

Simulación tridimensional del flujo fluvial en el barranco del Bufadero, en Tenerife, mediante ANSYS-CFX® y XFlow®

José D. Fernández Bethencourt, Ing. CC y P y Pedro Delgado Melián, Ing. Agrónomo

Consejo Insular de Aguas de Tenerife (CIATF)

Sergio De Rico Herrero, Ing. Industrial y Eduardo Saleté Díaz, Dr. Ing. CC y P

INGECIBER, SA

jfernandez@aguastenerife.org, pdelgado.cia@cabtfe.es,

s.derico@ingeciber.com, e.salete.diaz@ingeciber.com

1 Introducción

Los fenómenos observados en el encauzamiento del barranco del Bufadero (Tenerife) durante la avenida del 1 de febrero de 2010, requieren un minucioso estudio de lo acontecido. El carácter extraordinario del fenómeno meteorológico unido a la torrencialidad de la avenida generada por una superficie de cuenca importante, pendiente agreste y elevada impermeabilidad, así como la presencia de asentamientos e infraestructuras urbanas en el tramo de final del cauce, introdujeron componentes de riesgo muy significativas.

La parte baja del cauce discurre por una zona urbana. Es un tramo canalizado de lecho móvil, dado que el sustrato no es de roca compacta y el encauzamiento se ha limitado a construir cajeros sin dotar de solera a la canalización. Para reducir el proceso de erosión y evitar que se socave en exceso el lecho del cauce, se ha dispuesto de una serie de rastrillos a modo de vigas enterradas y transversales al cauce.

Para profundizar en el conocimiento de estos fenómenos en situaciones reales, la alternativa lógica a un modelo reducido es la simulación numérica del fenómeno de la avenida, aplicando un modelo tridimensional de fluidodinámica computacional mediante el método de volúmenes finitos. El Consejo Insular de Aguas de Tenerife (CIATF), contrató con Ingeciber S.A. el análisis previo y la realización de un modelo matemático CFD (Computational Fluid Dynamics) que pudiera reproducir numéricamente el suceso ocurrido en el Barranco del Bufadero, que atraviesa el núcleo de María Jiménez, en Santa Cruz, con objeto de extraer conclusiones del fenómeno acontecido y servir de base para la definición de las medidas correctoras más procedentes.

2 Hipótesis de estudio

Se ha definido un modelo geométrico virtual del tramo objeto de estudio y se subdivide el volumen resultante mediante un mallado tridimensional. El mallado del dominio fluido está compuesto por 25 millones de volúmenes finitos que se utilizaron como base del cálculo matemático del programa ANSYS-CFX. Este programa se encarga de resolver las ecuaciones de Navier Stokes, que gobiernan el comportamiento de los fluidos, planteadas en cada volumen finito de la malla tridimensional.

La simulación numérica tiene por objeto recrear el comportamiento de dicha avenida en el barranco del Bufadero. Una de las principales ventajas de la simulación numérica es el registro constante de todas las variables en todos los puntos de la malla, lo que permite analizar cualquier punto, en cualquier instante. Esto resulta una mejora respecto al modelo reducido, pues equivale a disponer 25 millones de sensores repartidos en todo el modelo. La posibilidad de parametrizar cada variable permite analizar numéricamente el efecto de la acumulación de depósitos en el canal y su influencia sobre el flujo circulante.

2.1 Parámetros intervinientes en el comportamiento físico de la avenida

La información básica del estado real del ámbito del estudio fue aportada por el CIATF (trabajo topográfico de detalle, inventario de actuaciones existentes en el entorno, etc). Con ella se han establecido los principales parámetros que intervienen en el comportamiento físico del caudal de la avenida, y se ha podido analizar la influencia de los mismos:

- La geometría del canal
- La presencia de rastrillos de contención de arrastres y atenuación del movimiento del fluido
- La rugosidad del lecho, íntimamente ligada a la presencia de material de arrastre depositado en el fondo.

2.2 Fases del estudio

Para caracterizar la influencia de cada parámetro se ha dividido el estudio en dos fases:

Fase 1.- El tramo de canal estudiado se encuentra inicialmente vacío y se introduce progresivamente el caudal de la avenida simulando la entrada del hidrograma. En este proceso la rugosidad media del lecho es de 1 centímetro. Finaliza en el instante en que se establece el caudal de la avenida en la totalidad del encauzamiento.

Fase 2.- A continuación aumenta la rugosidad del lecho pasando a una rugosidad media de 15 centímetros. Con este cambio se pretende simular la presencia de materiales arrastrados por la avenida que se depositan en el lecho. Tras la modificación, se analizan los cambios en el comportamiento del caudal que conlleva este aumento de rugosidad.

Con el aumento de la rugosidad del lecho se ha introducido un artilugio numérico que conlleva la variación del perfil de velocidades del flujo, pero no supone una disminución de la sección útil del canal; fenómeno que sí ocurre en la realidad, al menos en zonas localizadas.

