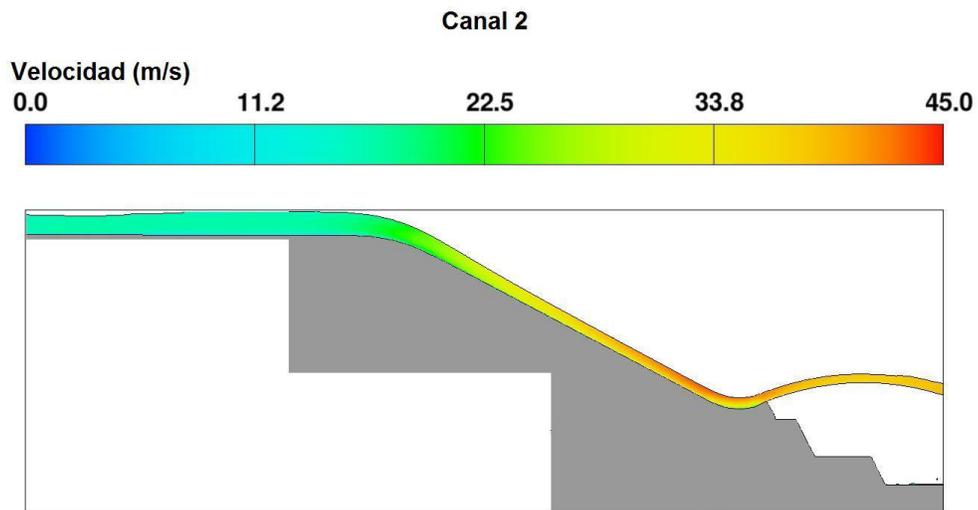


Figura 4.14 Distribución de velocidades al centro del canal 2. Bloques 4,5 y 6.

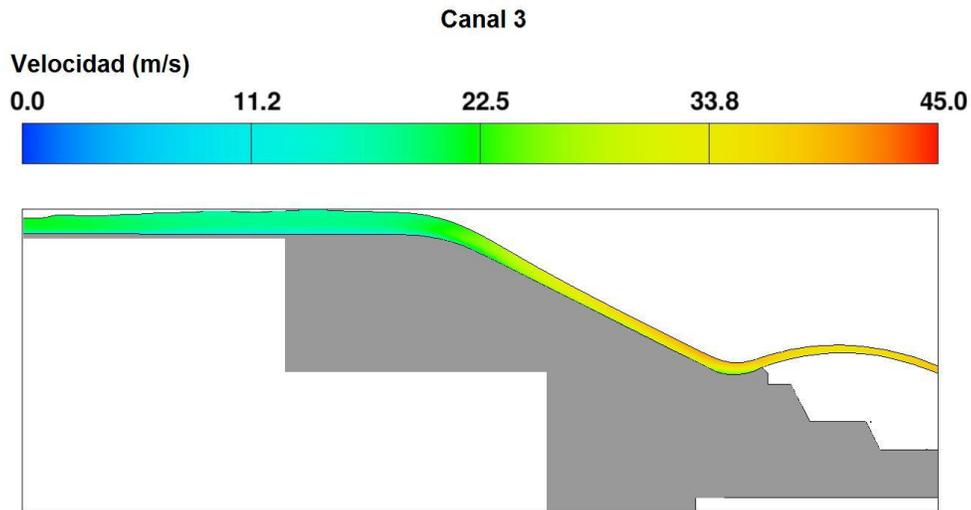


Figura 4.15 Distribución de velocidades al centro del canal 3. Bloques 4,5 y 6.

Finalmente, de la Figura 4.16 a la Figura 4.18 se muestran los números de Thoma o índices de cavitación local (Arreguin, 2000; Falvey, 1990) calculados al centro de las rápidas de los tres canales de descarga. De acuerdo con los resultados, las tres rápidas requieren la incorporación de aireadores, ya que en algunas zonas de las rápidas se obtuvieron números de Thoma cercanos a 0.25 (Falvey, 1990). Por otra parte es importante señalar que los números de Thoma en los labios de las cubetas de lanzamiento descenden drásticamente, incluso hasta números negativos (Figura 4.16), por lo que se recomienda revisar el diseño de la curvatura de las mismas.

