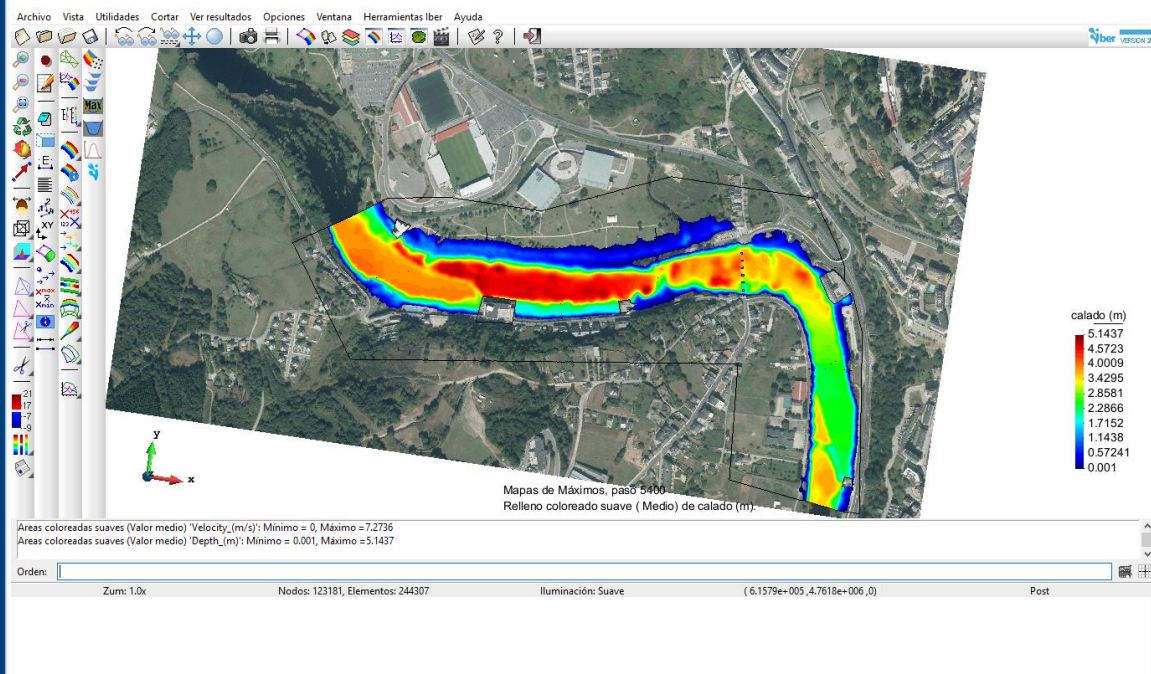


TRABAJO FIN DE GRADO

Predicción de inundaciones mediante herramientas numéricas: Iber



Ander Castro Fernández
Grado en Ciencias Ambientales
Junio 2018

Tutores: Ramón Gómez Gesteira y José González Cao
Departamento de Física Aplicada

Facultade de Ciencias

Universidade de Vigo

Universidade de Vigo

**PREDICCIÓN DE INUNDACIONES
MEDIANTE HERRAMIENTAS
NUMÉRICAS: IBER**



Ander Castro Fernández

Grado en Ciencias Ambientales

Departamento de Física Aplicada

Junio de 2018



Faculta de Ciencias



Environmental | Physics | Laboratory

EPhysLab

Imagen de la portada recopilada del periódico La Voz de Galicia.
Tomada por Óscar Cela el 14/02/2016.



Prof. Dr. Ramón Gómez Gesteira, catedrático del departamento de Física Aplicada de la Universidad de Vigo, y **Dr. José González Cao**, investigador del departamento de Física Aplicada de la Universidad de Vigo

INFORMAN:

Que **D. Ander Castro Fernández** realizó en el Laboratorio de Ephyslab de la Universidad de Vigo, y bajo nuestra dirección, el Trabajo Fin de Grado titulado “**Predicción de inundaciones mediante herramientas numéricas: Iber**”, el cual presenta para optar a **Graduado en Ciencias Ambientales**.

Y para que así conste, firmamos el presente informe en Ourense, a 5 de junio de 2018.

Ramón Gómez Gesteira

José González Cao

“Un modelo matemático de un sistema dinámico se define como un conjunto de ecuaciones que representan la dinámica del sistema con precisión o, al menos, bastante bien. Tenga presente que un modelo matemático no es único para un sistema determinado. Un sistema puede representarse en muchas formas diferentes, por lo que puede tener muchos modelos matemáticos, dependiendo de cada perspectiva” (Katsuhiko Ogata, 1970).

RESUMEN

En este Trabajo de Fin de Grado se trató de reproducir un evento de inundación ocurrido el día 19 de enero del año 2013 en la localidad de Lugo (Galicia, España) mediante el código numérico Iber. Para ello, se seleccionó una zona de estudio concreta que abarca los márgenes del río Miño en dicha localidad, de la cual existían fotografías del evento que se emplearon para comparar los resultados numéricos.

Para llevar a cabo la simulación numérica se recopilaron los datos de entrada necesarios para el modelo: los datos de caudal y de nivel de agua registrados durante el día del evento fueron proporcionados por la Confederación Hidrográfica Miño-Sil, los rasters de elevaciones del terreno se obtuvieron del Centro de Descargas del Instituto Geográfico Nacional, los usos del suelo se obtuvieron teniendo en cuenta la información del SIOSE y el resto de parámetros necesarios fueron establecidos después de realizar un estudio pormenorizado del caso.

Una vez realizada la simulación numérica del evento se llevó a cabo una comparación entre las zonas inundadas en la realidad y las obtenidas numéricamente, así como entre los calados máximos alcanzados, tomando como referencia diversos puntos de control situados en la zona de estudio.

Los resultados obtenidos numéricamente sugieren que Iber es una herramienta válida a la hora de predecir inundaciones ya que es capaz de reproducir de forma razonable la extensión de la inundación y los calados registrados experimentalmente. Así, se propone como un modelo adecuado para ayudar a prevenir y combatir las inundaciones, las cuales pueden dar lugar a pérdidas de bienes y vidas.

ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN.	
1.1.	Contextualización (los riesgos naturales)	19
1.2.	El sistema fluvial	20
1.3.	Concepto y clasificación de inundaciones	22
1.4.	Inundaciones históricas en España	27
1.5.	Capacidad e importancia de predecir inundaciones	29
1.6.	La modelización como herramienta para la evaluación de riesgo	30
1.7.	Modelización numérica y tipos de modelos	31
2.	ÁREA DE ESTUDIO Y OBJETIVOS.	
2.1.	Descripción de la zona	35
2.2.	Objetivos	37
3.	METODOLOGÍA.	
3.1.	Datos y medida de los mismos	39
3.2.	Código numérico Iber	
3.2.1.	Ecuaciones características	43
3.2.2.	Condiciones de contorno implementadas en el modelo	46
3.2.3.	Condiciones internas implementadas en el modelo	47
3.2.4.	Frente seco-mojado	47
3.2.5.	Interfaz de preproceso y posproceso	48
3.2.6.	Parámetros de simulación	
3.2.6.1.	Parámetros de tiempo	51
3.2.6.2.	Datos generales de la simulación	51
3.2.6.3.	Malla	52
3.2.6.4.	Rugosidad	52
3.2.6.5.	Condiciones iniciales	53
3.2.6.6.	Condiciones de contorno	54
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	
4.1.	Criterios de elección del día de estudio	57
4.2.	Resultados	58
5.	CONCLUSIONES	73
6.	REFERENCIAS	75

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los riesgos naturales a nivel mundial. Fuente: Olcina, 2007.....	20
Tabla 2. Tipología de los daños y evaluación. Fuente: Las Inundaciones en la España Peninsular, 1988.....	27
Tabla 3. Resumen del Catálogo Nacional de Inundaciones Históricas. Fuente: proteccioncivil.es.....	28
Tabla 4. Parámetros de tiempo.....	51
Tabla 5. Parámetros generales de la modelización.....	51
Tabla 6. Características de la malla.....	52
Tabla 7. Usos del suelo con su valor n.....	52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. El espacio fluvial. Fuente: Agència Catalana de l’Aigua.....	21
Figura 2. Zona fluvial (izqda.), sistema hídrico (centro) y zona inundable (dcha.). Fuente: Agència Catalana de l’Aigua.....	22
Figura 3. Mapa de zonas con alta probabilidad de inundación. Fuente: SNCZI-IPE.....	26
Figura 4. Obtención del daño anual esperable. Fuente: Bladé <i>et al.</i> , 2014.....	31
Figura 5. Modelo unidimensional HEC-RAS (arriba) y modelo 3D (abajo).....	33
Figura 6. Situación del área de estudio. Situación de la Confederación Hidrográfica Miño-Sil en la Península Ibérica (A); fuente: CHMS. Mapa físico de la Confederación Hidrográfica Miño-Sil (B); fuente: CHMS. Ortofoto de la zona de estudio con infraestructuras que afectan a la simulación (C); fuente: modificación de imagen PNOA cortesía del © Instituto Geográfico Nacional.....	36
Figura 7. Ortofoto de la zona de estudio con las infraestructuras más destacadas. Fuente: modificación de imagen PNOA cortesía del © Instituto Geográfico Nacional.....	37
Figura 8. Esquema y fotografía de la ubicación de la estación N001. Fuente: CHMS.....	40
Figura 9. Curva de gasto (línea azul) calculada a partir de las medidas de caudal puntuales o aforos (triángulos). Fuente: CHMS.....	41
Figura 10. Medidor electromagnético empleado en el SAIH para la realización de aforos. Fuente: CHMS.....	42
Figura 11. Perfilador acústico doppler empleado en el SAIH para la realización de aforos. Fuente: CHMS.....	42
Figura 12. Hidrograma (izqda.) e hietograma (dcha.) registrados por la estación N001 en el período 13-20 de marzo de 2018. Fuente: CHMS.....	43
Figura 13. Configuraciones frentes seco-mojado. Fuente: González- Aguirre <i>et al.</i> , 2016.....	48
Figura 14. Vista de la geometría y condiciones de contorno pertenecientes al preproceso.....	50
Figura 15. Ventana de cálculo de Iber.....	50
Figura 16. Vista de los resultados (calado) pertenecientes al posproceso.....	50
Figura 17. Distribución de los usos de suelo en la zona de estudio.....	52
Figura 18. Condición inicial de la simulación.....	53

Figura 19. Distancia entre la localización de la estación N001 (río arriba) y el comienzo de la zona de estudio. Fuente: modificación de imagen PNOA cortesía del © Instituto Geográfico Nacional.....	54
Figura 20. Situación de la condición de entrada en la zona de estudio.....	55
Figura 21. Situación de la condición de salida en la zona de estudio.....	55
Figura 22. Mapa de calados máximos de toda la zona estudiada.....	58
Figura 23. Mapa de velocidades máximas de toda la zona estudiada.....	59
Figura 24. Mapa de cota máxima alcanzada en la zona de estudio.....	59
Figura 25. Fotografía del Club Fluvial tomada el día 01/05/2018 (izqda.) y fotografía de la misma zona inundada tomada el 19/01/2013 (dcha.), cuya fuente es [Vídeo1].....	60
Figura 26. Fotografía del Paseo Fluvial tomada el día 01/05/2018 (izqda.) y fotografía de la misma zona inundada tomada el 19/01/2013 (dcha.), cuya fuente es [Vídeo2].....	60
Figura 27. Fotografía del mesón O Muiño tomada el día 01/05/2018 (izqda.) y fotografía de la misma zona inundada tomada el día 19/01/2013 (dcha.), cuya fuente es [Vídeo3].....	61
Figura 28. Ortofoto de la zona de estudio con las Figuras 29-37 localizadas. Con flechas rojas se indican los puntos de control concretos donde se estudió el calado. Fuente: modificación de imagen PNOA cortesía del © Instituto Geográfico Nacional.....	61
Figura 29. Fotografía tomada el 19/01/2013 (A) cuya fuente es [Vídeo1]; mapa de calado obtenido con Iber del pilar derecho del tirante de la pasarela (B); ortofoto con el corte transversal señalado en verde (C) obtenida de Google Earth y resultados de topografía y cota de agua en el corte transversal (D).....	62
Figura 30. Fotografía tomada el 19/01/2013 (A) cuya fuente es [Vídeo1]; mapa de calado obtenido con Iber del pilar izquierdo del tirante de la pasarela (B); ortofoto con el corte transversal señalado en verde (C) obtenida de Google Earth y resultados de topografía y cota de agua en el corte transversal (D).....	63
Figura 31. Fotografía tomada el 19/01/2013 (A) cuya fuente es [Vídeo2]; mapa de calado obtenido con Iber en las inmediaciones de la Fábrica de la Luz (B); ortofoto con el corte transversal señalado en verde (C) obtenida de Google Earth y resultados de topografía y cota de agua en el corte transversal (D).....	64
Figura 32. Fotografía tomada el 19/01/2013 (A) cuya fuente es [Vídeo2]; mapa de calado obtenido con Iber al final de la pasarela junto a la Fábrica de la Luz (B); ortofoto con el corte transversal señalado en verde (C) obtenida de Google Earth y resultados de topografía y cota de agua en el corte transversal (D).....	65
Figura 33. Fotografía tomada el 19/01/2013 (A) cuya fuente es [Vídeo2]; mapa de calado obtenido con Iber en el Paseo Fluvial (B); ortofoto de la zona con el corte transversal señalado en verde (C) obtenida de Google Earth y resultados de topografía y cota de agua en el corte transversal (D).....	66

Figura 34. Ortofoto de la zona de estudio con el punto de control indicado en amarillo (A) obtenida de Google Earth; medida de la altura de la plataforma (B); fotografía tomada el 19/01/2013 (C) cuya fuente es [Vídeo2]; gráfica de la evolución del calado del punto de control (D) y medida general de la altura de la plataforma (E).....	67
Figura 35. Ortofoto de la zona de estudio con el punto de control indicado en amarillo (A) obtenida de Google Earth; medida de la tercera barra de la puerta desde el suelo (B); fotografía tomada el 19/01/2013 (C) cuya fuente es [Vídeo1]; gráfica de la evolución del calado del punto de control (D) y medida total de la puerta metálica (E).....	68
Figura 36. Ortofoto de la zona de estudio con el punto de control indicado en amarillo (A) obtenida de Google Earth; medida de la altura máxima del árbol tomado como referencia (B); fotografía tomada el 19/01/2013 del mesón O Muiño (C) cuya fuente es [Vídeo3]; gráfica de la evolución del calado del punto de control (D) y otra medida general del árbol (E).....	69
Figura 37. Ortofoto de la zona de estudio con el punto de control indicado en amarillo (A) obtenida de Google Earth; medida del cambio de forma en el plástico de la papelera (B); fotografía tomada el 19/01/2013 del paseo fluvial (C) cuya fuente es [Vídeo2] en referencias; gráfica de la evolución del calado del punto de control (D) y medida de la altura de la papelera (E).....	70
Figura 38. Mapa de zonas de máximo daño grave según el RD9/2008 obtenido con Iber.....	71
Figura 39. Mapa de zonas de inundación con probabilidad media u ocasional (período de retorno de 100 años). Fuente: visor del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI).....	71

1

Introducción

1.1. Contextualización (los riesgos naturales).

Los terremotos, los deslizamientos de tierra y las inundaciones son fenómenos naturales relacionados habitualmente con riesgos. Para que dicho riesgo esté presente, estos fenómenos deben actuar sobre territorios habitados en los que potencialmente puedan causar daños al ser humano y a bienes (Bryant, 1991; Ollero, 2014). En muchas ocasiones sus consecuencias tan dañinas están ligadas a inadecuadas actuaciones humanas sobre el territorio, ya sea por motivos de subsistencia (ocupación de llanuras inundables para explotación agrícola) o por intereses de carácter económico, sin tener en cuenta los peligros climáticos asociados a estas actuaciones (Bryant, 1991; Olcina, 2007).

