

Diseño de soluciones de protección frente a avenidas mediante modelización numérica bidimensional

Ignacio Fraga¹, Luis Cea¹, Jerónimo Puertas¹, José Piñeiro², Ignacio Maestro², Eugenia Calvo³

1-GEAMA-Universidade de A Coruña 2-Confederación Hidrográfica Miño-Sil 3-Eyser S.A

i_fraga_@hotmail.com

1 Introducción y antecedentes

La localidad de Sarria se asienta sobre una llanura aluvial donde confluyen los ríos Celeiro y Sarria, dentro de la Cuenca del Miño-Alto Sil. En la zona existen varios antecedentes de inundaciones debido a la presión urbanística sobre los márgenes del río, así como la presencia de numerosas estructuras como puentes y azudes, que suponen obstáculos al flujo. Sin embargo, a raíz de las inundaciones del año 2000 fue cuando se plantearon los estudios que dieron lugar a la solución presentada.



Figura 1 Localización de la localidad de Sarria (izquierda) e imagen de los efectos de la inundación del año 2000

En el año 2004 INEK, Ingeniería y Servicios, elaboró un estudio en el que se determinaba la imposibilidad de encauzar el río Sarria para una avenida de periodo de retorno de 500 años, por lo que resultaba necesario adoptar alguna medida adicional.

La CHN abordó durante el periodo 2005-2007 varios estudios que delimitaron las zonas peligrosas frente a inundaciones, además de analizarse varias alternativas de encauzamiento y reducción de la peligrosidad en el río Sarria. Como resultado de estos estudios se planteó la construcción de una presa de laminación para la avenida de 500 años del río Sarria y el encauzamiento de los ríos Sarria y Celeiro para las avenidas de 100 y 500 años respectivamente dentro de los espacios de reserva delimitados por el Plan Xeral de Ordenación Municipal

A partir del año 2010, Eyser y el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente (GEAMA) de la Universidad de A Coruña definieron las actuaciones necesarias para asegurar la protección de las zonas habitadas y la limitación de las zonas inundadas a las reservadas para tal fin.

2 Objetivos

Uno de los aspectos destacados de este proyecto es que se ha planteado con dos objetivos paralelos.

Por una parte se pretende continuar con el desarrollo del código del modelo Iber, mejorando así el modelo en los estudios de inundabilidad en tramos urbanos de río. El modelizado de elementos como puentes, pasarelas o sistemas de drenaje no está contemplado en la mayoría de modelos 2D, recurriendo frecuentemente a modelos 1D en el estudio del flujo en este tipo de elementos. De este modo el objetivos desde el punto de vista del desarrollo es implementar formulaciones de

- Flujo bajo y sobre puente
- Descarga mediante clapetas
- Descarga a través de azudes

Por otro lado, el objetivo de este proyecto también es definir las obras de defensa necesarias, lo que a su vez supone:

- Identificar las estructuras que suponen una mayor afección, analizando los efectos de su eliminación o modificación
- Definir la geometría en planta y en alzado de las obras de defensa longitudinales (motas).

En este sentido es importante destacar el papel que supone el urbanismo de la zona, ya que algunos de los puentes que suponen una mayor afección tienen un alto valor patrimonial o un trazado muy encajado, limitando así las posibles soluciones, como se puede apreciar en la Figura 2..



Figura 2. Puente "Rúa da Estrela", perteneciente al Camino de Santiago, de gran valor histórico, pero con muy baja capacidad de desagüe

3 Metodología

El trabajo se ha planteado comenzando por un desarrollo y validación de las formulaciones empleadas para el modelizado de puentes, clapetas y azudes. Tras la implementación de las mismas en el modelo Iber se analiza la situación actual desde el punto de vista hidrodinámico, empleando el modelo bidimensional. Una vez analizada la situación actual e identificadas las secciones críticas se proponen distintas alternativas, en función de las modificaciones necesarias en cada estructura así como la altura de mota necesaria.