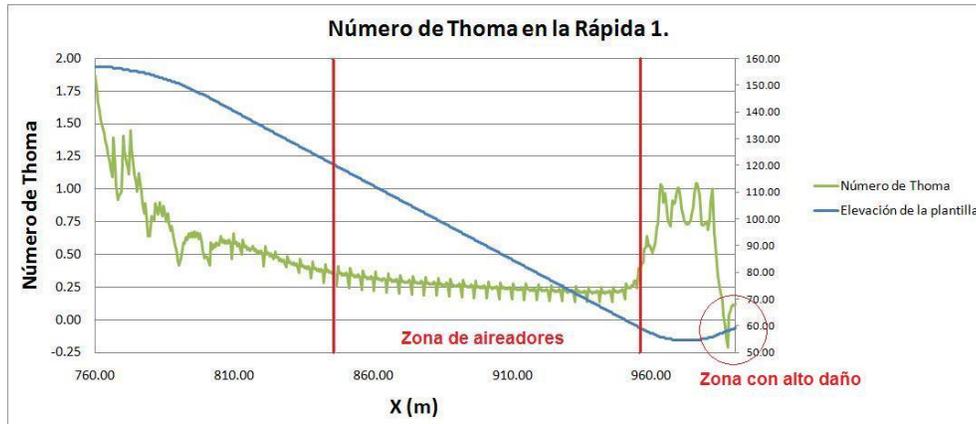


Figura 4.16 Número de Thoma al centro de la rápida del canal 1. Bloques 5 y 6.

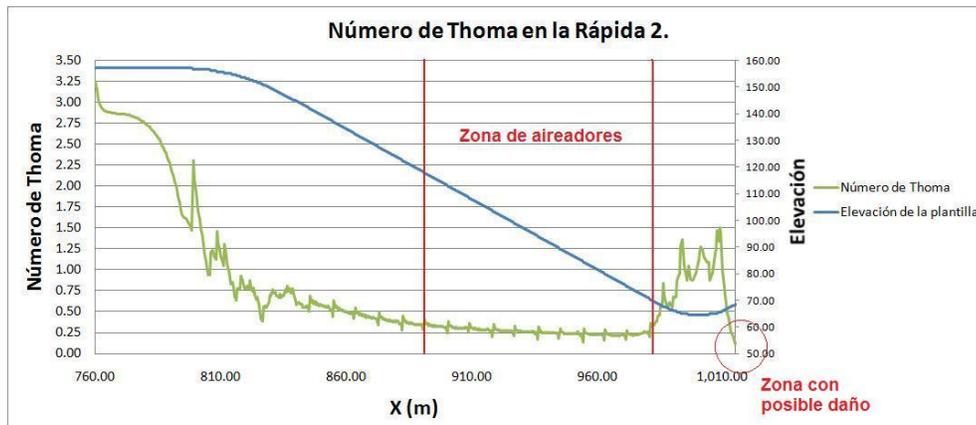


Figura 4.17 Número de Thoma al centro de la rápida del canal 2. Bloques 5 y 6.

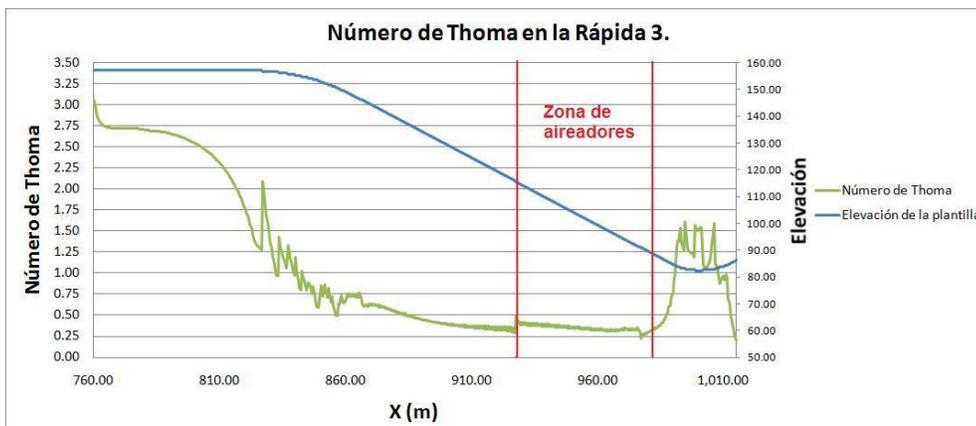


Figura 4.18 Número de Thoma al centro de la rápida del canal 3. Bloques 5 y 6.

5. Conclusiones

Una vez analizados los resultados de la simulación mediante Flow3D y compararlos con los medidos en laboratorio, se puede concluir que la modelación numérica hoy en día puede utilizarse para revisar el funcionamiento hidráulico de grandes obras, cómo en este caso la del P.H. La Yesca.