La presencia de depósitos, que se simula mediante este procedimiento, constituye una situación realista, cuya posible discrepancia, respecto a la realidad del fenómeno físico es conservadora de cara a que se produzcan desbordamientos en el canal.

2.3 Estudios complementarios para el análisis de la acción de los rastrillos

En la simulación global del tramo final del cauce, pese a que la geometría de los rastrillos se encontraba simplificada, se pudo apreciar el efecto de estos elementos. No obstante, para profundizar en la comprensión de sus efectos en el flujo, se realizaron estudios complementarios pormenorizados de la acción de los rastrillos.

En un modelo simplificado de un canal recto, con las mismas características que el canal estudiado previamente, se compara la diferencia del comportamiento del flujo con y sin rastrillos. En estas nuevas simulaciones se aprecia con todo detalle la geometría de los rastrillos y el efecto en el comportamiento del flujo que conlleva su presencia. Además se aprecia en un corte vertical cómo evoluciona el perfil de velocidades en cada sección.

2.4 Validación del modelo con otro software CFD

Para validación y contraste de los resultados obtenidos con ANSYS-CFX® se realizó también un modelo independiente del anterior, utilizando el método Lattice Boltzmann. El nuevo método aborda la resolución de la ecuación Boltzmann-Maxwell (problema resuelto recientemente en 2010) en lugar de las de Navier-Stokes, utilizando el programa XFlow®. Los resultados obtenidos ratifican los del modelo anterior.

Para reproducir la riada del 1 de febrero de 2010 en el tramo final del barranco del Bufadero, se dispuso de gran cantidad de datos (geométricos, de aforo de caudal, del espesor de materiales depositados sobre el lecho del cauce, de la caracterización de los sedimentos, etc.). Además se contaba con diversa documentación audiovisual

grabada durante este episodio. Con toda esta información, los resultados de la simulación han permitido realizar un diagnóstico detallado de los efectos que ejerce cada elemento del encauzamiento sobre el flujo de la avenida, así como una mejor comprensión del fenómeno a partir de lo observado el día de la riada.

3 Generación del modelo virtual

3.1 Modelo geométrico tridimensional

Detalle del modelo geométrico tridimensional. En la imagen izquierda se zonifica el modelo en tramos y se precisan los puentes. En la imagen derecha, las líneas rojas corresponden con la ubicación de los rastrillos.