3.1 Descripción del modelo 2D.

En este estudio se emplea el modelo bidimensional Iber, desarrollado conjuntamente en la UDC, CEDEX, CIMNE y el grupo Flumen de la UPC, que ha sido validado en numerosos casos anteriores. Sobre este modelo se trabaja añadiendo las nuevas formulaciones, actualmente no implementadas en la versión disponible en la web. Se resuelven las ecuaciones de flujo turbulento en lámina libre tanto para régimen permanente como no permanente basándose en las ecuaciones bidimensionales de aguas someras y despreciando el efecto de la

presión atmosférica, la acción del viento y la aceleración de Coriolis. De este modo, las ecuaciones se reducen a las siguientes expresiones:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial q_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x^2}{h} + g \cdot \frac{h^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_x \cdot q_y}{h} \right) = -g \cdot h \cdot \frac{\partial z_b}{\partial x} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_t \cdot h \cdot \frac{\partial U_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_t \cdot h \cdot \frac{\partial U_x}{\partial y} \right)$$

$$\frac{\partial q_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{q_y^2}{h} + g \cdot \frac{h^2}{2} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{q_x \cdot q_y}{h} \right) = -g \cdot h \cdot \frac{\partial z_b}{\partial y} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_t \cdot h \cdot \frac{\partial U_y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_t \cdot h \cdot \frac{\partial U_y}{\partial y} \right)$$

donde q_x y q_y son las dos componentes del caudal, h es el calado, z_b es la cota de fondo τ_b la fricción de fondo (con sus correspondientes proyecciones horizontales), ρ la densidad, g la aceleración de la gravedad y ν_t la viscosidad turbulenta. La fricción de fondo puede ser calculada con diferentes formulaciones, empleando para el caso de estudio la correspondiente a la fórmula de Manning.

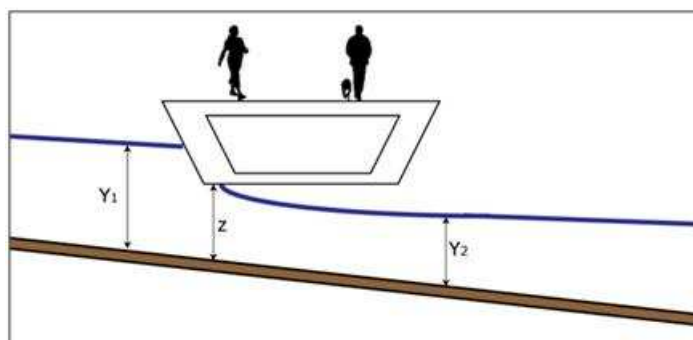
El cálculo del estado hidrodinámico se hace para volúmenes finitos no estructurados, discretizando el flujo en un esquema de orden 2 de Godunov, basado a su vez en un esquema descentrado de Roe. La fricción de fondo se discretiza mediante esquemas semi-implícitos centrados. Dada la importancia de los frentes seco-mojados en los problemas asociados a zonas inundables, estos frentes tienen un tratamiento específico de estabilización, mediante un esquema no difusivo de conservación de la masa.

3.2 Nuevas formulaciones implementadas.

Las nuevas formulaciones implementadas en el modelo Iber se corresponden al flujo bajo puente a presión con tablero no anegado, bajo puente a presión con tablero anegado, sobre puente en lámina libre, a través de clapetas y en vertido mediante azudes. De cara a la definición en la malla, los puentes y vertederos se introducen como condiciones internas, mientras que las clapetas como fuentes de masa en elementos

3.2.1 Flujo a presión bajo tablero no anegado

Esta situación se corresponde con el esquema de la Figura 3. El caudal bajo compuerta o tablero se modela mediante la siguiente formulación:



$$q = C_d \cdot z \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot \left(Y_1 + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} - \frac{z}{2} \right)}$$

Figura 3. Flujo a presión bajo tablero no anegado

donde C_d es el coeficiente de descarga, cuyo valor está comprendido entre 0.3 y 0.5, obteniendo el valor de la Figura 4

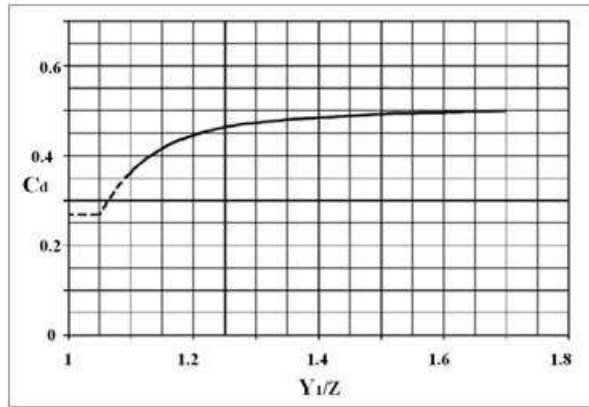


Figura 4. Coeficiente de descarga en función de la relación de calados aguas arriba y bajo puente