Históricamente, leyendas y relatos ya hacen referencia a desastres asociados a dichos fenómenos naturales. En épocas pasadas, los desastres naturales fueron muchas veces presentados como castigos divinos derivados de una desviación respecto a un supuesto correcto comportamiento moral. Así, por ejemplo, el terremoto registrado en Lisboa en 1775 fue considerado desde ese punto de vista. Frente a estas ideas, pensadores como Kant o Rosseau le dieron el enfoque de evento natural e insistieron en la necesidad de alejarse de los lugares peligrosos para construir (Bryant, 1991). En las últimas décadas el interés por el conocimiento de las causas y la minimización de los efectos de estos eventos fue haciéndose cada vez mayor. De tal manera es así que la década de los 90 del s. XX fue declarada por la ONU como el Decenio Internacional para la Reducción de los Desastres Naturales. Derivado de esto se propuso el establecimiento de un marco a nivel internacional que aportase acciones para prevenir y defenderse de los mismos (Olcina, 2007).

Olcina (2007) analizó las catástrofes naturales más importantes entre 1900 y 2005 en todo el mundo y definió una clasificación de los riesgos más perjudiciales para la población considerando el número de víctimas y la población afectada (*Tabla 1*). Se llegó

a la conclusión de que los eventos pluviométricos (sequías e inundaciones) son los que presentan un mayor impacto. En la década de los 90, las pérdidas anuales por causas naturales alcanzaron en España la cifra de 7,350 millones de euros, la mayoría de los cuales se relacionaron con el sector primario, haciendo de nuestro país una de las regiones europeas más afectadas (Olcina, 2007).

Tabla 1. Clasificación de los riesgos naturales a nivel mundial. Fuente: Olcina, 2007.

Según número de víctimas	Según población afectada
1. Inundaciones	1. Sequías
2. Sequías	2. Inundaciones
3. Ciclones tropicales	3. Ciclones tropicales
4. Sismicidad	4. Sismicidad
5. Deslizamientos	5. Deslizamientos
6. Temperaturas extremas	6. Temperaturas extremas
7. Temporales de viento	7. Temporales de viento

En los siguientes apartados se tratarán con detalle las inundaciones, que es lo que atañe a este Trabajo de Fin de Grado.

1.2. El sistema fluvial.

Con el objetivo de comprender y situar mejor las inundaciones hay que tener en cuenta el concepto de sistema fluvial. Se define el sistema fluvial como el área geográfica formada por tres componentes básicos: la zona fluvial, el sistema hídrico y la zona inundable (Agència Catalana de l'Aigua). En la *Figura 1* se encuentran delimitados cada uno de los tres componentes nombrados.

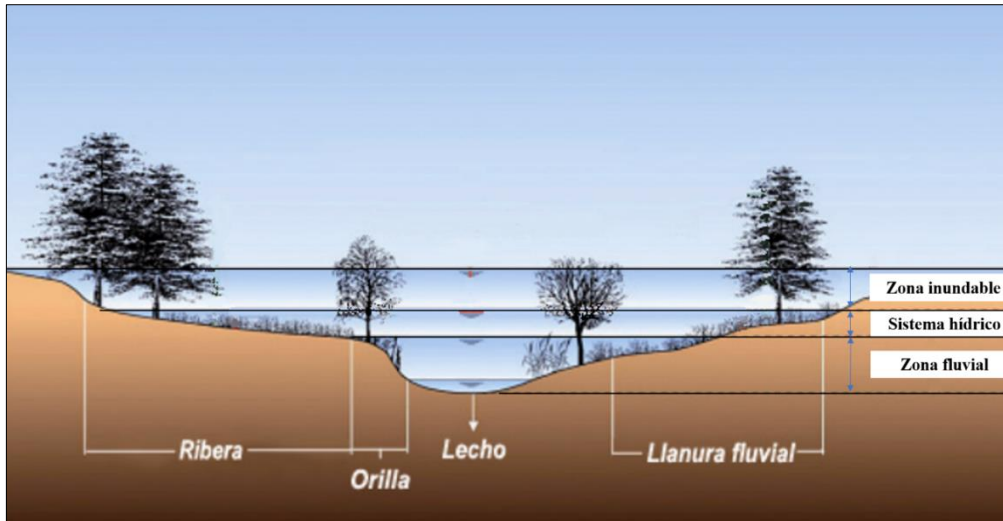


Figura 1. El espacio fluvial. Fuente: Agència Catalana de l'Aigua.

Según la Agència Catalana de l'Aigua, cada uno de los componentes básicos del sistema fluvial anteriormente nombrados posee unas características concretas. Así, la zona fluvial es la perteneciente al espacio fluvial ocupado por el río y está formada por el cauce o lecho (con presencia de agua continuada o no) y las ribera. En esta zona distinguimos los sistemas biológicos asociados al río y la morfología de su cauce. Para limitar la zona fluvial se toma como referencia la línea base surgida de la delimitación de las crecidas asociadas a un periodo de retorno de 10 años, definido éste como el lapso promedio de tiempo entre la ocurrencia de un evento igual o mayor a una magnitud dada (Campos, 1998).

El sistema hídrico es la zona del espacio fluvial que se reserva para la correcta conservación del régimen de corrientes en caso de avenida dado que es una zona con muchas posibilidades de ser inundada. Se trata de un elemento principal para el ecosistema fluvial ya que además de soportar la corriente durante la inundación mantiene la relación con el resto de elementos bióticos. Para definir el sistema hídrico se toma como referencia la franja delimitada por la línea de inundación asociada a un periodo de retorno de 100 años.

Por último, la zona inundable es la parte del espacio fluvial que el río ocupa de manera esporádica coincidiendo con crecidas poco frecuentes. La finalidad de preservar esta zona también está relacionada con evitar daños, aunque ésta, a diferencia de las dos zonas anteriores sí puede ser modificada por la actividad antrópica.



Figura 2. Zona fluvial (izqda.), sistema hídrico (centro) y zona inundable (dcha.). Fuente: Agència Catalana de l'Aigua.

1.3. Concepto y clasificación de inundaciones.

Dado que este documento se centra en las inundaciones fluviales, será a éstas a las que nos referiremos en todo momento, dejando de lado aquellas que puedan asociarse a mares u océanos. De esta manera, el término inundación puede definirse como el aumento del agua por encima del nivel normal del cauce, entendiéndose nivel normal como la elevación de la superficie de agua que no causa daños. Por tanto, definiremos una inundación como la elevación de la superficie de agua mayor a la habitual en el cauce del río (Glosario internacional de hidrología de la OMM/UNESCO, 2012).

Cuando se habla de un fenómeno con consecuencias tan relevantes como las inundaciones, no se puede pasar por alto el conocimiento de sus causas, las cuales son muy diversas y, además, nos permiten definir una clasificación en función de las mismas. Dependiendo de la causa a la que se deban nos enfrentaremos con un tipo diferente. Podemos clasificarlas en inundaciones de tipo climático, parcialmente climáticas y de otros tipos (antrópicos, ...). Al hablar de inundaciones climáticas tienen especial importancia las lluvias de gran intensidad y prolongadas. En el segundo de los tipos se distinguen factores relacionados con el clima como la causa parcial de inundaciones como podría ser un estuario, donde al coincidir grandes caudales en el río con la marea alta se producen desbordamientos. El tercero de los grupos comprende distintos tipos de causas como deslizamientos, roturas de presa, etc. que obstruyen los cursos de agua (Ayala-Carcedo *et. al.*; 2002). De forma general, según el informe “Las inundaciones en la

España Peninsular” (1988), las principales causas son: avenidas, temporales ciclónicos, obstrucciones en los cauces, efectos de presas y embalses e insuficiencia del drenaje.

Olcina (2007) propone otra clasificación en la que se distinguen varios tipos de inundaciones en función del fenómeno natural que las causa. De esta manera podemos distinguir:

-Inundaciones provocadas por precipitaciones torrenciales (>100 mm/24 h) o intensas (30 mm/30 min), hablándose, si la respuesta del aparato fluvial afectado es casi instantánea, de inundaciones relámpago (flash-floods);

-Inundaciones masivas que afectan a grandes colectores (Ebro, Duero, Guadalquivir, Guadiana, etc.), causadas por lluvias abundantes y regulares de larga duración;

-Desbordamientos causados por deshielos rápidos en cursos de montaña a raíz de lluvias convectivas de primavera o frontales de invierno;

-Avenidas provocadas por roturas de embalses, generalmente por efecto de lluvias muy copiosas que rebasan la capacidad de los mismos.

Entre los tipos de inundaciones considerados por Olcina (2007), las flash-floods son las más frecuentes en España, siendo la franja mediterránea la más castigada. Estas inundaciones se caracterizan por presentar efectos muy localizados, pudiendo provocar grandes erosiones y daños debido a la elevada fuerza de las corrientes (Bryant, 1991).

Se definen como acciones antrópicas todas aquellas actividades realizadas por el ser humano que puedan alterar de alguna forma el cauce original de los ríos. Históricamente la raza humana ocupó las cuencas de drenaje y las llanuras de inundación alterando los sistemas fluviales. Fue el desarrollo de la agricultura en el Neolítico la primera de las alteraciones importantes de las cuencas. La existencia de embalses y diques en ríos está documentada desde el antiguo Egipto y en Mesopotamia también eran frecuentes (Ayala-Carcedo *et al.*, 2002). Aunque la ingeniería relacionada con la alteración de los sistemas fluviales se conoce desde antaño, las mayores modificaciones se llevaron a cabo sobre todo durante el siglo XX, por lo que casi la totalidad de los ríos presenta alteraciones (Módulos Universitarios en Ciencia del Desarrollo Sostenible, 2018).

No sólo la construcción de embalses y diques puede incrementar el riesgo de inundaciones. También, por ejemplo, el cambio de los usos del suelo juega un papel muy importante en el incremento del mismo. Las explotaciones mineras, agricultura, urbanización, etc. inciden de manera directa en las avenidas ya que modifican el comportamiento del terreno frente a eventos de lluvias extremas. Adquiere mayor importancia el caso de la urbanización de terrenos que originalmente presentaban otros usos, cuyos efectos son los siguientes: impermeabilización de los suelos incrementando el caudal de avenida, aceleración de flujos, apuntamiento del hidrograma, incremento de la carga de sedimentos, etc. (Ayala-Carcedo *et al.*, 2002). La ocupación de las zonas inundables también incrementa los efectos devastadores de las inundaciones. La tendencia de la raza humana a colonizar y habitar lugares próximos a masas de agua para facilitar el comercio y el transporte viene de épocas pasadas. Además, la construcción de vías de comunicación e infraestructuras sobre las zonas con riesgo de inundación modifica la crecida y afecta a los flujos tanto canalizados como desbordados (Calvo, 1984).

Hay que decir también que existen acciones de origen antrópico que pueden disminuir el riesgo en caso de inundación. Dentro de las acciones que disminuyen el riesgo podemos distinguir las estructurales y las no estructurales. Entendemos por **acciones estructurales** las obras de ingeniería de defensa de las inundaciones en los cauces. Estas siguen siendo construidas hoy en día, pero hay que prestar especial atención a su diseño y a la ubicación, ya que colocarlas incorrectamente puede favorecer el desarrollo de la avenida. Los impactos ambientales y la alteración fluvial que provocan hacen que en muchas ocasiones se replantee su construcción. Las más importantes según Tarbuck (2004) son:

- a) Diques. Son barreras paralelas al cauce que protegen las tierras situadas a los lados de la crecida; sus efectos son variables y dependen de la magnitud de la crecida. Ha de tenerse en cuenta el buen drenaje hasta el canal para evitar la acumulación de agua en las zonas próximas.
- b) Reforestación y conservación de suelos. Conservar los bosques y prados favorece la retención del agua en el suelo evitando las puntas de las crecidas y también la reducción de los sedimentos transportados, por quedar éstos retenidos en la zona radical de los vegetales.

- c) Canalización del cauce o lecho. Conjunto de infraestructuras que disminuyen el calado de la crecida ensanchando o profundizando la sección para aumentar el área.
- d) Desvío del cauce. Utilizado cuando no es posible modificar la capacidad del cauce, como por ejemplo en una ciudad, donde las zonas urbanizadas lo dificultan.
- e) Almacenamiento y laminación. Se consigue suavizar los eventos de inundación mediante la disminución de las puntas de caudal almacenando volúmenes de agua. Dicho efecto de aplanamiento de los caudales máximos es conocido con el nombre de laminación de un hidrograma y se consigue construyendo embalses o presas.

Las obras estructurales transmiten seguridad y provocan que las actividades humanas en las zonas de riesgo se vean incrementadas. En ocasiones, los efectos devastadores derivados de inundaciones pueden verse incrementados debido a fallos en las estructuras de defensa o la existencia de fenómenos naturales muy extremos que no se consideraron a la hora de diseñar dichas estructuras de defensa. Por ejemplo, en agosto de 2005 se produjo el Huracán Katrina en Nueva Orleans, y provocó inundaciones importantes en zonas de diques debido a su rotura (Módulos Universitarios en Ciencia del Desarrollo Sostenible, 2018).