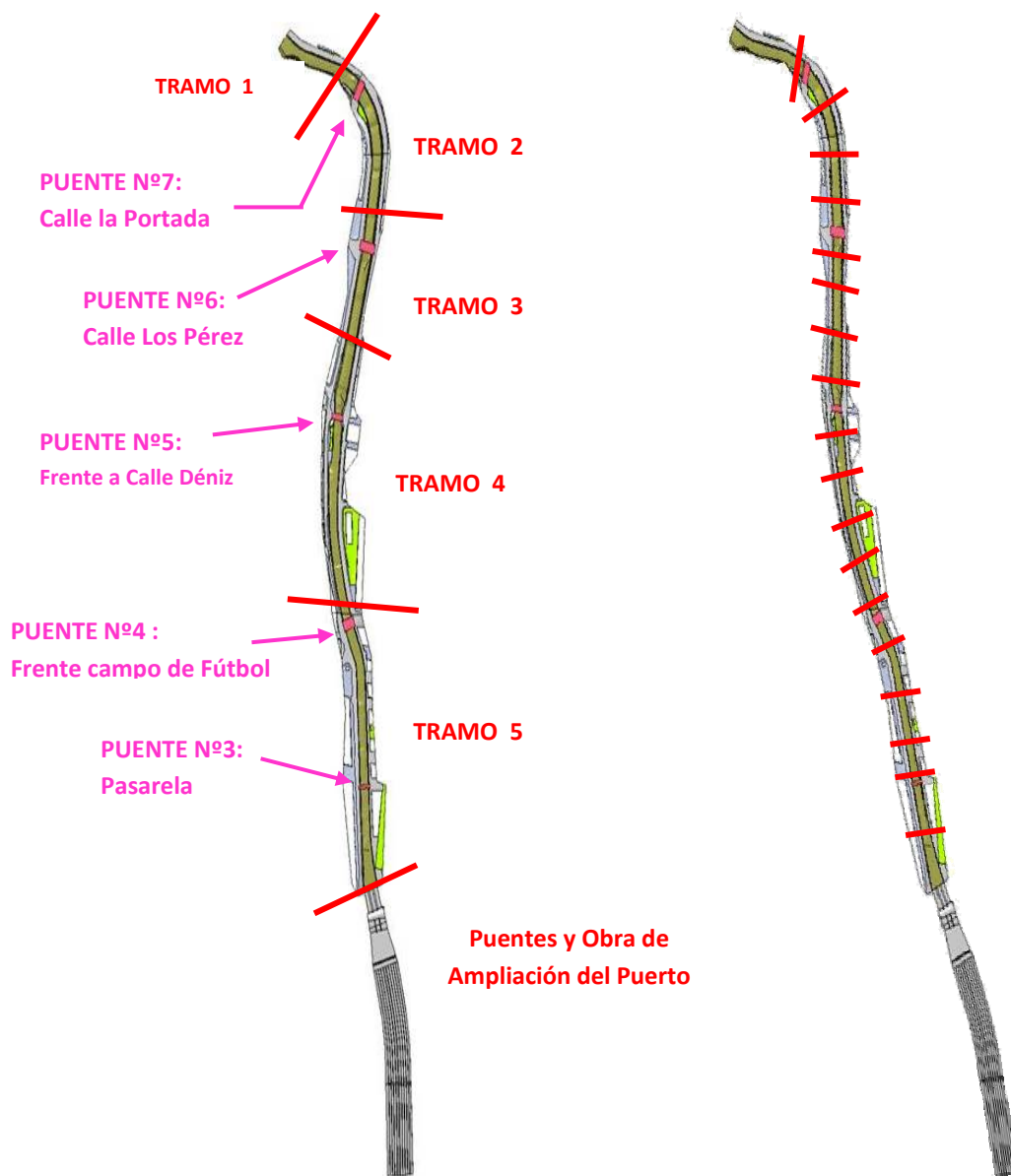


Figura 1 Zonificación del modelo tridimensional y ubicación de los rastrillos

3.2 Mallado del dominio fluido objeto del estudio

Para poder realizar la simulación numérica, el primer paso que hay que dar consiste en mallar el dominio fluido obtenido en el paso anterior. Para esta acción es de gran importancia refinar la malla en las zonas de mayor interés para el cálculo, también es importante realizar el refinamiento de la zona correspondiente a la capa límite, con el fin de caracterizar correctamente la condición de no deslizamiento en las proximidades de las paredes.

Debido a las exigencias del cálculo y a la necesidad de caracterizar correctamente el comportamiento del aire, se recurrió a un mallado minucioso y exhaustivo del dominio fluido objeto del presente estudio.

Debido a su extensión se consideró conveniente fraccionar el volumen total del modelo en seis tramos (nombrados T1 a T6) y trabajar por partes en el siguiente paso de mallado tridimensional.

Cada tramo del dominio fluido se trata eliminando las imperfecciones geométricas y se definen los criterios de generación de la malla de tridimensional de volúmenes finitos. Dicho mallado consta finalmente de veinticinco millones de elementos (cabe decir que este modelo es el mayor modelo tratado en nuestros veinticinco años de experiencia en el mundo de la simulación numérica -hasta ahora el mayor constaba "tan solo" de diecinueve millones de volúmenes-).

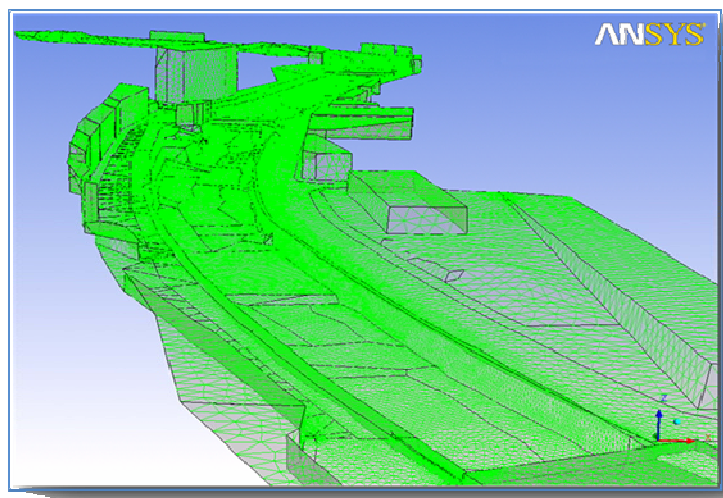


Figura 2 Vista en detalle de la malla de volúmenes finitos del modelo generado

4 Análisis de la Fase 1

En esta fase se estudia el avance de la avenida hasta la estabilización del flujo con una rugosidad media de un centímetro.

4.1 Tiempo = 70 [s] y estabilización del caudal punta con baja rugosidad:

Tras salir de la curva, el frente de la avenida afronta un tramo recto (tramo 3) con una pendiente del 3 %. Esto propicia la aceleración del flujo. Pero una vista superior del contorno de velocidades revela discontinuidades en el campo de velocidades. La presencia de los rastrillos cada 50 metros ralentiza el avance de la avenida. Esto se refleja en las discontinuidades de los contornos de velocidad.