3.2.2 Flujo a presión bajo tablero anegado.

Esta situación se corresponde con el esquema de la Figura 5. El caudal bajo compuerta o tablero se modeliza mediante la siguiente formulación:

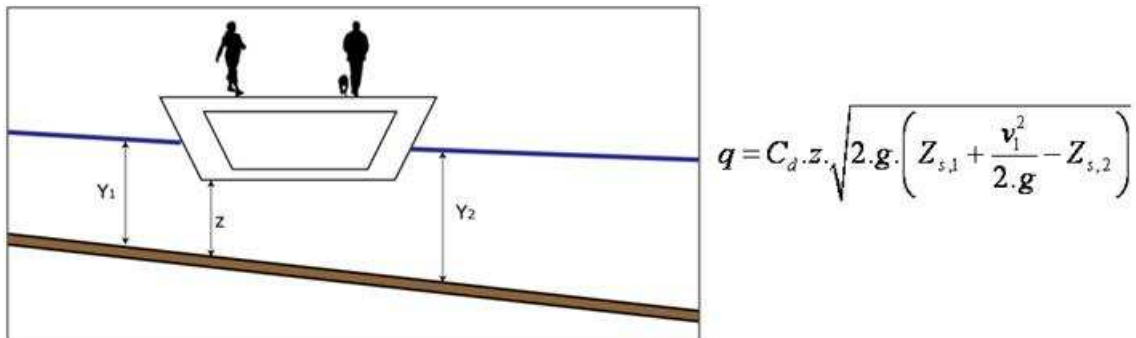


Figura 5. Flujo a presión bajo tablero anegado

donde Cd es el coeficiente de descarga, cuyo valor está comprendido entre 0.7 y 0.9, tomándose generalmente un valor de 0.8.

3.2.3 Flujo en lámina libre sobre tablero

Esta situación se corresponde con el esquema de la Figura 6. El caudal sobre tablero o vertedero en lámina libre se modeliza mediante la siguiente formulación:

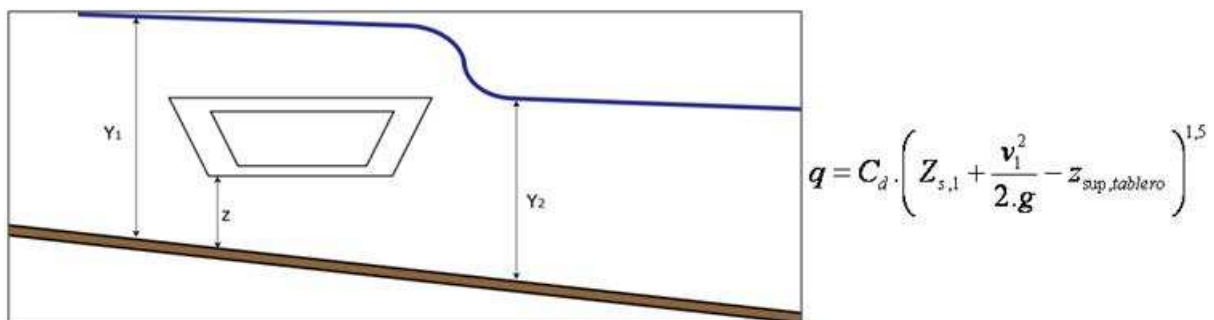


Figura 6. Flujo en lámina libre sobre tablero anegado

donde C_d es el coeficiente de descarga, cuyo valor está comprendido entre 1.4 y 1.7, tomándose generalmente un valor de 1.55.

3.2.4 Sumideros tipo orificio

Los sumideros tipo orificio representan dos tipos de estructuras: o bien alcantarillas y puntos de entrada para el agua en la red de saneamiento, o clapetas, presentes generalmente en motas y estructuras similares para permitir el paso del agua en una dirección. La modelización de sumideros se realiza mediante un término fuente negativo en la ecuación de conservación de masa (pérdida de masa de agua):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h.U_x}{\partial x} + \frac{\partial h.U_y}{\partial y} = -q_{sum}$$

El caudal potencial que puede evacuar un sumidero tipo orificio se calcula como:

$$q_{sum} = C_d \cdot A \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

donde C_d es el coeficiente de descarga del sumidero, definido por el usuario (valor recomendado para $C_d=0.67$), A es el área del sumidero, y h es el calado sobre el sumidero anegado.