Dentro de las **acciones no estructurales** podemos distinguir la predicción, la previsión y la prevención. En la predicción se incluyen los estudios que ayudan a conocer de manera anticipada las variables hidrológicas de la avenida. La predicción meteorológica aporta datos sobre la formación y evolución de las precipitaciones. Cuando hablamos de previsión, tendremos en cuenta las acciones dirigidas a conocer el riesgo y su alcance. Es aquí donde cobra importancia la metodología para el conocimiento del riesgo, que conducirá a la creación de mapas de peligro y riesgo. Existen diversos criterios para clasificar la peligrosidad de inundación, aunque el más habitual es la frecuencia de la misma. Estas aproximaciones se pueden realizar por métodos estadísticos o bien a partir de datos históricos. También es imprescindible determinar el conjunto de elementos vulnerables que pueden verse afectados por la inundación. El mapa de riesgo de inundación será la combinación de los mapas de peligrosidad y vulnerabilidad (MAPAMA, 2018). En la *Figura 3*, obtenida del visor SNZI, se muestra en color rojo la zona con alta probabilidad de ser inundada en las inmediaciones de Lugo.



Figura 3. Mapa de zonas con alta probabilidad de inundación. Fuente: SNCZI-IPE.

Por último, la prevención es el conjunto de medidas para minimizar el riesgo. Algunas de ellas son la ordenación territorial, la educación y la contratación de seguros. La contratación de pólizas de seguros permite indemnizar económicamente a los afectados, la educación de la población facilita las buenas prácticas preventivas y la formación de técnicos que gestionan estos sucesos favorecen una mejor gestión (Tarbuck, 2004).

Las inundaciones se producen en todo el mundo y, aunque pueden también tener impactos positivos como, por ejemplo, la regeneración del terreno en zonas de sequía prolongada o facilitar el correcto mantenimiento de ciertos ecosistemas como es el caso de los humedales, causan importantes daños, tanto a nivel económico como humano. Junto con las tormentas, se trata probablemente del desastre natural más devastador, generalizado y frecuente (Teng *et al.*, 2015). Es por ello que los daños por inundaciones son responsables de aproximadamente un tercio de las pérdidas económicas derivadas de desastres naturales en Europa (de Moel and Aerts, 2011). Los daños por inundación pueden ser clasificados en directos e indirectos. Los directos son los debidos al contacto físico del agua de la inundación (que transporta sedimento y material flotante) con el ser humano o cualquier propiedad. Los indirectos se derivan del efecto del daño directo y pueden darse fuera del evento de inundación, tanto en espacio como en tiempo. Ejemplos de daños indirectos son la interrupción del tráfico y servicios públicos. Además, ambos

tipos de daños pueden clasificarse en tangibles o intangibles, dependiendo de si las pérdidas pueden ser cuantificadas con valor monetario (Smith y Ward, 1998; Merz *et al.*, 2010).

Al hablar de daños, es necesario relacionar la tipología de los mismos con su evaluación (*Tabla 2*). Según “Las inundaciones en la España Peninsular” (1988) los daños se clasifican de la siguiente manera:

Tabla 2. Tipología de los daños y evaluación. Fuente: Las Inundaciones en la España Peninsular, 1988.

Tipología	Evaluación
• Pérdidas de vidas humanas	➤ Número de personas con riesgo
• Daños físicos a edificios y obras	➤ Coste de sustitución o reparación
• Pérdidas de bienes y servicios	➤ Coste de las pérdidas y/o de sus consecuencias
• Costes de la lucha contra la inundación	➤ Coste de los servicios y materiales empleados
• Daños intangibles	➤ Enumeración sin evaluación económica

1.4. Inundaciones históricas en España.

Desde el año 1995, la Dirección General de Protección Civil está llevando a cabo la elaboración del *Catálogo Nacional de Inundaciones Históricas (CNIH)*. Su objetivo es la sistematización y homogeneización de la recopilación de datos sobre inundaciones históricas a nivel nacional, así como facilitar y asegurar su inmediata actualización ante la ocurrencia de nuevos episodios de inundación. Como se puede observar en la *Tabla 3*, la cuenca del Miño-Sil es una de las que más tardó en recopilar datos de inundación (comenzó en 1656). Es por eso que en el período anterior al año 1500 no hay registro de ninguna avenida. Desde 1500 a 1900 sólo una y desde 1900 a 2010, 38. Resulta evidente que a medida que pasaron los años aumentaron los eventos de inundación. Esto puede deberse a la mayor frecuencia de eventos extremos asociada al cambio climático, aunque también es muy probable que tenga que ver el mayor control y la actual sofisticación tecnológica para su detección.

Tabla 3. Resumen del Catálogo Nacional de Inundaciones Históricas. Fuente: *proteccióncivil.es*

CATÁLOGO	AÑO DE PARTIDA	< 1500	1500 - 1900	1900- 2010	TOTAL
DUERO	S. I (A. d C.)	23	103	182	308
EBRO	S. I (A. d C.)	53	203	379	635
CANTÁBRICO	1522	---	62	153	215
GALICIA-COSTA	1584	---	18	57	75
MIÑO-SIL	1656	---	1	38	39

A partir de los datos recogidos en el *CNIH* y en las hemerotecas de diferentes diarios (Heraldo, ABC, etc.) se han identificado una serie de inundaciones que, dado sus negativos efectos, se enumeran a continuación:

- Rotura del pantano de Puentes, en Murcia. A pesar de la existencia de informes que alertaban de la precariedad del diseño de dicho pantano, las obras siguieron adelante. El 30 de abril de 1802, las puertas del pantano cedieron a la presión del agua e inundaron parte de la localidad de Lorca, causando al menos 608 víctimas mortales y alrededor de 2,000 viviendas destruidas.
- Catástrofe de Ribadelago. En el año 1959 la presa de Vega de Tera sufrió una rotura y el agua inundó en pocos minutos la localidad zamorana de Ribadelago. Murieron 144 personas y se culpó a la escasa calidad de los materiales usados en la creación de la infraestructura, así como la incorrecta ubicación de la misma.
- Inundaciones producidas en el año 1959 en la comunidad asturiana y sobre todo en Galicia, donde varios ríos se desbordaron y anegaron campos, casas e industrias produciendo pérdidas cuantiosas. El Sil llenó el embalse de Bárcenas en Ponferrada y provocó el corte de la vía férrea a su paso por Santa María; en las obras de la presa de Peñarrubia el agua cortó la carretera a Ourense. Desprendimientos en la zona gallega hicieron descarrilar máquinas ferroviarias y el Sil y el Miño se desbordaron en la zona de Los Peares cerca de su unión. Fue importante hasta el punto de que el Sil en Boca de Monte (provincia de Lugo) alcanzó un caudal de 2,400 m³/s.

- “Diluvio universal de Barcelona”. El 25 de septiembre de 1962 ocurrió la que es considerada como la mayor catástrofe natural de la historia reciente española. Las cifras oficiales muestran 617 muertos en apenas unas horas, aunque estudios recientes aseguran que hubo cerca de mil. Aparecieron cadáveres a kilómetros de distancia de sus casas, barrios enteros desaparecieron y coches, camiones y autobuses fueron arrastrados por las riadas.
- Riada de Santa Teresa (Valencia), en el año 1973, que causó cientos de personas fallecidas y heridas y además gran cantidad de daños materiales.
- Riada del camping Las Nieves Biescas en agosto de 1996. Fallecieron 87 personas y 183 resultaron heridas.

1.5. Capacidad e importancia de predecir inundaciones.

A la vista de los ejemplos de inundaciones históricas mostrados en el apartado anterior se pone de manifiesto la gran importancia de poder predecir con suficiente antelación las inundaciones, sobre todo en zonas en las que se pueda poner en riesgo a la población. En el siglo pasado se distinguieron dos tipos de enfoques para predecir inundaciones. Por un lado los métodos empíricos como por ejemplo mediciones, teledetección, modelos estadísticos a partir de métodos basados en datos y encuestas, métodos botánicos, geomorfológicos, históricos, etc. (Schumann *et al.*, 2009; Smith, 1997; Díez Herrero *et al.*, 2008) y, por otro lado, los métodos hidrodinámicos. Dado que este Trabajo de Fin de Grado está relacionado con el segundo de los enfoques, será éste el que se desarrolle con más detalle.

En el mes de julio de 2010 se aprobó en España el Real Decreto 903/2010. Su objetivo es el de combatir las inundaciones con el fin de evitar daños a la salud humana, medio ambiente, patrimonio cultural y actividad económica. Esto se consigue de diferentes maneras; con medidas estructurales, planes de alerta y protección civil, ordenación del territorio o modificación hidrológica-forestal de las cuencas. Una herramienta más para conseguir dichos objetivos es la modelización numérica (Bladé *et al.*, 2014). Estos modelos numéricos se utilizan frecuentemente en el mapeo de inundaciones (Apel *et al.*, 2006; Dutta *et al.*, 2006), evaluación de daños por inundación

(Merz *et al.*, 2010), pronóstico de inundación en tiempo real (Arduino *et al.*, 2005), ingeniería relacionada con inundaciones (Gallegos *et al.*, 2009), planificación de los recursos hídricos (Vaze *et al.*, 2013), hidrología de captación (Beven, 1989), etc.

Dado que el campo de la modelización y predicción de inundaciones se está desarrollando a escala tan rápida, el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino creó el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI), enmarcado en el Real Decreto 903/2010 de evaluación y gestión de los riesgos de inundación y en el Real Decreto 849/1986. Dicho sistema cumple las exigencias propuestas por la norma europea y también cubre las necesidades de información de organismos, empresas y particulares para la correcta gestión del dominio fluvial.

1.6. La modelización como herramienta para la evaluación de riesgo.

La legislación vigente en Europa relacionada con las inundaciones atiende al término riesgo, que debe incluir la evaluación de los daños ocurridos. En cuanto a la metodología para elaborar los mapas de peligrosidad y riesgo, no existe demasiada homogeneidad, por lo que cada zona del territorio europeo posee la suya (Bladé *et al.*, 2014). Así, el Real Decreto 903/2010 obliga a estudiar el Dominio Público Hidráulico, la Zona de Flujo Preferente y una zonificación de la inundabilidad (MARM, 2011); además, el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables muestra en sus mapas el número de habitantes, las instalaciones de prevención, tipo de actividad económica... En otros proyectos de la UE (Floodsite, 2009) se proponen metodologías diferentes para cuantificar una avenida con un determinado período de retorno, y se consideran los bienes, personas y propuestas de curvas de daño relacionadas con la peligrosidad. Para evaluar daños materiales se sigue la propuesta de la Federal Emergency Management Agency (FEMA, 2011).

Bladé *et al.* propusieron en 2014 unos pasos para la evaluación del riesgo de inundación que consideran tanto daños materiales como humanos. Son los siguientes:

-Elaboración de mapas de peligrosidad para períodos de retorno distintos; estos mostrarán calados, velocidades, caudales o variables que dependan de alguna de las anteriores;

-Inventario y valoración de bienes que se puedan ver afectados. Éste puede realizarse a partir de los usos del suelo;

-Obtención de curvas de daños que permitan conocer los porcentajes de pérdidas;

-Evaluación de los mapas de daños, cruzando los mapas de peligrosidad con las curvas de daños.

A partir de estos pasos podremos conocer el daño que se espera para cada período de retorno expresado por unidad de superficie. Sabiendo que el período de retorno en años es el inverso de la probabilidad anual de que se exceda un determinado nivel de inundación, se pueden agregar los distintos períodos y obtener un resultado global de Daño Anual Esperable (DAE). Al realizar la integración en superficie, el valor del DAE refleja el promedio en un año del valor total de pérdidas en la zona que estamos estudiando. Así, en la *Figura 4* se distingue la representación gráfica del DAE.

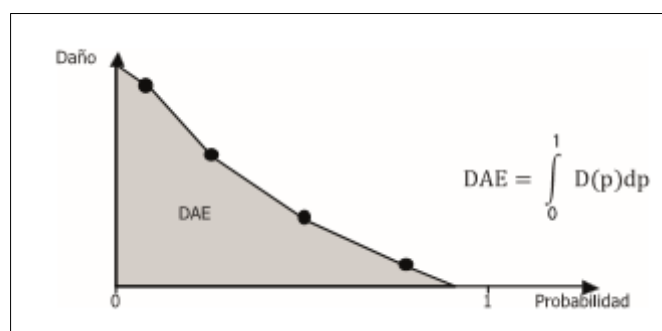


Figura 4. Obtención del daño anual esperable. Fuente: Bladé et al., 2014.

1.7. Modelización numérica y tipos de modelos.

La predicción de inundaciones se puede realizar por medio de modelos numéricos. Un modelo numérico es una representación simplificada de la realidad. Para modelizar flujos fluviales ha de tenerse en cuenta la topografía del cauce y de las llanuras de inundación (Bladé *et al.*, 2014). Cualquier modelo escogido para trabajar va a depender de, al menos, cinco aspectos principales que se deben tener presentes. Éstos son: las ecuaciones a resolver, el esquema numérico utilizado para su resolución, la discretización espacial, las condiciones de contorno y la rugosidad del terreno (Bladé *et al.*, 2014). Dada la variedad de modelos que existen, conviene elegir el que mejor se adapte a nuestro caso de estudio, ya que no siempre los más complejos son los que obtienen mejores resultados (Knight, 2013).

La modelización numérica de flujo en ríos comenzó a utilizarse a mediados del siglo XX trabajando con modelos unidimensionales. En estos modelos el río es considerado como una línea formada por puntos de cálculo que constituyen las secciones transversales, de forma que la geometría del cauce es una propiedad de cada punto o sección (Bladé *et al.*, 2014). El flujo de agua se produce en el sentido del eje del río y es perpendicular a cada sección transversal, y la cota y velocidad de agua son constantes en cada sección. Estas hipótesis limitan la capacidad de modelización de este tipo de modelos. Algunos de los habitualmente utilizados son HEC-RAS del Hydrologic Engineering Center del U.S. Army Corps of Engineers o el programa Mike-11 del Danish Hydraulic Institute (Bladé *et al.*, 2014).