Los resultados concordaron con los obtenidos en laboratorio para la zona del canal de llamada, tanto en gasto, tirantes y velocidades, como con la representación de la depresión en la superficie libre del agua que se presenta en la margen derecha del canal de llamada. Como se muestra en el Anexo 1, también fue posible simular las rápidas y las cubetas de lanzamiento. De igual manera, este estudio numérico permite definir ciertos parámetros que se deben tener en cuenta en la seguridad de la estructura, como pueden ser presión sobre la cresta vertedora, diferencia de niveles transversales a la entrada de los vanos de las compuertas, localización de los sitios generadores de cavitación, etc.

A través de las simulaciones llevadas a cabo en este convenio de colaboración, se ha mostrado como implementar simulaciones numéricas con cierto grado de confiabilidad. Además de que se han abordado aspectos como el ahorro de memoria y tiempo de cómputo, así como otros aspectos relativos a la modelación numérica.

Las simulaciones de los escenarios 1 y 2 tuvieron una duración de 22 hr de tiempo de cómputo una vez que se generaron y corrigieron los archivos *stl*. Por otra parte, la simulación de toda la obra de excedencia hasta donde se muestra en la Figura 4.8, tuvo una duración de 43 hr de tiempo de cómputo, y a partir de ese tiempo se requieren 2.5 hr de cómputo para un segundo de simulación en prototipo. Para las tres simulaciones se utilizaron 6 procesadores en paralelo a 1.6 Ghz. Para llevar a cabo simulaciones con mayor resolución, hay que tomar en cuenta que cada vez que se dobla la resolución de la malla el número de celdas se va multiplicando por 8.

Referencias

- ARREGUÍN F. C. *Obras de excedencia*, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, ISBN 968-7417-51-X, 2000, pp. 267.
- DALRYMPLE, R.A., ROGERS, B.D., Numerical modeling of water waves with the SPH method. *Coastal Engineering* 53, 2006, pp. 141– 147.
- ESPINOSA, G.A., AGUILAR C.A. Y MILLÁN B.C., Estudio numérico del funcionamiento hidráulico de vertedores tipo cimacio formado con arcos circulares, *XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, 2008, Cartagena, Colombia.
- FALVEY, H.T. *Cavitation in Chutes and Spillways*. Engineering Monograph No. 42. USA: Bureau of Reclamation, 1990, 145 pp.
- FLOW3D. *Manual de usuario versión 9.4. 2009*. Flow Science Inc. Santa Fe, N.M.
- GARCÍA, J., VALLS, A., OÑATE, E. An overlapping domain decomposition level set (ODDLs) method for simulation of free surface problems. *International Conference on Computational Methods in Marine Engineering*. P. Bergan, J. García, E. Oñate, and T. Kvamsdaleds, 2007, CIMNE, Barcelona.
- HIRT, C.W.; NICHOLS, B.D, Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, *Journal of Computational Physics*, 39 (1), 1981, pp 201–225.
- HO D.K.H., BOYESK.M. Y DONOHOOS.M., Investigation of Spillway Behaviour under Increased Maximum Flood by Computational FLuid Dynamics Technique, *14th Australasian Fluid Mechanics Conference*, 10-14 Diciembre de 10-14 de 2001, Adelaide University, Australia.
- LAUREL, J.A., OÑATE, E., CRUZ-LEÓN, S., CELIGUETA, M.A., *Simulation of surface breaking waves with the Particle Finite Element Method*. Particle-Based Methods. Fundamentals and Applications. Eds. E. Oñate, y D.R.J. Owen, CIMNE, 2009, ISBN 978-84-96736-82-5, pp 233-236
- H. MUSAVI-JAHROMI, M. BINA AND F. SALMASI, 2008. Physical and Numerical Modeling of the Nappe Flow in the Stepped Spillways. *Journal of Applied Sciences*, 8, 2008, pp 1720-1725.
- OÑATE, E., IDELSOHN, S.R., DEL PIN, F., AUBRY, R., The Particle Finite Element Method. An overview. *International Journal of Computational Methods* Vol. 1 No. 2, 2004, pp 267-307.
- SAVAGE B.M. Y JOHNSON M.C., Flow over Ogee Spillway: Physical and Numerical Model Case Study, *J. Hydraulic Engineering*, ASCE, 127(8), 2001, pp 640-649.
- SETHIAN, J.A., SMEREKA, P., Level Set Methods for Fluid Interfaces. *Ann. Rev. Fluid Mech.* 35, 2003, pp 341–372.
- VERGARA, M.A. *Técnicas de modelación en hidráulica*. Primera edición. México: Alfaomega-IPN, 1993, 294 pp.