En los modelos bidimensionales es habitual emplear tamaños de elementos de malla varios órdenes de magnitud superiores a los valores de área de los sumideros, por lo que los sumideros no se tratan como elementos singulares, sino que emplean las variables calado y velocidad del elemento en que se localizan.

El caudal máximo desaguado por el sumidero está limitado por la cantidad de agua existente en el elemento de la malla donde se encuentra el sumidero (calado en ese elemento). Además, la ecuación empleada se utiliza suponiendo siempre una situación de sumidero anegado, sin tener en cuenta un posible vertido en calado crítico, tratándose por tanto de una simplificación del proceso.

En el caso de un sumidero tipo orificio para funcionamiento como clapeta es necesario indicar no sólo el punto de entrada, sino también el de salida, ya que en este caso en calado empleado es la diferencia de los calados de ambos elementos (ver Figura 7)

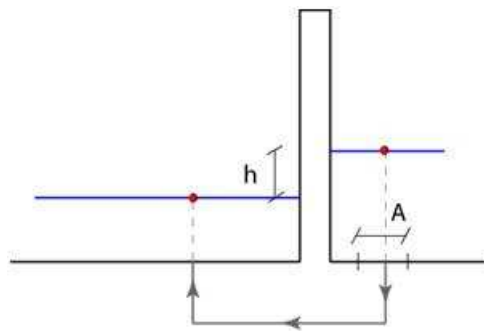


Figura 7. Esquema de funcionamiento de una conexión sumidero como clapeta

Dado el carácter unidireccional que suelen tener las clapetas, sólo se permite el flujo en una dirección, lo que supone que la ecuación de descarga es sólo válida para diferencias de calados positivos, tomando el caudal un valor nulo en caso de que la diferencia sea negativa. Esto no supone ninguna limitación al modelizado de casos bidireccionales, ya que bastaría con definir dos conexiones intercambiando los puntos de entrada y salida.

3.2.5 Sumidero tipo vertedero

Los sumideros tipo vertedero mantienen la misma ecuación de conservación de la masa que los sumideros tipo orificio, aunque varía el término fuente, que se calcula como:

$$q_{sum} = C_d \cdot P \cdot h^{1.5}$$

donde C_d es el coeficiente de descarga del sumidero, definido por el usuario (valor recomendado para $C_d=1.66$), P es el perímetro del sumidero, y h es el calado junto al sumidero no anegado.

El caudal máximo desaguado por el sumidero está limitado por la cantidad de agua existente en el elemento de la malla donde se encuentra el sumidero (calado en ese instante de tiempo). De nuevo, al igual que en el caso de la descarga en un sumidero tipo orificio, es una simplificación de la realidad, ya que no se fuerza al vertido en crítico en el caso es que el vertido sea libre.

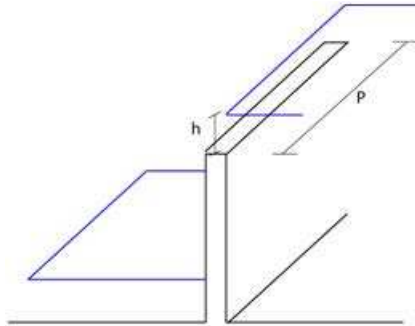


Figura 8 Esquema de funcionamiento de una conexión sumidero tipo vertedero

Las conexiones tipo vertedero son utilizadas principalmente en la formulación de las condiciones de contorno internas.

4 Estudio de la situación actual.

El modelo numérico desarrollado comprende dos tramos de los ríos Sarria y Celeiro situados aguas arriba de su confluencia, de aproximadamente 4Km y 2Km de longitud respectivamente. Se utiliza un dominio suficientemente amplio, para evitar que la zona inundada se vea limitada por la extensión espacial del modelo de cálculo (Figura 9). La discretización se realiza mediante una malla no estructurada de volúmenes finitos tipo arista, compuesta por 70270 nodos de cálculo, con una resolución variable, siendo más fina en el cauce principal y en las zonas adyacentes de las llanuras de inundación, así como en el núcleo urbano. El tamaño de malla aumenta de forma progresiva en las zonas exteriores de la malla (Figura 9). El cálculo se realiza en régimen estacionario, imponiendo un caudal en el río Sarria correspondiente a la avenida de periodo de retorno 100 años ($377.5 \text{ m}^3/\text{s}$) y en el Celeiro de 500 ($254.2 \text{ m}^3/\text{s}$)