Posteriormente se desarrollaron modelos bidimensionales para el estudio del comportamiento de ríos. En estos el río se discretiza con una malla formada por celdas de forma triangular o cuadrangular que representa la topografía de la zona. La creación de una buena malla para calcular es un paso de vital importancia en la modelización y normalmente requiere de tiempo y experimentación para comprobar cuál se ajusta más y obtiene mejores resultados. Además, el avance en ingeniería informática de los últimos años permite abordar problemas y simulaciones que hace años eran inviables en periodos cortos de tiempo (Bladé *et al.*, 2014). Existen diversidad de modelos 2D, como el Mike-21 (del DHI) y Sobek (de Deltares) que utilizan esquemas en diferencias finitas de direcciones alternadas. Otros ejemplos, que emplean la técnica de volúmenes finitos, pueden ser Infoworks, comercializado por la empresa Innowyze y el programa con el que se trabajó para la realización de este Trabajo de Fin de Grado, el modelo IBER.

Existen también modelos tridimensionales. El uso de este tipo de modelos es mucho menos común que el de los otros dos, dado a que las mallas de cálculo son mucho más complejas y el coste computacional no resulta asequible. De esta forma, sólo se utilizan para estudiar el flujo en zonas concretas como pueden ser meandros o estructuras hidráulicas (puentes, vertederos, compuertas, etc.). Para conseguir la malla en tres dimensiones, se utilizan frecuentemente las capas sigma; sobre la capa en 2D horizontal se generan capas en dirección vertical. Este método lo utiliza por ejemplo el modelo Delf3D, que puede simular situaciones ambientales con un escaso número de capas en vertical (Cea *et al.*, 2009; Stelling y Zijlema, 2003). Otra manera de discretizar sería la utilización de una malla en 3D fija, como ocurre en el método Volume-of-Fluid (Bladé *et al.*, 2014). En la *Figura 5* se muestra en la parte de arriba un ejemplo de modelo

unidimensional, concretamente el HEC-RAS y abajo uno en tres dimensiones. En cuanto al bidimensional, se mostrará durante todo el documento por ser el modelo Iber uno de ellos.

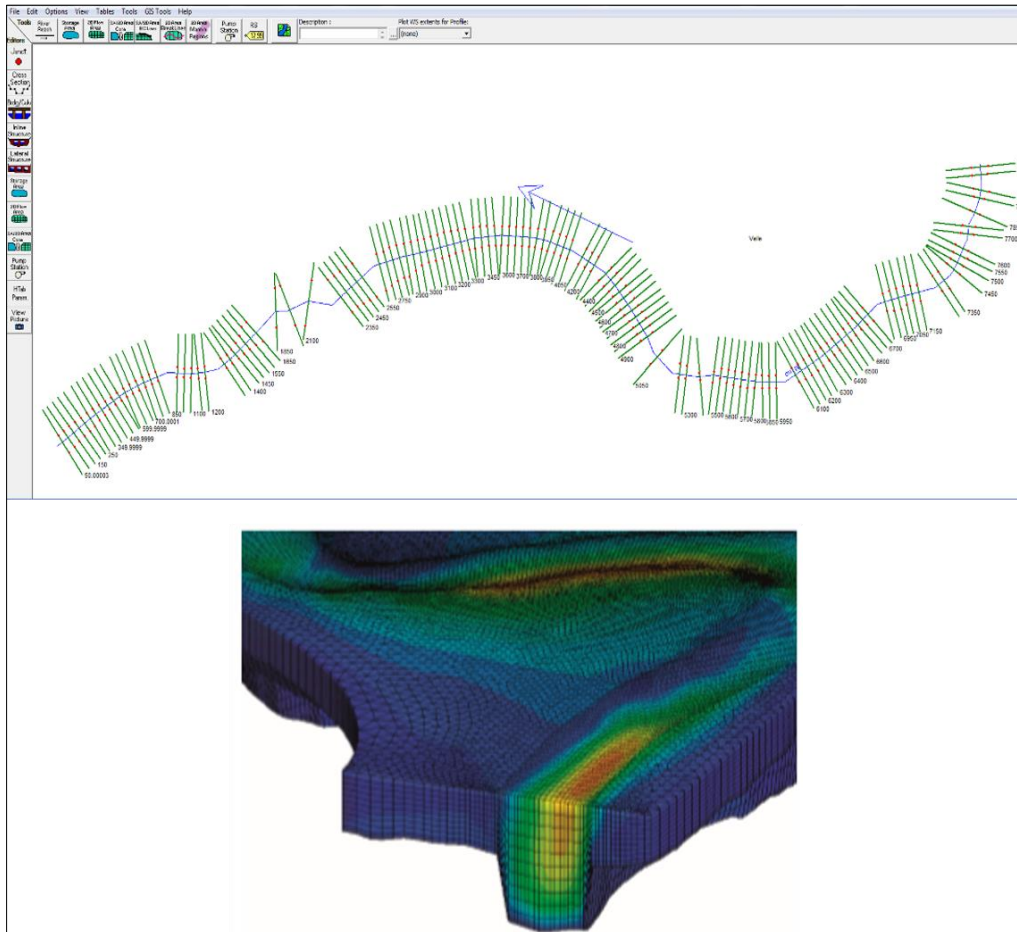


Figura 5. Modelo unidimensional HEC-RAS (arriba) y modelo 3D (abajo).

2.1. Descripción de la zona.

La zona de estudio se encuentra influenciada por el río más importante de Galicia: el río Miño. Nace éste en el Pedregal de Irimia, situado en la sierra de Meira (Lugo), a una altitud de 700 metros aproximadamente. La cuenca del río Miño está caracterizada por la presencia de un Precámbrico esquistoso, localmente cuarcítico, bastante potente y de gran monotonía petrográfica. También está presente un Ordovícico y Silúrico con una modesta diversidad de facies formando parte del dominio de pliegues tumbados (Matte, 1968). La Hoja de Lugo en la que nos encontramos engloba a dos unidades de características litológicas y estructurales muy diferentes conocidas como: la Unidad del Domo de Lugo (zona este) y la Unidad del Olló de Sapo (zona oeste). Nuestra área de estudio se localiza en la primera de ellas (Mapa Geológico de España, Instituto Geológico y Minero de España). La longitud de la cuenca del río Miño es de 315 km, es decir, es un río de tamaño medio. Las cuencas de este tipo pueden dar lugar a inundaciones con puntas de caudales altos en comparación con el caudal medio. Además, son rápidas y hacen complejas las etapas de aviso y preparación para las mismas. El cauce de este río pertenece a la Confederación Hidrográfica Miño-Sil que aglutina, además de la cuenca asociada al río Miño, la cuenca del río Sil y la de la zona española del río Limia. Cuenta con una superficie de aproximadamente 17,715 km² y afecta a una población de 835,000 habitantes de Galicia, Asturias y Castilla y León. Otros cauces destacados de la demarcación son los de los ríos Arnoya, Avia, Bibei y Deva (Real Decreto 125/2007).

El área concreta de estudio se sitúa en la ciudad de Lugo, ubicada en el noroeste de España (Comunidad Autónoma de Galicia) y comprende un área de unos 0.5 km². En la *Figura 6* se muestra la localización de la zona de estudio. En la ortofoto C de la *Figura 6* podemos apreciar la existencia de diferentes infraestructuras y elementos que pueden tener repercusión en la simulación por modificar el régimen de circulación de la masa de agua como, por ejemplo, una pasarela que atraviesa el río Miño (señalada con el número

1 en la *Figura 6-C*), un pequeño azud (señalado con el 2 en la *Figura 6-C*) y el Puente Romano de Lugo (3 en la *Figura 6-C*).

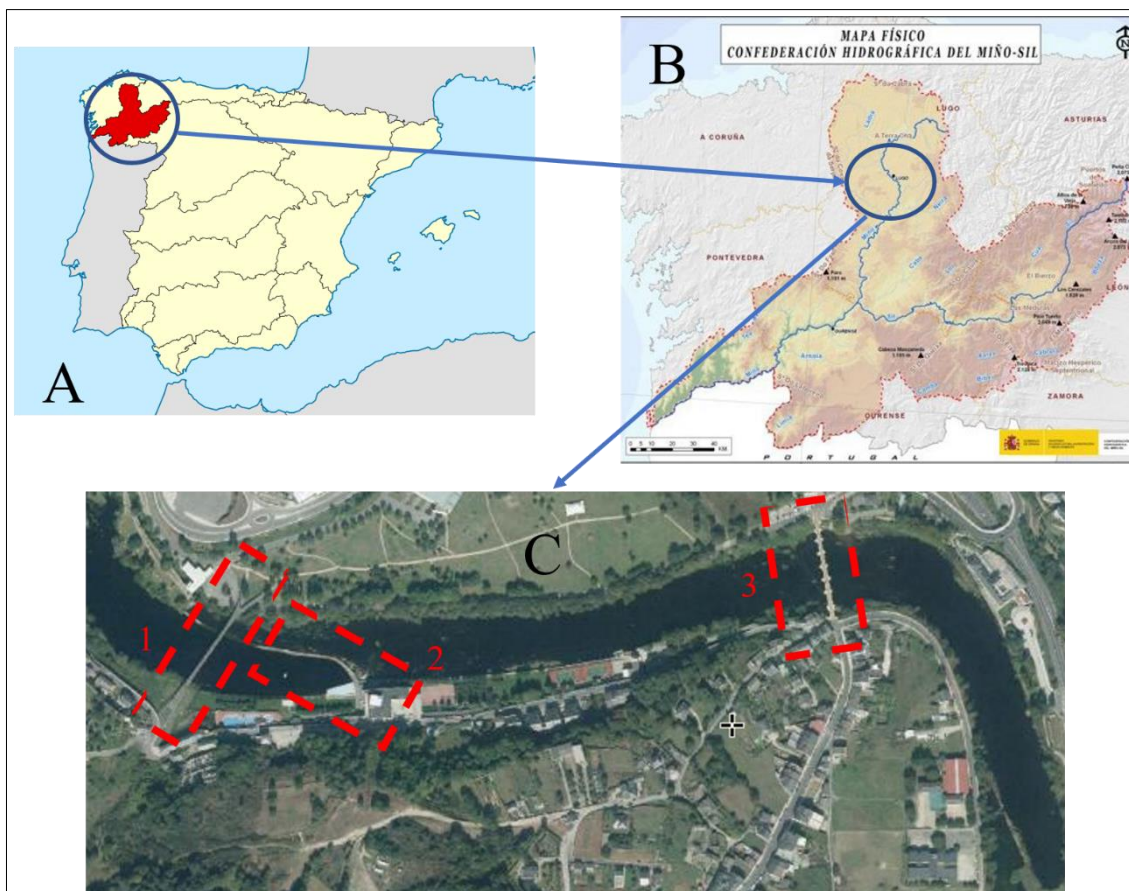


Figura 6. Situación del área de estudio. Situación de la Confederación Hidrográfica Miño-Sil en la Península Ibérica (A); fuente: CHMS. Mapa físico de la Confederación Hidrográfica Miño-Sil (B); fuente: CHMS. Ortofoto de la zona de estudio con infraestructuras que afectan a la simulación (C); fuente: modificación de imagen PNOA cortesía del © Instituto Geográfico Nacional.

La elevada frecuencia con la que se producen inundaciones en la zona y la existencia de infraestructuras importantes en las riberas del río, como pueden ser las instalaciones del Club Fluvial, el Palacio de Ferias y Congresos de Lugo, el Estadio Anxo Carro, el Puente Romano, el Hotel Balneario de Lugo o negocios como puede ser el mesón O Muiño hacen de esta zona un área de estudio de gran interés. Además, el hecho de que la estación de control N001 de la Confederación Hidrográfica Miño-Sil se encuentre escasos kilómetros río arriba facilita la obtención de datos fiables.

En la *Figura 7* se muestra una ortofoto con los nombres de los edificios y construcciones más importantes con el fin de situarlos con facilidad.

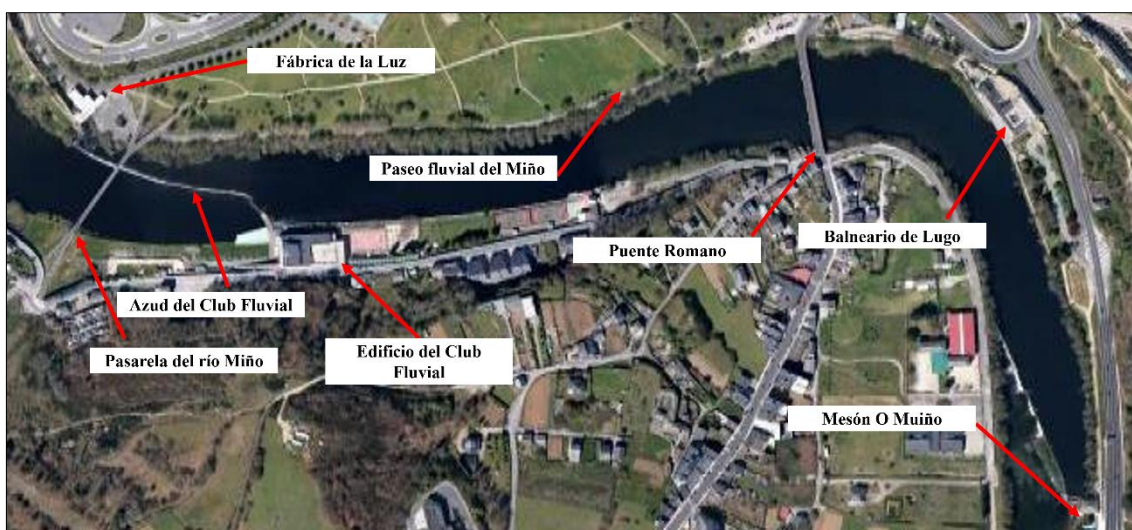


Figura 7. Ortofoto de la zona de estudio con las infraestructuras más destacadas. Fuente: modificación de imagen PNOA cortesía del © Instituto Geográfico Nacional.

2.2. Objetivos.

Las inundaciones originadas por avenidas de ríos son unos fenómenos naturales que pueden afectar de manera importante al medio (natural y social). Además, estas inundaciones pueden traer aparejadas pérdidas económicas elevadas. Es por esto que la capacidad de simular y predecir correctamente dichos fenómenos naturales tiene gran importancia para poder anticiparse a ellos con el fin de garantizar el bienestar de la población y evitar pérdidas económicas. Esto hace que en los últimos años se trabaje de forma continua para mejorar y desarrollar modelos numéricos más fiables.