Con cada rastrillo se disminuye parcialmente la energía cinética de la avenida limitándose así la velocidad del flujo. Tras el rastrillo, el flujo comienza de nuevo a acelerarse hasta alcanzar el siguiente rastrillo. De esta forma se produce un "escalonamiento" del campo de velocidades del flujo.

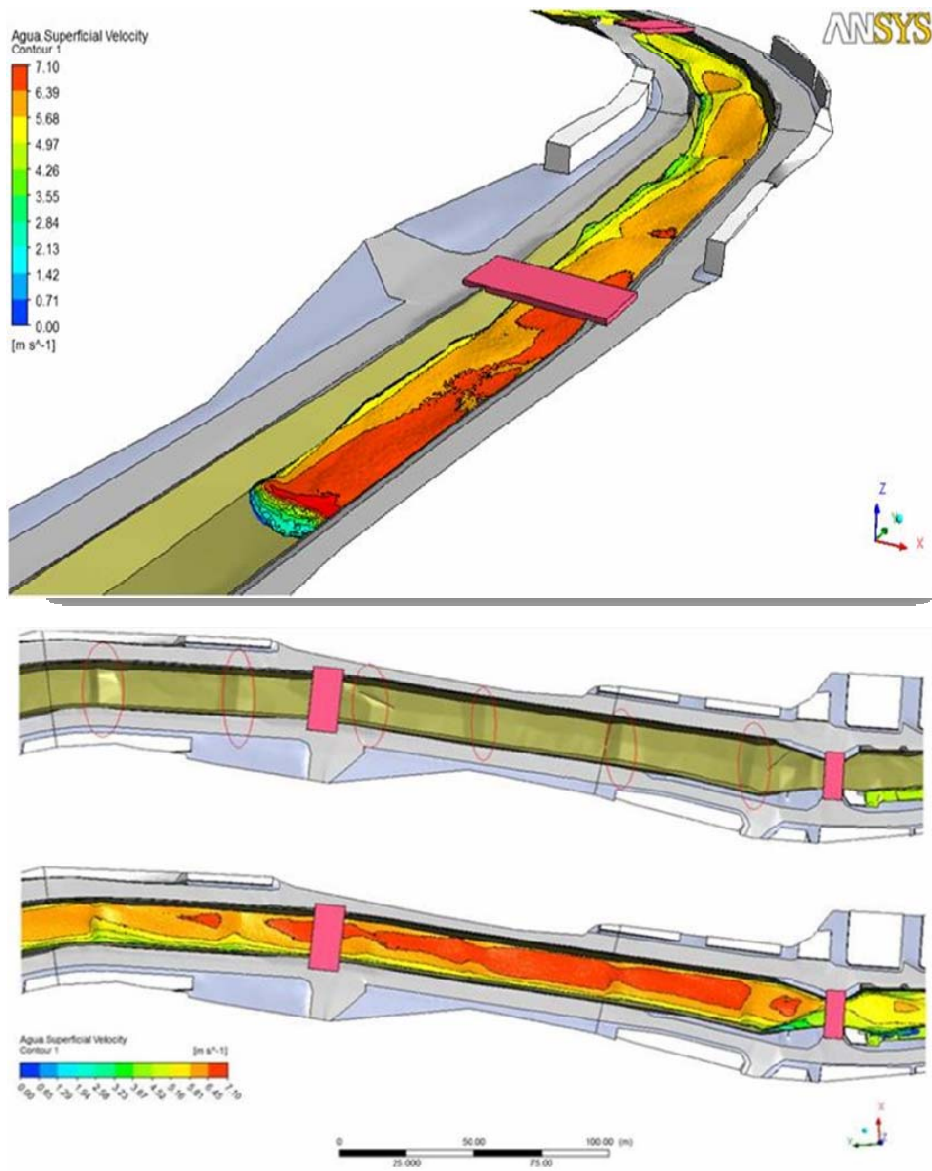


Figura 3 Avance de la avenida tras 70 segundos y superficie del agua coloreada en función de la velocidad

4.2 Tiempo = 120 [s]: Se establece el flujo en el tramo 5 y el frente de la avenida se encuentra en el cuenco de retención de la obra del puerto, justo antes de su impacto contra el aliviadero

Debido a la inercia que adquiere el flujo en el tramo 3 y 4, el agua no es capaz de reconducirse en la curva del tramo 5 sin que se produzca un desbordamiento. Dicho desbordamiento por inercia es potencialmente dañino para la margen izquierda pues se caracteriza por un gran caudal con una velocidad media inicial superior a 3 m/s.

A continuación se muestra unas imágenes donde se representa el desbordamiento que se produce por la margen izquierda, en la curva situada aguas arriba de la pasarela peatonal.