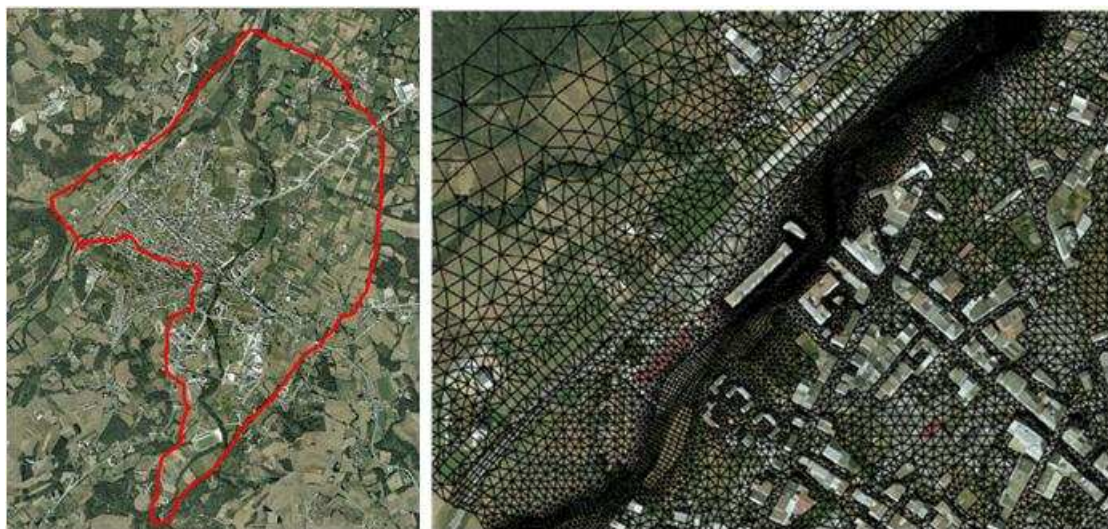


Figura 9. Dominio del modelo de cálculo (izquierda) y detalle de la variación de la resolución de la malla en el cauce y zonas de inundación (derecha)

Los resultados numéricos muestran que la capacidad de los cauces de los ríos Sarria y Celeiro a su paso por la localidad de Sarria es claramente insuficiente para desaguar el caudal de avenida debido al gran número de puentes existentes y a la limitada anchura del cauce, que provoca en determinadas secciones importantes sobre elevaciones de la lámina de agua que se propagan hacia aguas arriba generando una gran extensión de la zona inundada, así como un gran número de zonas de riesgo de graves daños para personas y bienes (Figura 10)