El presente trabajo tiene como objetivo mostrar la capacidad del programa Iber para reproducir inundaciones fluviales. Para ello se trataron de imitar las inundaciones registradas a finales del mes de enero de 2013 en Lugo (Galicia, España). Con este fin se eligió un área de estudio concreta (zona sur de la ciudad de Lugo), se recopilaron los datos necesarios para realizar la simulación y se llevó a cabo la misma. Finalmente se contrastaron los resultados obtenidos en la simulación numérica con los datos experimentales y evidencias registradas durante el evento real.

3

Metodología

En este capítulo se presentan los parámetros característicos de la dinámica fluvial así como las ecuaciones características del código numérico Iber. Se describen también los principales componentes de Iber.

3.1. Datos y medida de los mismos.

Una de las funciones principales de los ríos radica en el transporte de agua y sedimentos desde la tierra hacia el mar. Estas masas de agua sufren alteraciones en las que el transporte de agua se puede incrementar (crecidas) o disminuir (estiajes). Por esto, cuando queremos entender la ocurrencia de avenidas se hace necesario conocer los parámetros que integran la dinámica fluvial. Tienen especial relevancia el caudal del río, la forma de la cuenca fluvial y el hidrograma (Módulos Universitarios en Ciencia del Desarrollo Sostenible, 2018).

Definimos el caudal como el volumen de agua transportada por un río por unidad de tiempo medido en una sección transversal de su cauce. En unidades del Sistema Internacional se mide en m^3/s . Este caudal puede registrarse tanto de forma instantánea (usualmente cada 5 o 15 min) como promediado (valores diarios o mensuales). En este Trabajo de Fin de Grado se utilizaron datos de caudales proporcionados por el SAIH (Sistema Automático de Información Hidrológica) de la Confederación Hidrográfica Miño-Sil. La red SAIH de la CHMS está formada por una serie de estaciones de control de diferentes tipologías destinadas a captar las diferentes variables hidrológicas e hidráulicas, procesar los datos generados, almacenarlos temporalmente y transmitirlos a sus Puntos de Concentración respectivos o directamente al Centro de Control de Cuenca (CECU).

Las estaciones de control pueden clasificarse en función de su tipología en:

- estaciones de aforo (sección de cauce acondicionada para medición de caudal);
- estaciones de nivel (aforos en sección natural de cauce);

- embalses;
- estaciones de aforo en canales de regadío;
- estaciones pluviométricas;
- estaciones meteorológicas.

La tecnología con la que se miden los diferentes parámetros puede variar de una estación a otra en función de las circunstancias particulares de la misma, es decir, en una estación de aforo o nivel puede ser factible medir el nivel con un sistema de boya y contrapeso y en otra estación, por circunstancias particulares del río, puede requerirse utilizar un sensor piezorresistivo o un radar. En el caso de la estación N001 de la Confederación Hidrográfica del Miño-Sil (río Miño en Lugo), el sensor de nivel con el que está equipada es de tipo piezorresistivo.

Respecto a la medida del caudal, es necesario aclarar previamente que, generalmente, no es una variable de medida directa a través de un sensor, sino que se obtiene indirectamente a partir de una o varias variables de medición más sencillas que sí son medidas directamente mediante un sensor. En la *Figura 8* (izqda.) se muestra un esquema de la estación N001 de la Confederación Hidrográfica Miño-Sil y a la derecha una imagen real.

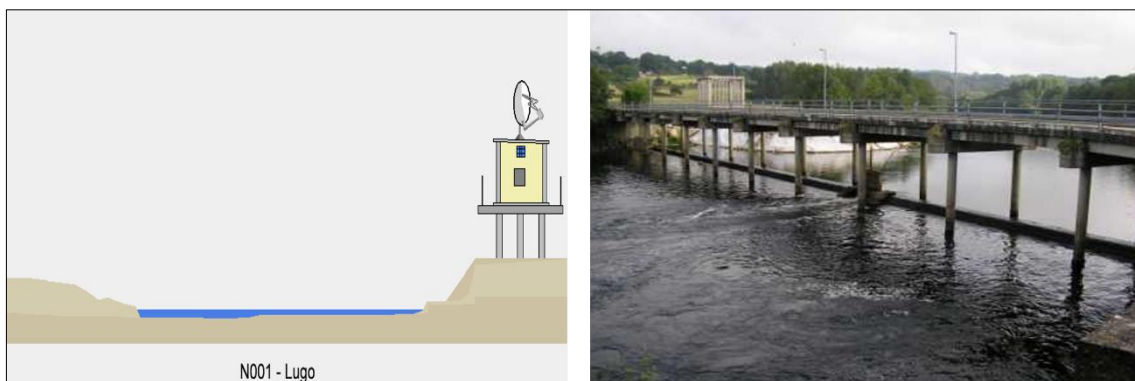


Figura 8. Esquema y fotografía de la ubicación de la estación N001. Fuente: CHMS.

Las variables más comúnmente utilizadas para calcular el caudal son el nivel, nivel y velocidad, nivel y apertura de compuerta. La elección depende en gran medida de las características del punto donde se realiza el control del caudal. En el caso de la estación N001 el caudal es calculado a partir de la medida del nivel del río. La relación que se establece entre las variables directamente medidas (nivel del río en el caso de la estación

N001) y los caudales circulantes a ellas asociadas se denomina curva de gasto. Por tanto, es necesario disponer de la curva de gasto en cada punto de control de la red para conocer el caudal circulante en cada uno de ellos. La curva de gasto con la que se está calculando actualmente el caudal en la estación N001 río Miño en Lugo se muestra en la *Figura 9*.

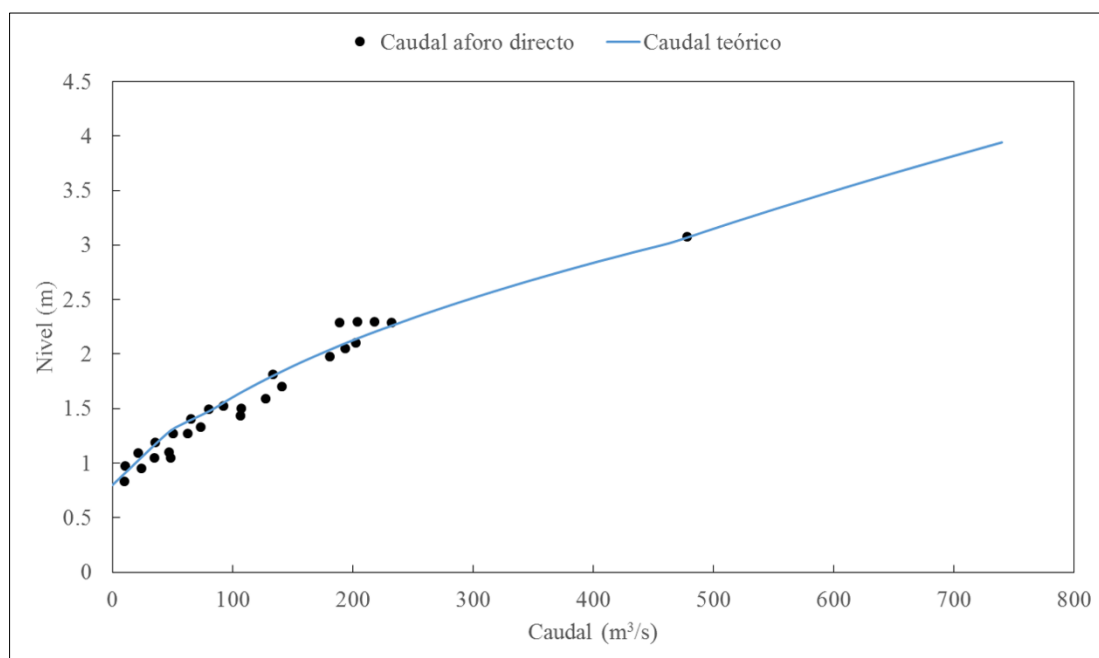


Figura 9. Curva de gasto (línea azul) calculada a partir de las medidas de caudal puntuales o aforos (triángulos). Fuente: CHMS.

El cálculo de una curva de gasto se realiza a partir de medidas directas de caudal (aforo directo) mediante molinetes, ultrasonidos o medidores electromagnéticos. En las *Figuras 10 y 11* se muestran ejemplos de aforos directos de la CHMS. Cada una de estas medidas directas de caudal se relaciona con el nivel del río registrado en el instante de realizar el aforo directo. Es necesario disponer de un número suficiente de aforos directos obtenidos en diferentes condiciones del río para poder obtener la curva de gasto con una precisión adecuada. El conjunto de aforos directos realizados para la obtención de la curva de gasto se denomina campaña de aforos (Confederación Hidrográfica Miño-Sil).

Los aforos directos realizados en el SAIH del Miño-Sil utilizan el método velocidad-área para la medida del caudal puntual. Este método se basa en que, por definición, el caudal de un río es la cantidad de agua, expresada en volumen, que fluye a través de una sección transversal del río por unidad de tiempo. Teniendo esto en cuenta y conociendo el área de una sección del río (S) y la velocidad media de la corriente (V_m)

medida en dicha sección es posible calcular el caudal (Q) en ese punto del río combinando ambas medidas:

$$Q = S \times V_m \quad (1)$$



Figura 10. Medidor electromagnético empleado en el SAIH para la realización de aforos. Fuente: CHMS.



Figura 11. Perfilador acústico doppler empleado en el SAIH para la realización de aforos. Fuente: CHMS.

Otro de los parámetros a tener en cuenta en las inundaciones es el hidrograma, que muestra la variación temporal del caudal que fluye por un río. En inundaciones originadas

por lluvias extremas suele ser comparado con un hietograma, que registra la distribución de precipitaciones en el tiempo. En el caso de estudio, la simulación ha sido realizada usando un caudal obtenido de la estación de control N001. La *Figura 12* muestra un ejemplo tanto de hidrograma (izqda.) como de hietograma (dcha.) del río Miño en la estación N001.

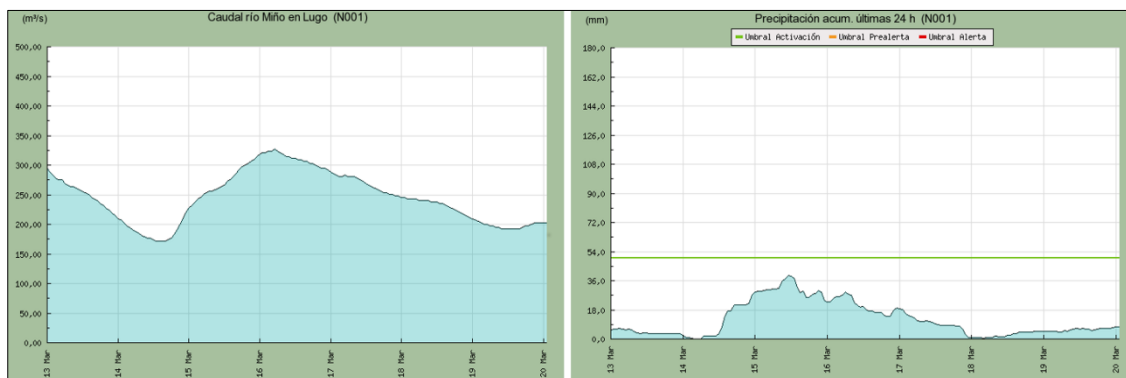


Figura 12. Hidrograma (izqda.) e hietograma (dcha.) registrados por la estación N001 en el período 13-20 de marzo de 2018. Fuente: CHMS.

En cuanto al MDT (Modelo Digital del Terreno) necesario para reproducir la topografía de la zona de estudio con el modelo numérico, fue descargado del Centro de Descargas del Instituto Geográfico Nacional (se seleccionó el de paso de malla de 5 m), cuyo formato es ASCII matriz ESRI (.asc). Las ortofotos de la zona de estudio fueron obtenidas mediante descarga del visor Iberpix, también propiedad del Instituto Geográfico Nacional.

3.2. Código numérico Iber.

3.2.1. Ecuaciones características.

Iber es un modelo matemático bidimensional que simula el flujo en ríos y estuarios. Fue desarrollado gracias a la cooperación de distintos grupos de investigación: el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente (GEAMA, Universidad de A Coruña), el Grupo de Ingeniería Matemática (Universidad de Santiago de Compostela), el Instituto Flumen (Universidad Politécnica de Catalunya) y el Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria. Participó también en su desarrollo el Centro de

Estudios Hidrográficos del CEDEX. Fue promovido directamente desde las administraciones públicas españolas en colaboración con los grupos anteriores con el fin de ser útil a las necesidades técnicas de las confederaciones hidrográficas en la aplicación de legislación fluvial (Bladé *et al.*, 2014).

Iber se desarrolló a partir de dos programas de modelización numérica: el Turbillón y CARPA. Por un lado, el modelo Turbillón fue desarrollado por el grupo GEAMA y se caracteriza por la incorporación de distintos modelos de turbulencia; por otro lado, el modelo CARPA fue desarrollado por el grupo Flumen y se caracteriza por la capacidad de una modelización integrada 1D y 2D. Iber consta de distintos módulos de cálculo. En la primera versión incluía un módulo hidrodinámico, uno de turbulencia y uno de transporte de sedimentos, pero en las posteriores fueron incluyendo otros como el de calidad de aguas.

En el modelo hidrodinámico de Iber se resuelven las ecuaciones de St. Venant bidimensionales teniendo en cuenta los efectos de la turbulencia y del rozamiento superficial debido al viento. Las ecuaciones de St. Venant se muestran en las Eqs. (2), (3) y (4).