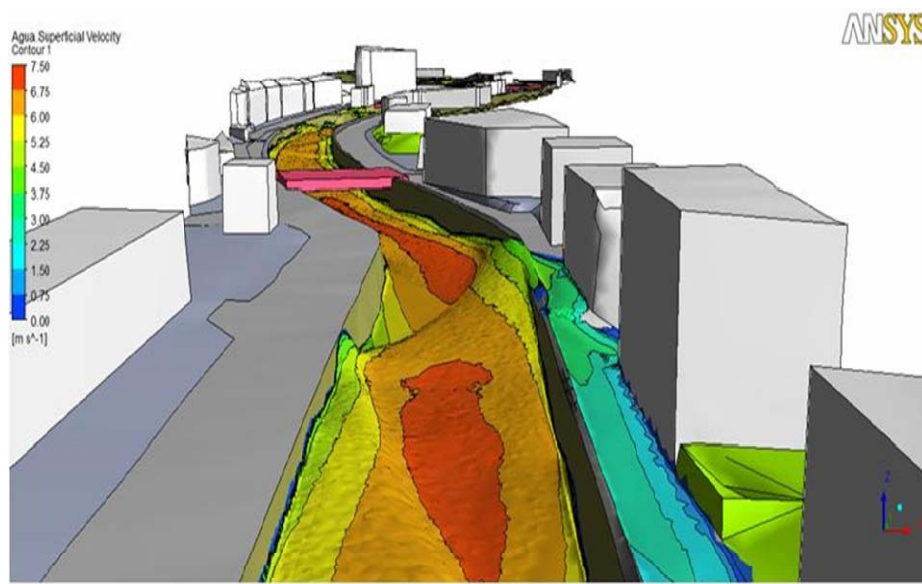
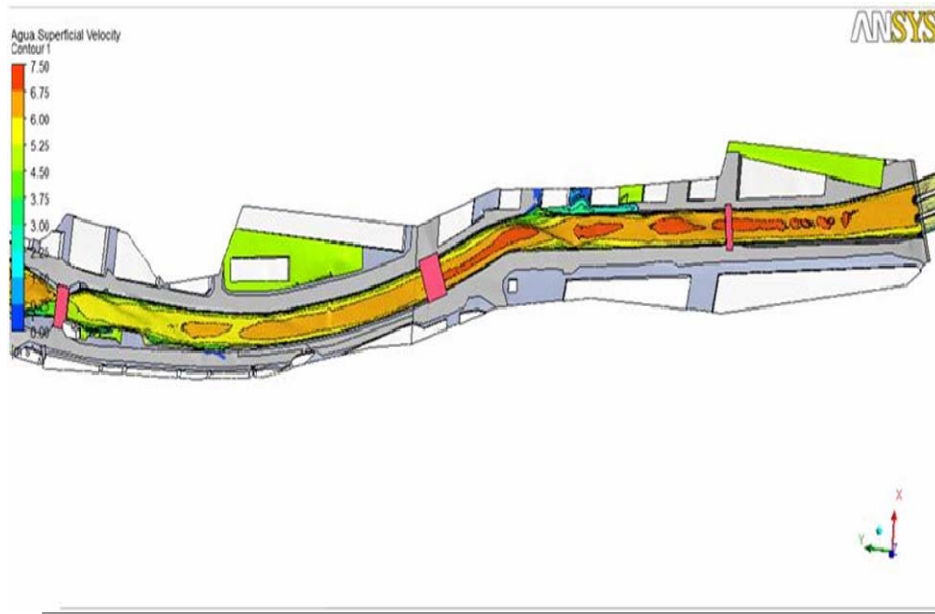


Figura 4 Detalle del desbordamiento que se produce en el margen izquierdo

5 Análisis de la Fase 2

Una vez establecido el flujo en la totalidad del canal, se aumenta la rugosidad del fondo del canal para simular el efecto hidráulico que tendría el depósito de los materiales arrastrados desde puntos situados aguas arriba.

En la siguiente secuencia se muestran por parejas de imágenes la misma zona del canal operando en ambas situaciones, antes y después el aumento de la rugosidad, cuando el flujo se estabiliza.