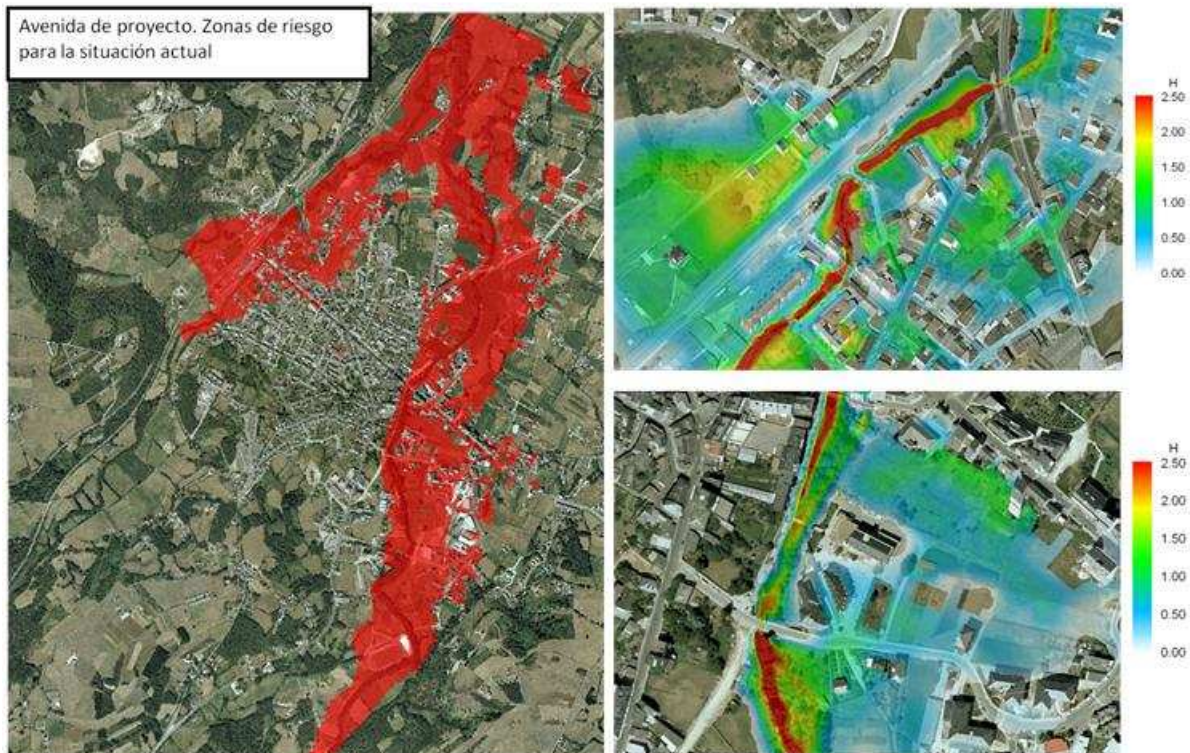


Figura 10. Zonas de riesgo para la situación actual (izquierda), calados en el puente “Rúa da Estrela” del río Celeiro (superior derecha), y en “Ponte do Peregrino” del río Sarria (inferior derecha)

5 Alternativa proyectada

Se consideraron 24 posibles alternativas, modificando los puentes y pasarelas existentes e incluso planteando la eliminación de aquellas estructuras que suponen un mayor obstáculo al flujo.



Figura 11. Esquema de las principales actuaciones para la alternativa proyectada en los puentes y pasarelas de los tramos urbanos de los ríos Sarria (izquierda) y Celeiro (derecha)

De forma complementaria a estas actuaciones se disponen motas de materiales sueltos paralelamente al cauce para delimitar las zonas inundables, definiendo la altura de las mismas a partir de las alturas de lámina incrementando un resguardo de 20 cm. Las motas están equipadas con clapetas de drenaje hacia la zona inundable para la evacuación del agua de lluvia. De este modo se reduce la extensión de las zonas de riesgo a la indicada en la Figura 12



Figura 12. Zonas de riesgo para la alternativa proyectada.

6 Validación experimental

Tras la fase de elaboración del proyecto, en la madrugada del 7 de Enero del 2011 se produjo una avenida, de periodo de retorno menor al del proyecto, pero que pudo ser documentada tomando fotografías de la situación de varios puntos del los cauces en distintos instantes. Con ello se estimó la cota de lámina libre en distintas secciones, así como la extensión de zonas inundables. Además se registraron las precipitaciones de estaciones cercanas, calculando los hidrogramas de ambos ríos, y se realizó una simulación con dichos caudales para comparar los resultados numéricos con los estimados. En la Figura 13 y la Figura 14 se muestra la comparación entre ambos resultados. En general, los resultados muestran un buen ajuste del modelo numérico a la realidad, obteniendo valores de lámina libre próximos, y con una extensión de zonas inundadas muy similar a la real.

Pto	Noche 06/01/2011		Mañana 07/01/2011	
	Registro	Numérico	Registro	Numérico
1	422	421.7	420.5	420.5
2	< 418.75	420.5	418.65	419.3
3	-	419.5	418.6	419.1
4	419	420	-	419.1
5	-	419.7	418.3	419
6	-	420.3	417.8	419.4
7	> 416.2	416.5	-	416.2
8	> 415.75	415.8	-	-