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} = 0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(h U_x) + \frac{\partial}{\partial x}\left(h U_x^2 + g \frac{h^2}{2}\right) + \frac{\partial}{\partial y}(h U_x U_y) = -gh \frac{\partial Z_b}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x}\left(v_t h \frac{\partial U_x}{\partial x}\right) + \\ \frac{\partial}{\partial y}\left(v_t h \frac{\partial U_x}{\partial y}\right) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(h U_y) + \frac{\partial}{\partial x}(h U_x U_y) + \frac{\partial}{\partial y}\left(h U_y^2 + g \frac{h^2}{2}\right) = -gh \frac{\partial Z_b}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x}\left(v_t h \frac{\partial U_y}{\partial x}\right) + \\ \frac{\partial}{\partial y}\left(v_t h \frac{\partial U_y}{\partial y}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

En estas ecuaciones h es el calado, U_x y U_y son las velocidades horizontales promediadas en profundidad, g es la gravedad, ρ es la densidad del agua, Z_b la cota de fondo, τ_s es la fricción de la superficie libre debida al rozamiento provocado por el viento, τ_b es la fricción relacionada con el rozamiento del fondo y v_t es la viscosidad turbulenta. Para evaluar la fricción de fondo se utiliza la fórmula de Manning, expresada como:

$$\tau_{b,x} = \rho g h \frac{n^2 U_x |U|^2}{h^3} \quad \tau_{b,y} = \rho g h \frac{n^2 U_y |U|^2}{h^3} \quad (5)$$

Para calcular la fuerza de rozamiento debida al viento sobre la superficie libre se usa la velocidad del viento a 10 m de altura. De esta manera, la ecuación de Van Dorn se escribe como:

$$\tau_{s,x} = \rho C_{VD} |V_{10}| V_{x,10} \quad (6)$$

$$\tau_{s,y} = \rho C_{VD} |V_{10}| V_{y,10} \quad (7)$$

donde $V_{x,10}$ y $V_{y,10}$ son las dos componentes de la velocidad del viento a 10 m de altura, $|V_{10}|$ es el módulo de la velocidad del viento a esa altura y C_{VD} es un coeficiente de arrastre superficial calculado teniendo en cuenta la velocidad del viento usando la siguiente expresión:

$$|V_{10}| < 5.6 \frac{m}{s} \rightarrow C_{VD} = 1.2 \cdot 10^{-6} \quad (8)$$

$$|V_{10}| \geq 5.6 \frac{m}{s} \rightarrow C_{VD} = 1.2 \cdot 10^{-6} + 2.25 \cdot 10^{-6} \left(1 - \frac{5.6}{|V_{10}|}\right)^2 \quad (9)$$

Es importante tener en cuenta que todos los parámetros y funciones que aparecen en las ecuaciones hidrodinámicas (incluidos la velocidad del viento y el coeficiente de Manning) pueden ser impuestas en Iber de manera variable tanto temporal como espacialmente.

La viscosidad turbulenta es calculada a partir modelos de turbulencia concretos para las ecuaciones de aguas someras promediadas en profundidad. En Iber se distinguen tres modelos de turbulencia: el modelo de longitud de mezcla, el modelo $k-\varepsilon$ de Rastogi y Rodi y el modelo parabólico.

En el modelo de longitud de mezcla para aguas someras, la viscosidad turbulenta se calcula mediante la siguiente expresión:

$$v_t = [\min(0.267\kappa h, \kappa d_{wall})]^2 \sqrt{2S_{ij}S_{ij} + \left(2.34 \frac{u_f}{\kappa h}\right)^2} S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (10)$$

en la cual $k=0.41$ es la constante de von Karman y d_{wall} es la distancia desde el punto considerado a la pared más cercana. El modelo $k-\varepsilon$ de Rastogi y Rodi resuelve una ecuación de transporte para la energía cinética turbulenta k y para la tasa de disipación de energía turbulenta ε :

$$\frac{dk}{\partial t} + \frac{\partial U_x k}{\partial x} + \frac{\partial U_y k}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(v + \frac{v_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + 2v_t S_{ij} S_{ij} + c_k \frac{u_f^3}{h} - \varepsilon \quad (11)$$

$$\frac{d\varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial U_x \varepsilon}{\partial x} + \frac{\partial U_y \varepsilon}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(v + \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + c_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} 2v_t S_{ij} S_{ij} + c_\varepsilon \frac{u_f^4}{h^2} - c_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (12)$$

$$v_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad c_k = c_f^{-1/2} \quad c_\varepsilon = 3.6 c_k^{3/2} c_{e2} c_\mu^{1/2} \quad c_f = \frac{\tau_b}{\rho} \frac{1}{|U|^2} \quad (13)$$

Las constantes de las Eqs. (10), (11) y (12) se muestran a continuación:

$$c_\mu = 0.09 \quad c_{\varepsilon 1} = 1.44 \quad c_{\varepsilon 2} = 1.92 \quad \sigma_k = 1.0 \quad \sigma_\varepsilon = 1.31$$

En el modelo parabólico la viscosidad turbulenta se calcula como:

$$v_t = 0.068 u_f h \quad u_f = \sqrt{\tau_b / \rho} \quad (14)$$

siendo u_f la velocidad de fricción de fondo. Usando la fórmula de Manning para hallar la fricción de fondo se obtiene la siguiente expresión para la viscosidad turbulenta:

$$v_t = 0.068 \sqrt{gn} |U| h^{5/6} \quad (15)$$

3.2.2. Condiciones de contorno implementadas en el modelo.

El programa Iber diferencia entre contornos cerrados (tipo pared) y contornos abiertos por los que puede entrar o salir la masa de agua del dominio de cálculo. Cuando trabajamos con contornos cerrados hay la posibilidad de imponer una condición de deslizamiento libre o una de fricción de pared. Con la primera de las condiciones no se tiene en cuenta el rozamiento debido a los contornos sobre el fluido. En el caso de que el efecto de rozamiento debido al contorno pueda ser importante se debe recurrir a la condición de contorno tipo fricción. Así, para expresar la velocidad tangencial a la pared se usa una función de la velocidad de fricción de pared (u^*) y de la distancia a la pared:

$$|U| = \frac{u^*}{0.4} \ln \left(E \cdot \frac{du^*}{v} \right) \quad (16)$$

donde d es la distancia en perpendicular a la pared y E es un parámetro cuyo valor depende de las características del flujo. Para calcular E habrá que considerar condiciones de flujo turbulento liso, rugoso o transición entre los dos.

En el caso de los contornos abiertos, habrá que considerar distintas alternativas teniendo en cuenta el régimen hidráulico en el contorno. En la entrada se determina el caudal y se asume que el contorno es perpendicular a la dirección del flujo. Si el flujo entra en régimen supercrítico, deberá imponerse el calado. A lo largo del contorno, la distribución del caudal unitario se lleva a cabo de manera proporcional al calado en cada punto del mismo; la expresión que lo rige es: $qn = C h^{5/3}$, donde C es una constante que asegura que la integral del caudal unitario qn a lo largo del contorno considerado es igual al caudal total de entrada.

Cuando nos referimos a los contornos de salida, habrá que imponer el nivel de la lámina de agua en caso de estar ante un régimen subcrítico. Si el régimen es supercrítico no hay que imponer condiciones. Puede considerarse la introducción de una relación de curva de gasto que relacione la cota de lámina de agua y caudal específico que se desagua en cada punto considerado. También puede definirse un contorno abierto tipo marea. En este caso la cota de lámina de agua varía con el tiempo (Bladé *et al.*, 2014).

3.2.3. Condiciones internas implementadas en el modelo.

Las condiciones internas son útiles para modelar el comportamiento de estructuras hidráulicas como vertederos, compuertas o puentes. Estas estructuras no se pueden modelizar por medio de las ecuaciones de St. Venant por lo que como método alternativo se calcula la relación entre caudal y pérdida de carga producida en estas estructuras con ecuaciones específicas. En el programa hay condiciones internas de flujo bajo compuerta y sobre vertedero en lámina libre. Combinando estas dos condiciones anteriores se calcula el flujo a través del tablero de puente, siendo el caudal total desaguado la suma del caudal bajo compuerta y sobre vertedero.

3.2.4. Frente seco-mojado.

Cuando simulamos flujos, como el movimiento del agua en un lecho seco o una inundación, debemos tener en cuenta los frentes de seco mojado. La definición del frente seco-mojado determina el instante en el cual una celda del dominio numérico pasa de estar seca a mojada o viceversa. Así, para obtener resultados de calidad es necesario tratar adecuadamente el movimiento de estas fronteras (Brufau *et al.*, 2000).

Pongámonos en el caso de que la celda C_i estuviese mojada y la C_j seca. Las condiciones impuestas en el frente de seco mojado son dos; la primera está relacionada con la redefinición de la pendiente del fondo en la que la variación $\Delta z_{b,ij}$ es redefinida como

$$\Delta z_{b,ij} = \begin{cases} h_i - h_j & \text{si } h_j > \varepsilon_{sm} \text{ y } h_i - h_j < z_{b,j} - z_{b,i} \\ z_{b,j} - z_{b,i} & \text{en otro caso,} \end{cases} \quad (17)$$

en la cual el parámetro ε_{sm} permite diferenciar entre la situación seca o mojada de una celda. La segunda de las condiciones es de reflexión. En general, cuando la velocidad de la celda mojada es distinta de cero, dicha condición establece la media de la descarga normal unitaria en el frente seco mojado como cero al calcular el flujo. En la *Figura 13* se muestran casos en los que es necesario redefinir la pendiente de fondo imponiendo la condición de reflexión y cuando no es necesario hacerlo (González- Aguirre *et al.*, 2016).

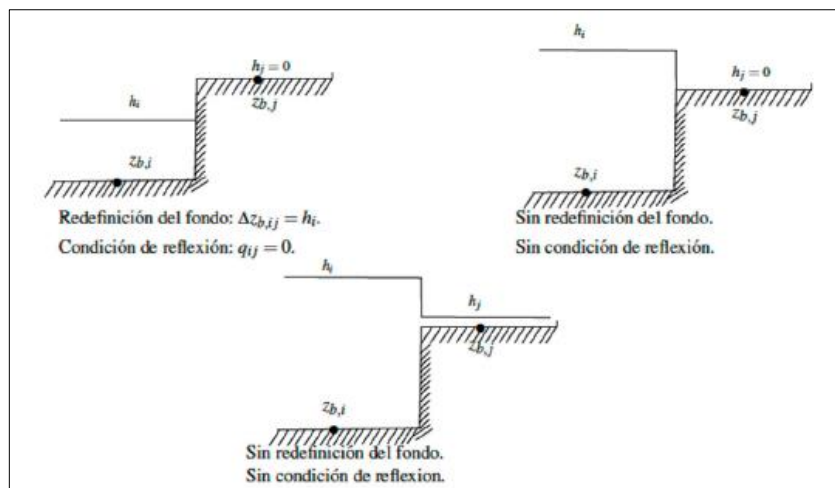


Figura 13. Configuraciones frentes seco-mojado. Fuente: González- Aguirre et al., 2016.

3.2.5. Interfaz de preproceso y posproceso.

En un programa de simulación numérica como Iber es muy importante la interfaz que nosotros apreciamos, ya que es la manera de transmitir tanto los datos de entrada como los resultados entre el propio código y el usuario. Además, estando ante un programa en dos dimensiones resulta imprescindible una herramienta que permita gestionar de forma sencilla el elevado volumen de datos tanto de entrada como de salida.

La interfaz de Iber fue desarrollada en base al programa GiD (desarrollado por el CIMNE), que con su preproceso y postproceso aportó a Iber muchas de las capacidades de las que éste dispone. Una de las herramientas de preproceso específicas para Iber es la que permite importar un archivo georreferenciado de los usos del suelo y su asignación automática (Bladé *et al.*, 2014) así como el tratamiento de ficheros ráster con los modelos digitales del terreno.

Al llevar a cabo simulaciones fluviales debemos prestar especial atención a la generación de mallas, ya que la utilización de una u otra hará variar los resultados finales. Dado que un río es un elemento con geometría irregular, no es fácil elegir y decidir correctamente el tipo de malla a utilizar. Es conveniente utilizar mallas irregulares para conseguir transiciones lo más suaves posibles creando el menor número de elementos. Iber incorpora las opciones habituales de mallado del programa GiD, como pueden ser la utilización de mallas estructuradas, no estructuradas o las basadas en triángulos o cuadriláteros, pero también posee algunas específicas con relación más estrecha con la hidráulica fluvial.

En los casos en que nos enfrentamos a situaciones en las que las superficies son relativamente suaves, existe la posibilidad de importar el MDT como una única superficie considerada como entidad NURBS (Non Uniform Rational B-Splines). Pero cuando el terreno es irregular, probablemente no sea posible la representación como NURBS, teniendo que echar mano de la creación geométrica en formato RTIN (Regular Triangular Irregular Network).

Como en la mayoría de los códigos de simulación numérica la estructura del proceso de simulación se dividirá en preproceso (*Figura 14*), proceso (*Figura 15*) y postproceso (*Figura 16*). Durante el preproceso se define la geometría, las condiciones internas y de contorno, los usos del suelo, la malla y se seleccionan los parámetros de cálculo. Posteriormente, Iber calcula durante un tiempo que varía dependiendo de la capacidad computacional de cada ordenador y de la complejidad del caso. Finalmente, mediante el postproceso podremos visualizar los resultados que nos interesen.

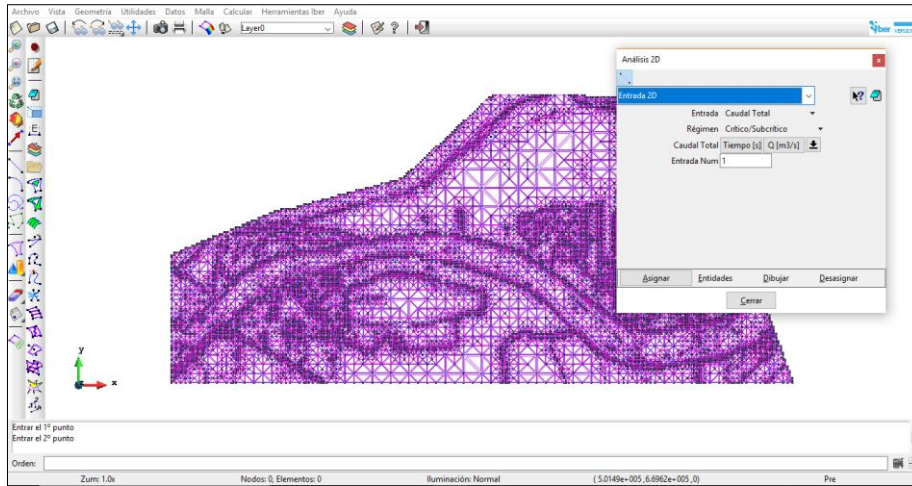


Figura 14. Vista de la geometría y condiciones de contorno pertenecientes al preproceso.