Anexo. Generación de archivos STL a través de datos topográficos (XYZ).

Sin duda alguna, una de las tareas más laboriosas para la simulación en 3d es la elaboración de la geometría, en particular los detalles de los sólidos. En algunas ocasiones es posible construirlos a través de datos representados en planos 2d o mediante una nube de puntos, y la razón de este anexo es mostrar una forma de hacerlo. Para ello, se explica cómo construir un archivo que tiene información de una geometría 3D en formato *stl* con base a un listado de puntos *xyz*, dicho procedimiento también puede aplicarse para construir otro tipo de geometrías (por ejemplo, rápidas y vertedores).

Para generar el archivo *stl* hacemos uso del programa *xyz2stl* que se encuentra en desarrollo en el IMTA, el cual lee un archivo en formato *ascii* de un listado de puntos *xyz* como se muestra a continuación:

```
557820 5108010 800  
557940 5108010 800  
558060 5108010 925  
558900 5108010 944  
559020 5108010 990  
559140 5108010 1007  
559260 5108010 996  
559380 5108010 988  
559500 5108010 978
```

....

La conversión se realiza de una manera sencilla ya que el programa cuenta con una interfaz gráfica intuitiva. Esto se hace a través los tres pasos siguientes:

1. Ir al menú archivo, abrir, y seleccionar el archivo *xyz* a convertir (Figura A.1).
2. Ir al menú archivo, guardar como, seleccionar la ruta y escribir el nombre del archivo destino junto con su extensión (Figura A.2).
3. Dar clic al botón convertir que está en el frente del programa (Figura A.3).

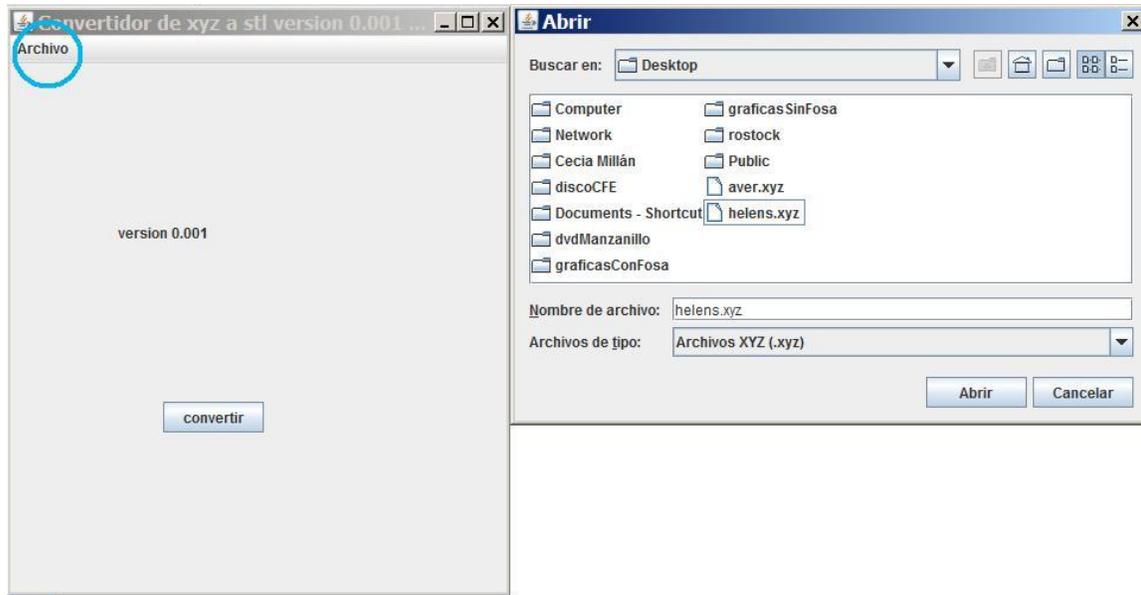


Figura A.1 Selección del archivo XYZ de entrada en el programa xyz2stl.