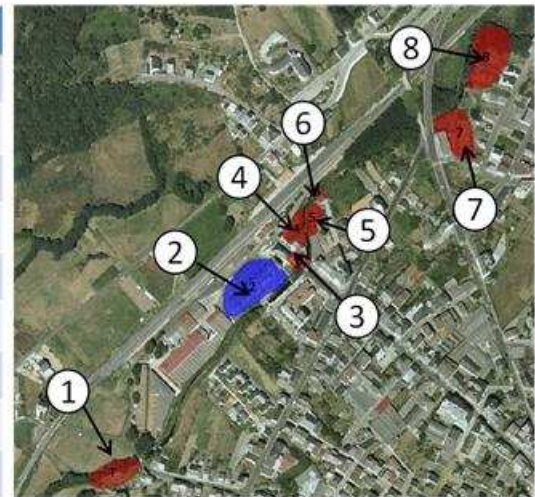


Figura 13. Comparación de resultados en el río Celeiro indicando en rojo las zonas en las que la estimación de os valores registrados es más aproximada y en azul en las que la estimación es más fiable

Pto	Noche 06/01/2011		Mañana 07/01/2011	
	Registro	Numérico	Registro	Numérico
9	> 421.5	421.7	420.85	421.2
10	-	421.3	421.3	-
11	421 / 422	421.2	-	420.6
12	420.5	421	419 ?	420.5
13	419.5	419.7	418.125	418.5
14	418	419.2	416.9	418
15	< 418.5	419.2	416.9	418

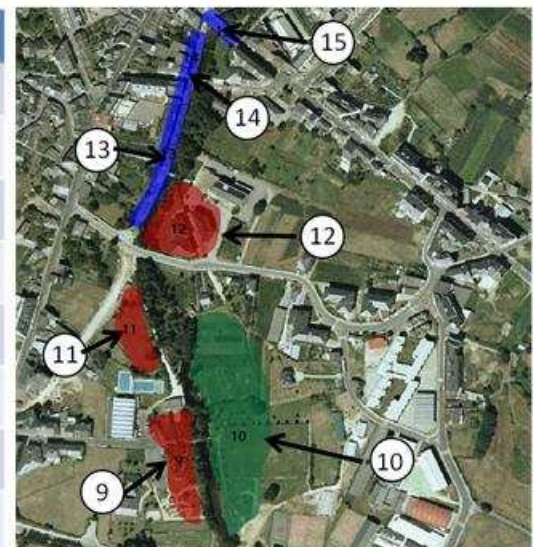


Figura 14 Comparación de resultados en el río Sarria indicando en rojo las zonas en las que la estimación de os valores registrados es más aproximada, en azul en las que la estimación es más fiable y en verde en la que la altura alcanzada se estima a partir de muestras de inundación y no fotografías

7 Conclusión

En esta comunicación se presentan los resultados de la modelización de los ríos Sarria y Celeiro para el estudio de medidas de protección frente a avenidas. Se emplea el modelo numérico bidimensional Iber que utiliza las ecuaciones de Saint-Venant para aguas someras implementando nuevas formulaciones para el modelizado del flujo en puentes y elementos de drenaje. De este modo se identifican las secciones y elementos que suponen una mayor afección, planteando distintas soluciones posibles. Además, los resultados obtenidos con este modelo se comparan con registros experimentales, comprobando que el modelo logra un buen ajuste tanto en valores de calados como de extensión de zonas inundables.

8 Referencias

Bladé,E Modelación en lámina libre sobre cauces naturales. Análisis integrado con esquemas en volúmenes finitos en una y dos dimensiones.Universidad Politécnica de Cataluña. Departamento de Ingeniería Hidráulica, marítima y ambiental. 2005

CEDEX, CIMNE, UDC y UPC (2010) Manual de referencia hidráulico del modelo Iber

CEDEX, CIMNE, UDC y UPC (2010) Manual de usuario del modelo Iber

CEDEX, CIMNE, UDC y UPC (2010) <http://www.iberaula.es/web/index.php> [Consulta: Junio 2011]

Cea,L An unstructured finite volume model for unsteady turbulent shallow water flow with wet-dry fronts: numerical solver and experimental validation. Directores :Jerónimo Puertas Agudo, Elena Vázquez Cendón. Universidade de A Coruña, Métodos matemáticos e de representación. 2005

Cea,L.,Puertas,J.,Vázquez-Cendón,M.E (2007) Depth averaged modelling of turbulent shallow water with wet-dry fronts. *Archives of computational Methods in Engeneering, state of the art reviews, vol 14 (3)*

Thuc,T (1991). Two dimensional morphological computations near hydraulic structures. *Dissertation, Asian institute of Technology, Bangkok, Thailand.*

U.S.A.C.E (2005). HEC-RAS User's manual.