Información de salida para 'current'

NUMERICAL SCHEME: Roe 1st Order

Initial volume: 13.99 m3

Simulation time	Time step	Time	Qin	Qout
0.000	1.00000	13:14:44:61	0.000	0.000
60.176	0.56669	13:14:45:04	29.704	0.000
120.672	0.74508	13:14:45:48	49.643	0.000
180.375	0.66484	13:14:45:94	69.378	0.000
240.337	0.62273	13:14:46:47	88.644	0.000
300.230	0.54632	13:14:46:95	109.062	0.000
360.453	0.51170	13:14:47:42	128.981	0.000
420.070	0.49320	13:14:47:92	148.694	0.000
480.075	0.47714	13:14:48:44	168.534	0.000
540.186	0.46608	13:14:48:97	188.407	0.000
600.154	0.45415	13:14:49:52	208.149	0.000
660.279	0.44696	13:14:50:05	227.636	0.000
720.383	0.43825	13:14:50:63	247.982	0.000
780.268	0.41579	13:14:51:19	267.784	0.000
840.183	0.42101	13:14:51:77	287.588	0.000
900.126	0.41231	13:14:52:38	307.405	0.000
960.079	0.40710	13:14:53:00	327.225	0.000
1020.087	0.40067	13:14:53:66	347.063	0.000
1080.153	0.15591	13:14:54:42	366.999	0.000
1140.094	0.36951	13:14:55:13	386.742	0.000
1200.316	0.38526	13:14:55:78	406.644	0.000
1260.262	0.38104	13:14:56:47	426.461	0.000

Cerrar

Figura 15. Ventana de cálculo de Iber.

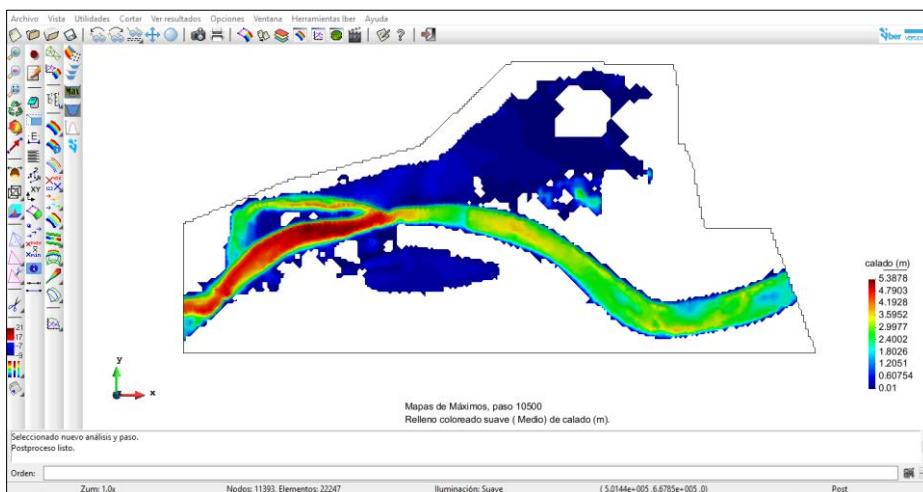


Figura 16. Vista de los resultados (calado) pertenecientes al posproceso.

3.2.6. Parámetros de simulación.

Todos los parámetros necesarios para llevar a cabo la simulación se introducen durante la etapa de preproceso. Para el caso de estudio de este TFG resulta necesario afirmar que se llevaron a cabo varias simulaciones variando los parámetros de tiempo, tipo de malla, esquema numérico elegido para calcular, etc. hasta elegir el que más coherente resultó. En los siguientes apartados se muestran los valores de los parámetros necesarios para la realización de las simulaciones numéricas.

3.2.6.1. Parámetros de tiempo.

En este caso, después de llevar a cabo un análisis de sensibilidad, se dedujo que una hora y media de duración era suficiente para que los resultados de la simulación dejaran de fluctuar y fuesen casi constantes. El tiempo máximo de simulación resulta suficiente y equilibrado entre la exigencia de cálculo y la estabilidad de la misma. Así, se emplearon los valores mostrados en la *Tabla 4*.

Tabla 4. Parámetros de tiempo.

Instante inicial (s)	0
Tiempo máximo de simulación (s)	5,400
Intervalo de resultados (s)	60
Incremento de tiempo máximo (s)	1

3.2.6.2. Datos generales de la simulación.

Se utilizaron los valores mostrados en la *Tabla 5*:

Tabla 5. Parámetros generales de la modelización.

Número de procesadores	1
Esquema numérico	Primer orden
CFL	0.45
Límite Seco-Mojado (m)	0.001
Método de secado	Por defecto
Condición de Courant estricta	Desactivada
Fricción en las paredes	Coefficiente de Manning
Rugosidad paredes	0.001
Velocidad molecular (m²/s)	0.000001
Llenar sumideros	No

3.2.6.3. Malla.

Se creó un RTIN (Regular Triangular Irregular Network) con las características especificadas en la *Tabla 6*.

Tabla 6. Características de la malla.

Forma elementos	Triangular
Longitud característica de elementos (m)	2
Número de nodos	122,951
Número de elementos	243,846

3.2.6.4. Rugosidad.

Se empleó la metodología de Chow (1988) y se adoptaron los valores mostrados en la *Tabla 7*. En la *Figura 17* se muestra su distribución dentro de la zona de estudio.

Tabla 7. Usos del suelo con su valor n.

TIPO	n de Manning
Río	0.025
Pradera	0.05
Arbustos	0.05
Árboles	0.12
Vegetación urbana	0.032
Vegetación dispersa	0.08
Hormigón	0.018
Infraestructura	0.020
Residencial	0.15

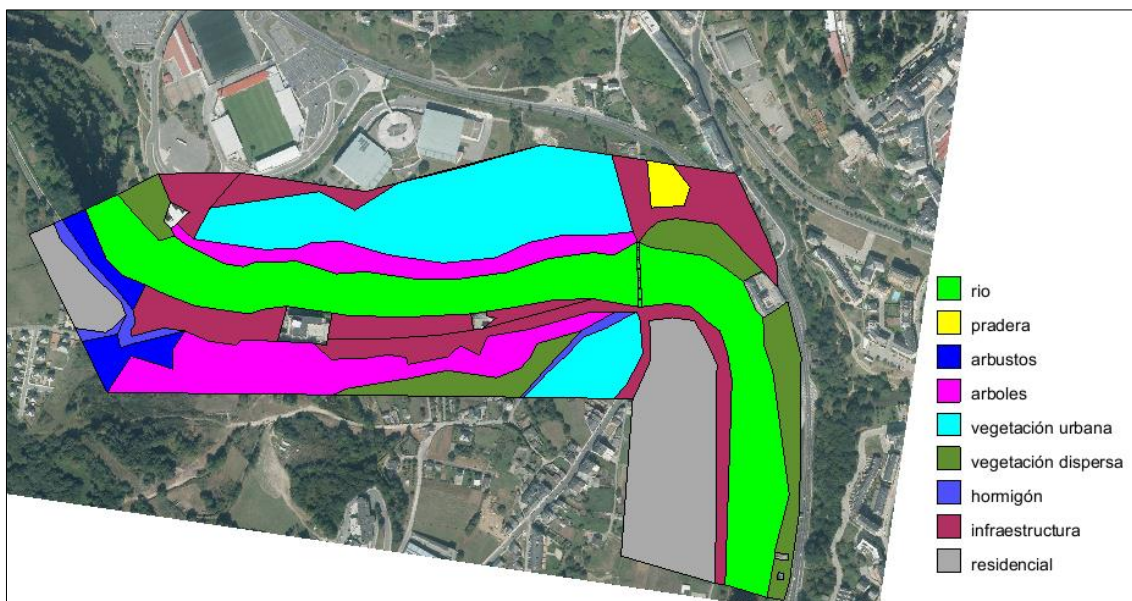


Figura 17. Distribución de los usos de suelo en la zona de estudio.

3.2.6.5. Condiciones iniciales.

Dependiendo del día que se considere, las condiciones iniciales sufren variaciones, ya que el nivel de agua medido en la estación difiere de un día a otro. De esta manera, teniendo en cuenta que el día escogido para realizar la simulación ha sido el 19/01/2013, la cota de agua definida como condición inicial fue de 364.12 metros. Ésta se definió en las superficies correspondientes al cauce del río y a la zona entre los pilares del Puente Romano. En la *Figura 18* se muestra la condición inicial definida en el dominio de la simulación.



Figura 18. Condición inicial de la simulación.

El valor definido como condición inicial se obtuvo a partir de los valores medios diarios de nivel de agua proporcionados por la CHMS para el sensor N001. Teniendo en cuenta que este sensor se encuentra aproximadamente a unos 3.9 km aguas arriba de la zona de estudio (*Figura 19*), fue necesario corregir sus lecturas considerando el desnivel del cauce desde la localización del sensor hasta la zona de estudio. Este desnivel se estimó, de forma aproximada, por medio de mapas topográficos y los ficheros ráster.

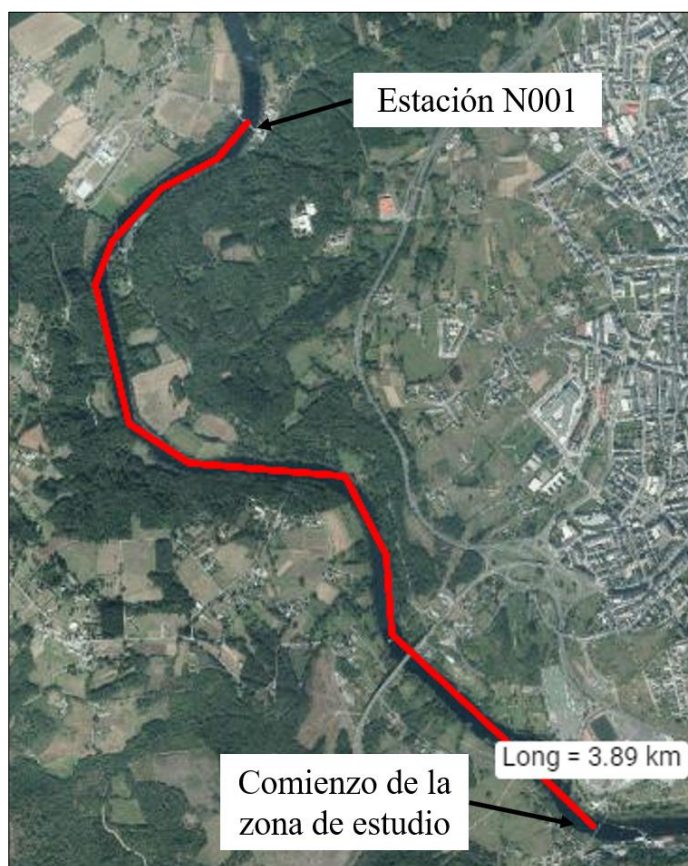


Figura 19. Distancia entre la localización de la estación N001 (río arriba) y el comienzo de la zona de estudio. Fuente: modificación de imagen PNOA cortesía del © Instituto Geográfico Nacional.

3.2.6.6. Condiciones de contorno.

Se introdujeron las siguientes condiciones de contorno:

-De entrada:

Se introdujo un valor de caudal total de $844 \text{ m}^3/\text{s}$ en régimen crítico/subcrítico. La zona de entrada se observa marcada de color verde. Este valor de caudal se obtuvo a partir de los datos proporcionados por la CHMS.



Figura 20. Situación de la condición de entrada en la zona de estudio.

-De salida:

Se delimitó como condición de salida en la zona más baja de la topografía la opción de calado Crítico/Supercrítico. Fue colocada varios cientos de metros aguas abajo de la zona de entrada para que hubiese tiempo suficiente para que el calado pudiese estabilizarse y adoptar un estado de estabilidad. Además, seleccionando una zona tan amplia se evita la posible acumulación de masas de agua en la simulación.



Figura 21. Situación de la condición de salida en la zona de estudio.

4

Resultados y discusión

4.1. Criterios de elección del día de estudio.

Durante los últimos días del mes de enero de 2013, la comunidad gallega sufrió los efectos de una serie de temporales que también afectaron a otras zonas de España. Según Cadena Ser, las fuertes precipitaciones que cayeron sobre la provincia de Lugo hicieron que el caudal de río Miño subiese dos metros en aproximadamente veinticuatro horas, lo que provocó importantes inundaciones en su ribera al paso por la ciudad de Lugo y obligó a suspender las clases en el Colegio de A Ponte (situado al lado del Club Fluvial), dado que los accesos al centro quedaron cortados a causa del agua.

Según información del servicio de Protección Civil, las crecidas ocurridas a finales de enero de 2013 fueron las más grandes de la última década, no habiéndose registrado caudales mayores desde el año 2003. La estación de control N001 cuyos datos fueron utilizados para la realización de este documento, confirmó que el nivel del río subió hasta los 4.3 metros.

Tan grande temporal hizo que la cantidad de precipitación acumulada durante esas fechas fuese muy elevada dando lugar a incrementos de los niveles de los ríos y, en determinadas zonas, a inundaciones. Según la web de Meteogalicia, la precipitación media diaria de enero de 2013 fue de 7.3 mm, mientras que el valor de precipitación registrada durante el día 18 de enero de ese mismo año fue de 54.2 mm. La documentación gráfica de dichas inundaciones (vídeos y fotografías) recogida en distintos soportes como prensa escrita o internet es muy amplia.

Las evidencias que se usaron en este Trabajo de Fin de Grado para comparar con los resultados obtenidos con Iber fueron recogidas en la localidad de Lugo durante el transcurso del día 19 de enero de 2013.

4.2. Resultados.

En primer lugar, es importante mostrar los mapas de calado máximo obtenidos en la zona de estudio con el fin de determinar qué lugares se inundan y la altura de la lámina de agua en dichas zonas. También es interesante estudiar el mapa de velocidades con el fin de saber en qué zonas es mayor el módulo de la misma y por lo tanto poder determinar dónde se pueden producir arrastres de objetos con más facilidad.

En la *Figura 22* se puede comprobar que los calados menores se obtienen, como era de esperar, en los márgenes del río. En la zona central del cauce fluvial (sobre todo en la zona de caída del agua del pequeño azud indicada con el número 1) se alcanza una lámina de agua muy elevada, de hasta 5.15 metros. En contraposición, en la zona de agua embalsada por el azud (señalada con el 2) se alcanzan los 4 metros. En cuanto a los lugares con menor lámina de agua, afirmar que se encuentran aguas abajo del Puente Romano, en la zona del cauce paralela a la Nacional VI (indicada con el 3).