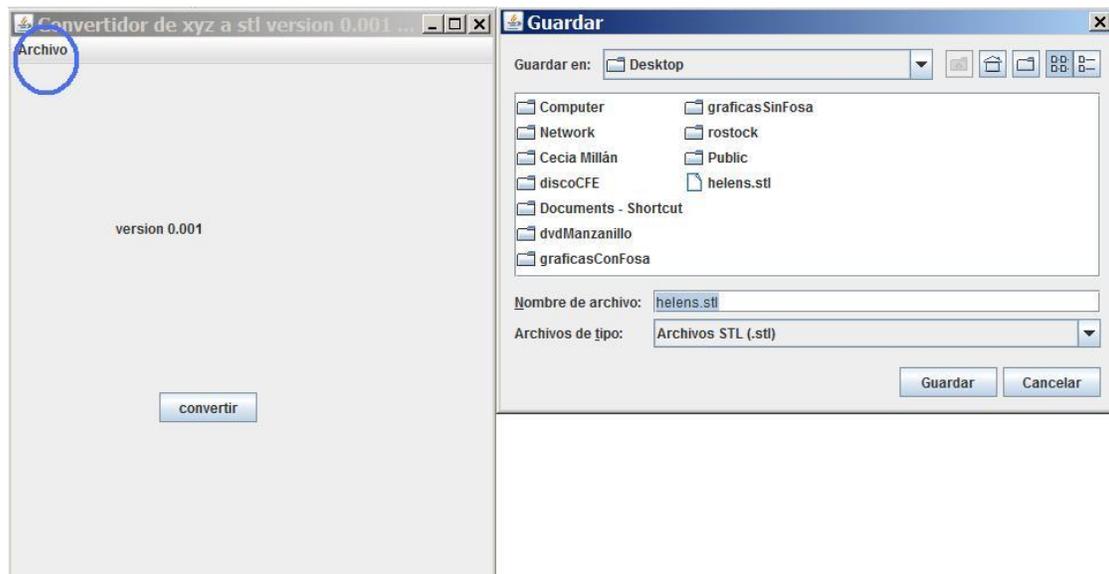


Figura A.2 Selección del archivo stl de salida en el programa xyz2stl.



Figura A.3 Instrucción final en el programa xyz2stl.

La Figura A.4 muestra la visualización mediante MeshLab⁴ del archivo *stl* obtenido después del procesamiento del archivo *xyz*. El software MeshLab puede ser utilizado también para la corregir las geometría en formato *stl*.

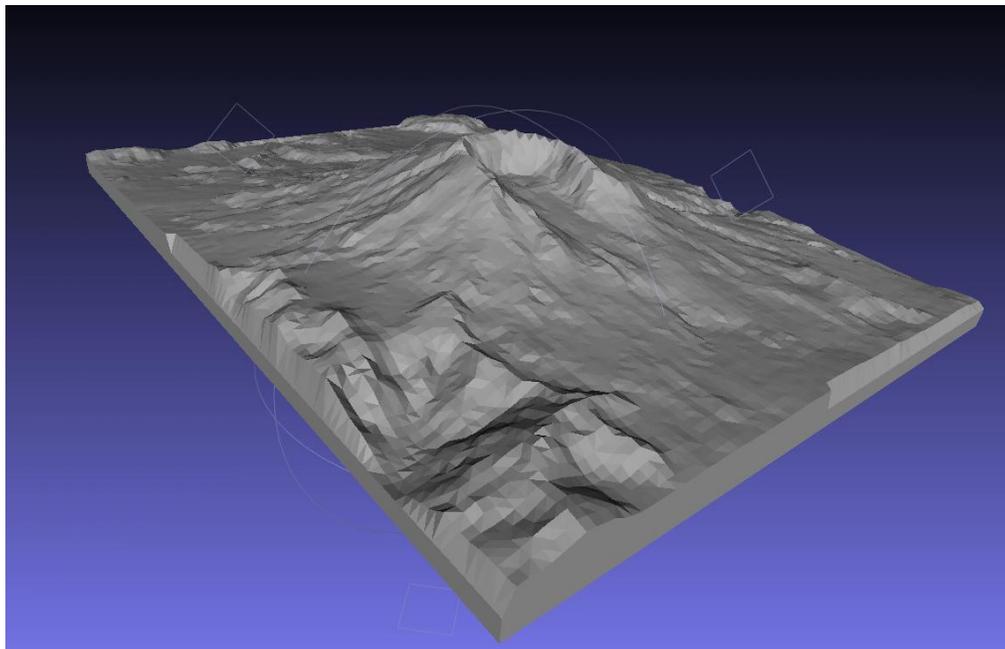


Figura A.4 Visualización del *stl* generado a través del programa xyz2stl.

⁴ <http://meshlab.sourceforge.net/>