5.1 Puente n° 5 frente a Calle Déniz (tramo 4):

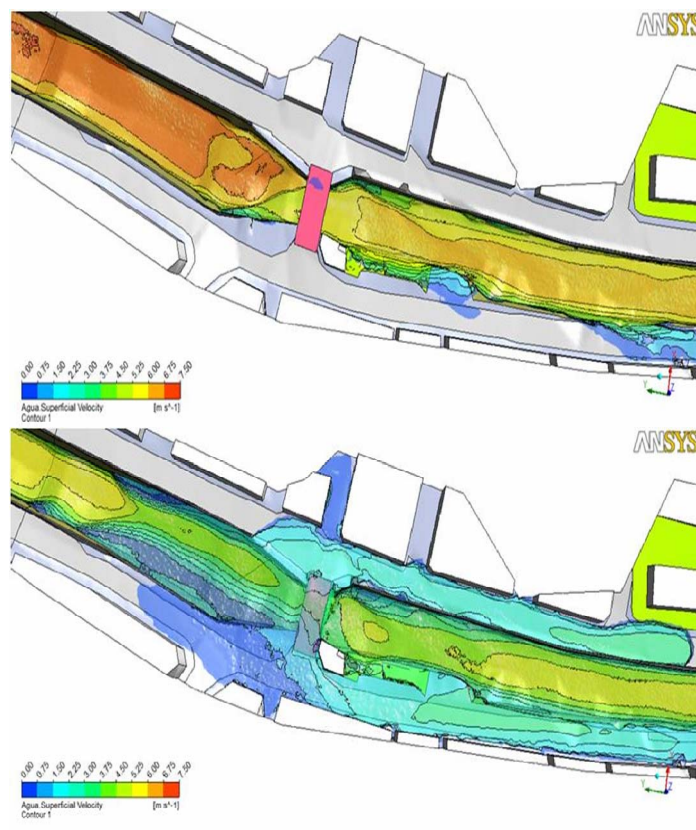


Figura 5 Efecto del aumento de la rugosidad en el tramo 4

5.2 Puente n°4, curva y pasarela peatonal (o puente n°3) del tramo 5:

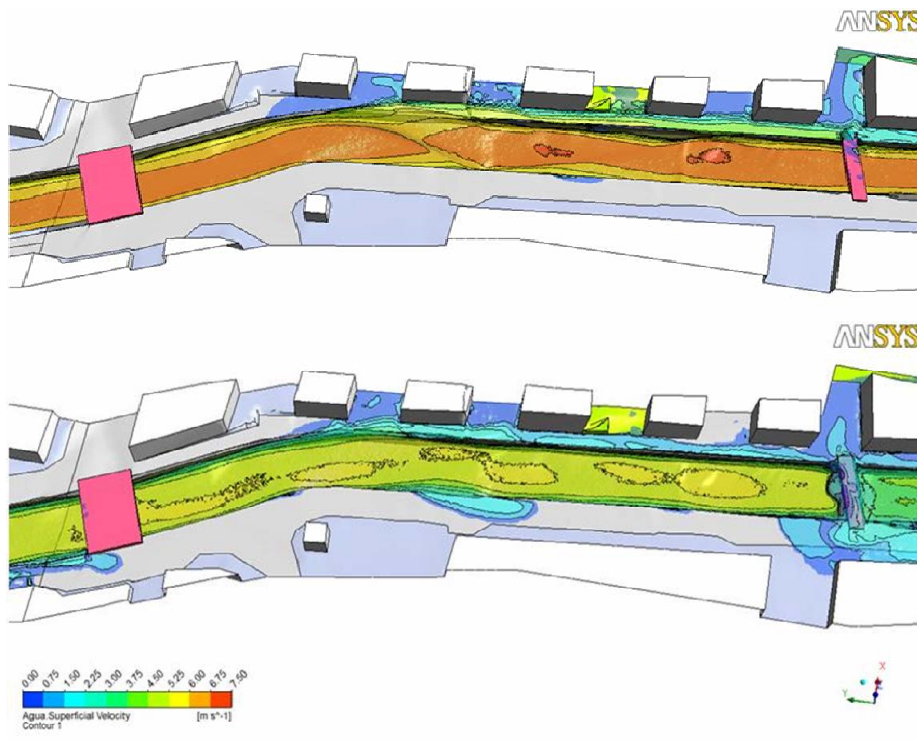


Figura 6 Efecto del aumento de la rugosidad en el tramo 5

5.3 Puentes del tramo final (puente n°1 y puente n°2) y cuenco de retención de la obra de ampliación del Puerto.

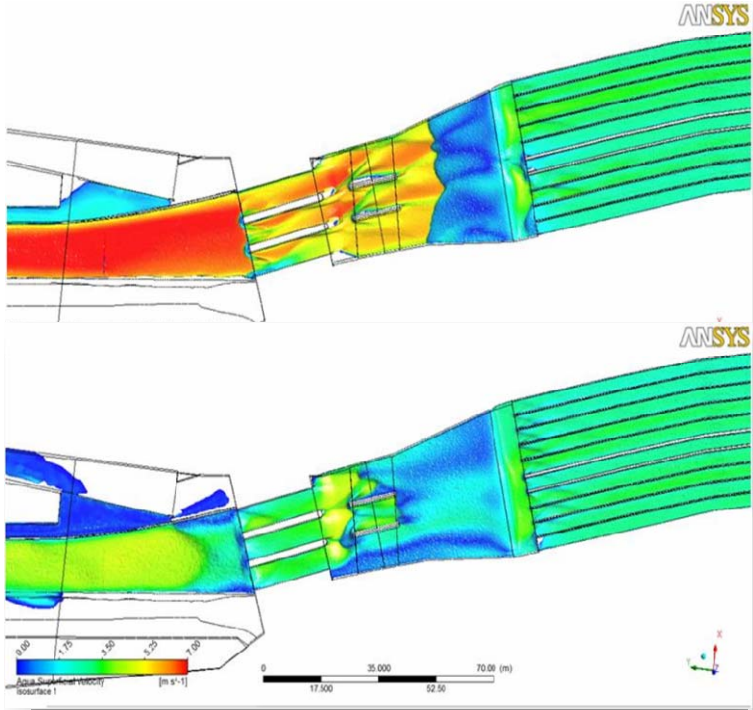


Figura 7 Efecto del aumento de la rugosidad en el tramo final

5.4 Vista superior global del cauce

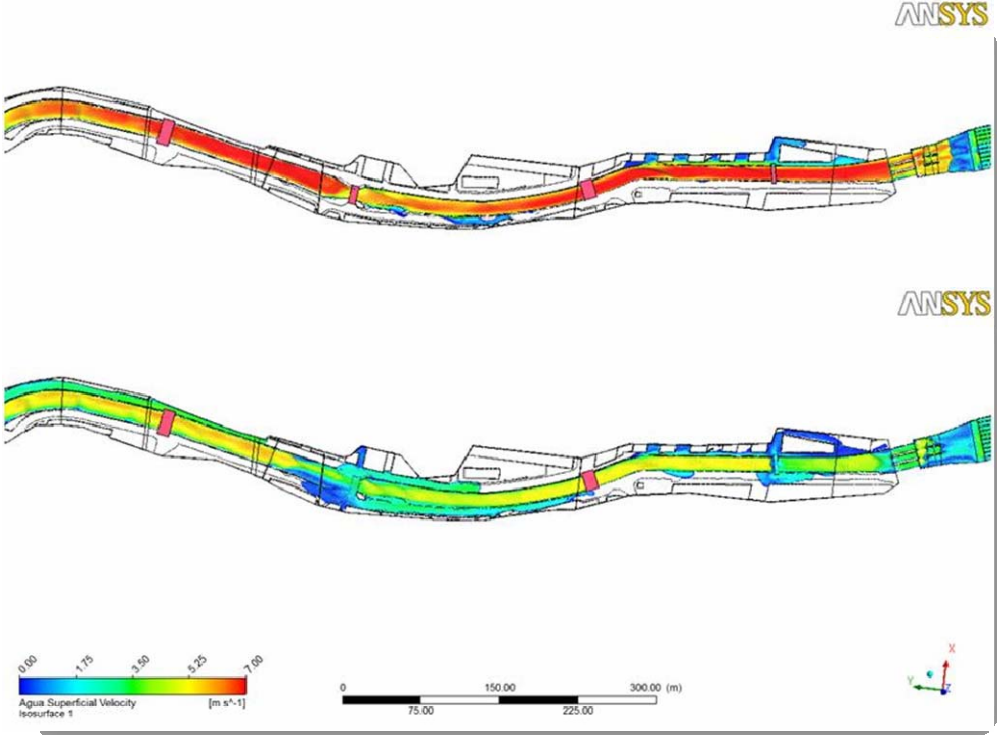


Figura 8 Efecto del aumento de la rugosidad en todo el encauzamiento

6. Resultados

6.1. Introducción

De entre los resultados obtenidos, a nuestro juicio tienen mayor importancia práctica los siguientes:

- El cambio en el comportamiento hidráulico del flujo es inmediato. Al variar el perfil de velocidades, la velocidad media del agua disminuye: para mantener el mismo caudal, el agua toma un mayor calado (de esta forma el aumento de calado compensa la disminución de velocidad y se mantiene el caudal).
- La disminución de la velocidad del flujo limita el desbordamiento por inercia en la curva previa al tramo final.
- El aumento del calado eleva la superficie libre del agua hasta que ésta interfiere con el puente nº5 situado frente a la Calle Déniz y también con la pasarela peatonal (puente nº3). En ambos casos se produce disipación de la energía y el agua desborda por ambos lados del cauce del barranco. La pasarela peatonal tiene una altura libre menor con respecto al fondo del cauce, por lo que el agua pasa además por encima su tablero y se produce un vertido sobre ella (en la realidad el agua chocó con la barandilla de la pasarela pero este elemento estructural no se ha representado en el modelo virtual).
- En la curva del tramo 5 situada aguas arriba de la pasarela y en la orilla opuesta (margen izquierda) a la dirección del flujo, donde tiene lugar el impacto de la onda, se producen desbordamientos debidos al aumento de calado.

En comparación con la situación que se daba en la Fase 1, el flujo tiene menor inercia y la magnitud del desbordamiento es inferior.

- En la obra civil hidráulica de la ampliación del puerto, la disminución de la velocidad del flujo se hace patente en el aumento del tamaño del resalto hidráulico que se produce en el cuenco de disipación de energía.
- Al llegar flujo con menor velocidad al cuenco, al resalto hidráulico recrece hacia aguas arriba. En cualquier caso, el vertido sobre el aliviadero de contención sigue siendo uniforme y los diez canales del marco pluricelular funcionan por igual.

6.2. Conclusiones

- El aumento de la rugosidad del fondo varía la velocidad del flujo y esto altera el comportamiento hidráulico de la avenida. El aumento de la rugosidad media a un valor de 15 centímetros no resta capacidad al cauce del barranco, pero altera el perfil de velocidades.
- El calado aumenta en todo el encauzamiento y se producen desbordamientos localizados al impactar el agua en el puente nº5 situado frente a la Calle Déniz y en la pasarela peatonal (o puente nº3). El agua rebosa a la altura de la última curva y en la orilla apuesta a la dirección del flujo.
- El volumen de desbordamiento en la curva del tramo 5 es inferior y, además, se produce con una menor energía que para las condiciones consideradas en la Fase 1.
- La disminución de la velocidad del flujo al llegar a la obra civil hidráulica de la ampliación del puerto provoca el aumento del resalto en el cuenco de disipación de energía.

Aun así, el caudal punta es correctamente evacuado por esta infraestructura y su presencia no influye en el comportamiento hidráulico en el canal aguas arriba.

7. Conclusiones

7.1. Introducción

La simulación numérica del comportamiento de una avenida en el Barranco del Bufadero permite analizar este fenómeno. Asimismo, la posibilidad de alterar numéricamente la rugosidad del lecho permite simular el efecto hidráulico del depósito de materiales.

Esta variación de las características del canal permite simular la acción de una avenida, si bien no se reproduce con exactitud los fenómenos acaecidos el uno de Febrero de 2010, la simulación permite comprender la influencia de los parámetros intervinientes en el comportamiento físico del caudal de la avenida y comprobar que, la situación final de la simulación, sí se corresponde con los hechos que tuvieron lugar ese día. Al final del estudio se llega a las siguientes conclusiones:

7.2. Geometría del Canal y Rastrillos.

Los rastrillos presentes en el lecho del canal frenan la velocidad del flujo. Al mismo tiempo que retienen los sedimentos de forma repartida evitando un taponamiento en la parte final del canal.

Su presencia disminuye desbordamientos en curvas y minimiza el riesgo de socavamiento de los cajeros.

7.3. Depósito de materiales de arrastre.

El caudal de la avenida arrastra gran cantidad de materiales erosionados a lo largo de la cuenca de aportación y los deposita en su mayor parte en la parte final de su camino hacia el mar. El depósito de dichos materiales se produce a lo largo de toda la avenida y principalmente en la parte final de la misma. Su presencia en el fondo del canal varía por completo el comportamiento hidráulico de la avenida.

Tras la avenida se retiraron los materiales depositados en el canal observándose un espesor medio de 40 cm. No obstante, como la mayor parte de dicho material se depositó en los momentos finales de la avenida y, no de forma continua en todo el lecho, se decidió simular el fenómeno con una rugosidad media de tan solo 15 cm.

A tenor de los resultados, la presencia del material depositado afecta a la velocidad media del flujo y altera de forma sustancial el comportamiento hidráulico de la avenida en el canal: el flujo se ralentiza provocando un mayor calado del agua, sube el nivel de la superficie libre y se producen desbordamientos y colisiones con el puente nº5 situado frente a la Calle Déniz y con la pasarela peatonal.

8. Conclusión final

La correcta evacuación del caudal de la avenida resulta ser una solución de compromiso entre la velocidad del flujo y el nivel que alcanza el agua.

- El carácter torrencial de la avenida, especialmente en su fase inicial, imprime unas velocidades elevadas al flujo y, a pesar del menor calado de agua, en alguna curva se produce desbordamiento de gran caudal y energía por una mayor inercia de la corriente, además de otras afecciones estructurales a los cajeros debido a la erosión. Los rastrillos que se sitúan a lo largo del canal, cuya finalidad es precisamente frenar el flujo, ejercen un efecto favorable sobre este fenómeno.
- La deposición de sedimentos en el lecho del cauce durante la avenida del uno de febrero de 2010 condicionó el comportamiento del flujo en el Barranco del Bufadero. El aporte de material depositado frena el flujo, lo que atenúa el desbordamiento en la curva que se observa en la primera fase.
- La elevación del nivel del agua asociada a una menor velocidad del flujo producen desbordamientos en ambas márgenes, tanto a su paso por el puente nº5 (situado frente a la Calle Déniz) en donde se estrecha el cauce, como al llegar a la pasarela peatonal (puente nº3), debido a la escasa elevación que tiene el tablero con respecto a la solera del barranco.