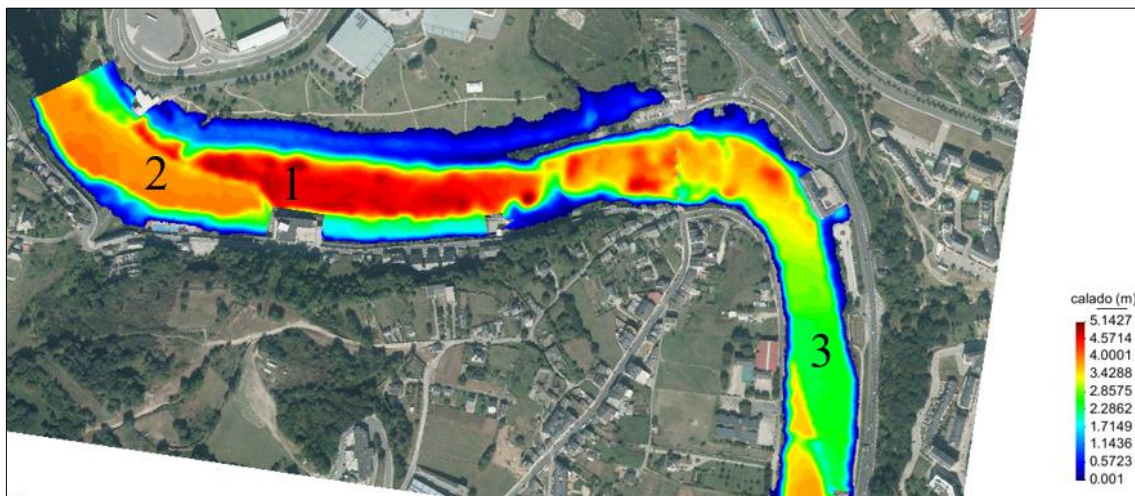


Figura 22. Mapa de calados máximos de toda la zona estudiada.

En la *Figura 23* se puede ver que las zonas en las que el módulo de la velocidad es máximo se encuentran dispersas por el cauce debido, probablemente, a irregularidades del fondo del río. Destaca el efecto producido en las salidas de agua del Puente Romano (señalado con el rectángulo rojo), donde las zonas de color más frías corresponden a la “zonas muertas” que respaldan los pilares. Además, como se puede comprobar en el detalle de la *Figura 23*, en las zonas existentes entre los pilares del puente el agua se

acelera debido al estrechamiento del área de paso. Es por esto que el efecto de los pilares del puente debe ser tenido en cuenta.

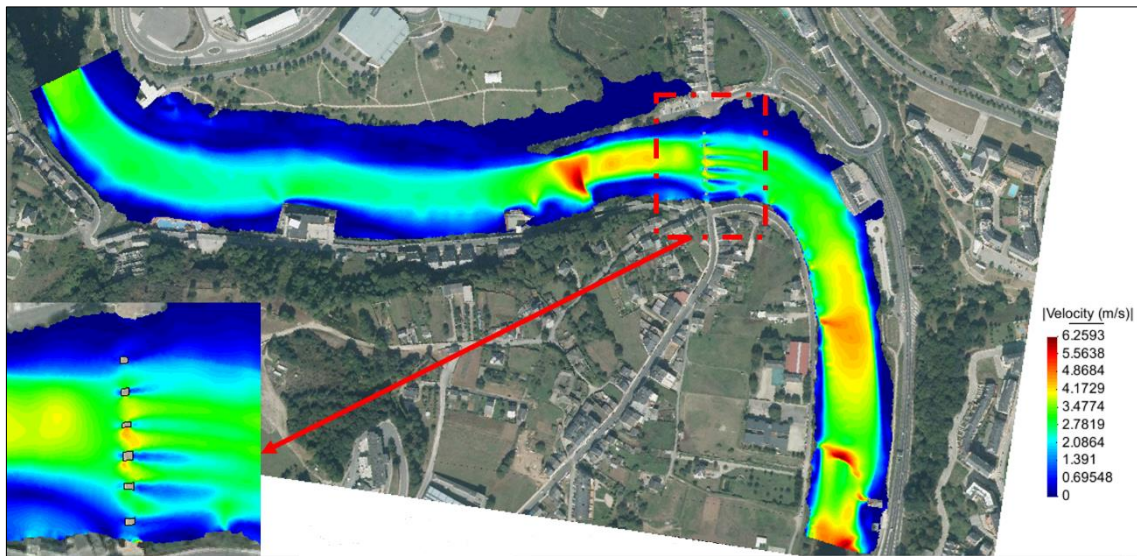


Figura 23. Mapa de velocidades máximas de toda la zona estudiada.

En la *Figura 24* se muestra el mapa de cotas máximas de agua alcanzadas durante la simulación. Se puede comprobar que la cota máxima alcanzada en las inmediaciones del Puente Romano es, aproximadamente, igual a 366 m. Mediante medidas realizadas con GPS se comprobó que la cota del Puente Romano es de unos 370 m por lo que se puede considerar que el puente no entre en carga durante toda la simulación.

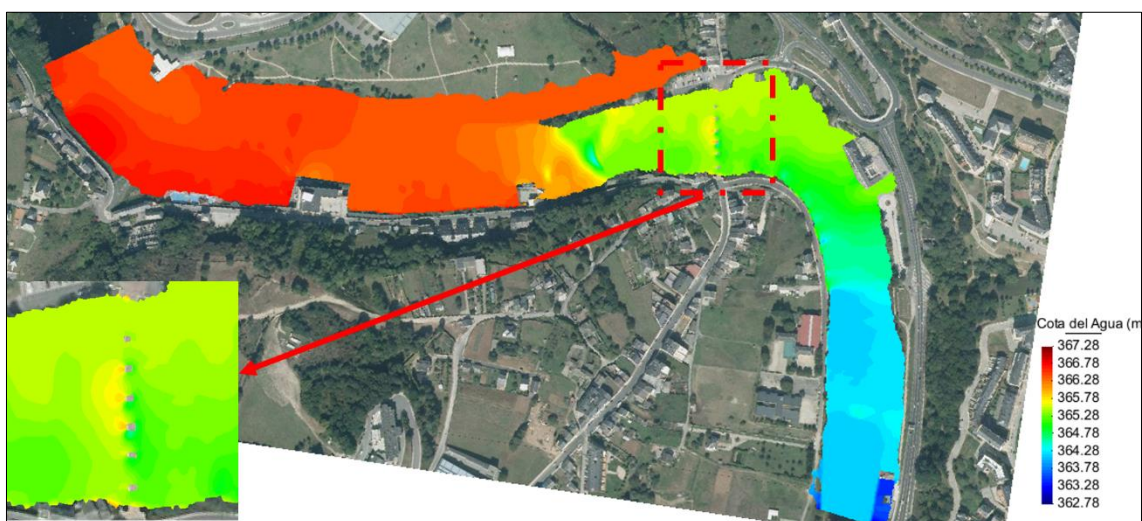


Figura 24. Mapa de cota máxima alcanzada en la zona de estudio.

En las *Figuras 25, 26 y 27* se muestran las imágenes de la zona de estudio el día 01/05/2018 y el día 19/01/2013. A la izquierda se muestra la situación “normal” con un caudal de $45.09 \text{ m}^3/\text{s}$ y a la derecha las imágenes correspondientes al día de la inundación. Gracias a estas imágenes podemos darnos cuenta de la magnitud de la inundación y sirven para realizar un contraste general antes de entrar en comparaciones más detalladas.



Figura 25. Fotografía del Club Fluvial tomada el día 01/05/2018 (izqda.) y fotografía de la misma zona inundada tomada el 19/01/2013 (dcha.), cuya fuente es [Vídeo1].

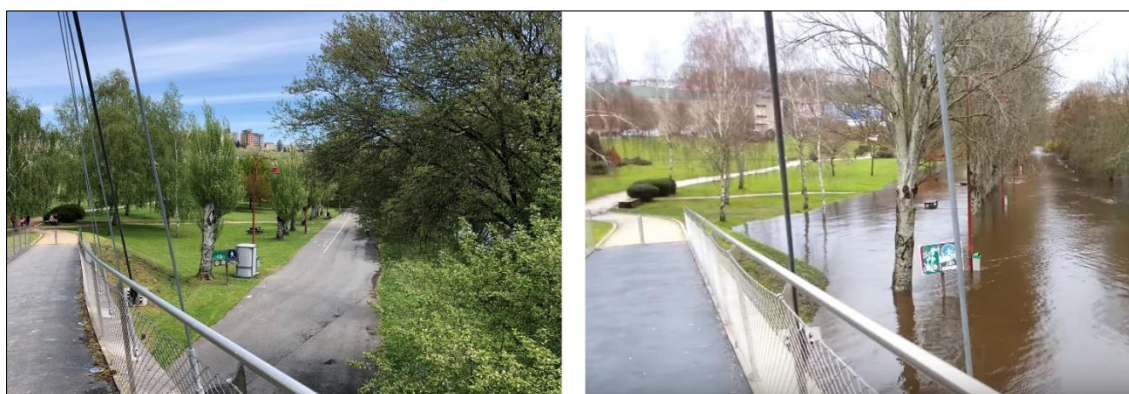


Figura 26. Fotografía del Paseo Fluvial tomada el día 01/05/2018 (izqda.) y fotografía de la misma zona inundada tomada el 19/01/2013 (dcha.), cuya fuente es [Vídeo2].



Figura 27. Fotografía del mesón O Muiño tomada el día 01/05/2018 (izqda.) y fotografía de la misma zona inundada tomada el día 19/01/2013 (dcha.), cuya fuente es [Vídeo3].

Las imágenes mostradas en las Figuras 25, 26 y 27 nos sirven para hacernos una idea general de la magnitud y la importancia del fenómeno de inundación que estamos tratando de reproducir. A continuación se mostrará un estudio más detallado de algunos puntos de control de zonas inundadas durante el evento de estudio. En la Figura 28 se muestra el mapa general de localización de los puntos de control analizados.



Figura 28. Ortofoto de la zona de estudio con las Figuras 29-37 localizadas. Con flechas rojas se indican los puntos de control concretos donde se estudió el calado. Fuente: modificación de imagen PNOA cortesía del © Instituto Geográfico Nacional.

Cada una de las figuras en las que se analizan los resultados obtenidos en cada punto de control (*Figuras 29, 30, 31, 32 y 33*) se divide en cuatro imágenes menores que son:

1. Imagen (A): en la parte superior izquierda. Se muestra la fotografía tomada en enero de 2013 durante el evento real;
2. Imagen (B): en la parte superior derecha. Se muestra el mapa de calado obtenido con Iber en la zona mostrada en la imagen (A).
3. Imagen (C): en la parte inferior izquierda. Se muestra la ortofoto de la zona de control junto con dirección del corte transversal para análisis de cota de agua.
4. Imagen (D): en la parte inferior derecha. Se muestra la cota de agua y topografía obtenida con el corte transversal mostrado en la imagen (C).

La *Figura 29* indica que el agua cubre totalmente el cimientado que soporta el tirante de la pasarela del río Miño (A). En la imagen (C) se puede comprobar que dicho elemento coincide aproximadamente con la cuarta escalera que baja a la pasarela señalada con el círculo rojo. La imagen (B) muestra que la zona inundada obtenida con Iber llega hasta la zona del tirante. El corte transversal (D) nos permite hacernos una idea de cómo es la topografía bajo la lámina de agua.

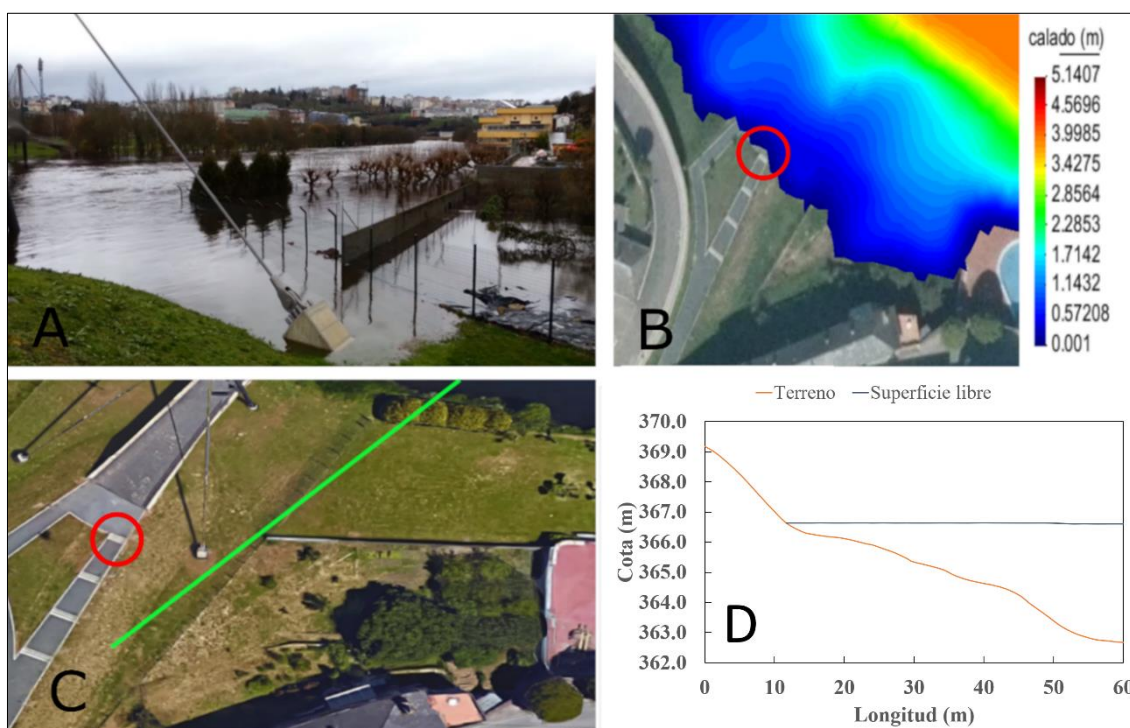


Figura 29. Fotografía tomada el 19/01/2013 (A) cuya fuente es [Vídeo1]; mapa de calado obtenido con Iber del pilar derecho del tirante de la pasarela (B); ortofoto con el corte transversal señalado en verde (C) obtenida de Google Earth y resultados de topografía y cota de agua en el corte transversal (D).

En la imagen (A) de la *Figura 30* se puede observar que el agua sobrepasa ligeramente el pilar izquierdo del tirante de la pasarela (círculo rojo). Mediante la línea de referencia roja y a trazos definida en (B) y (C) se puede comprobar que el calado de agua obtenido con Iber, mostrado en (B), es aproximadamente el mismo que el observado durante el evento real. Gracias al corte transversal (D) vemos cómo se comporta la lámina de agua en esa zona.

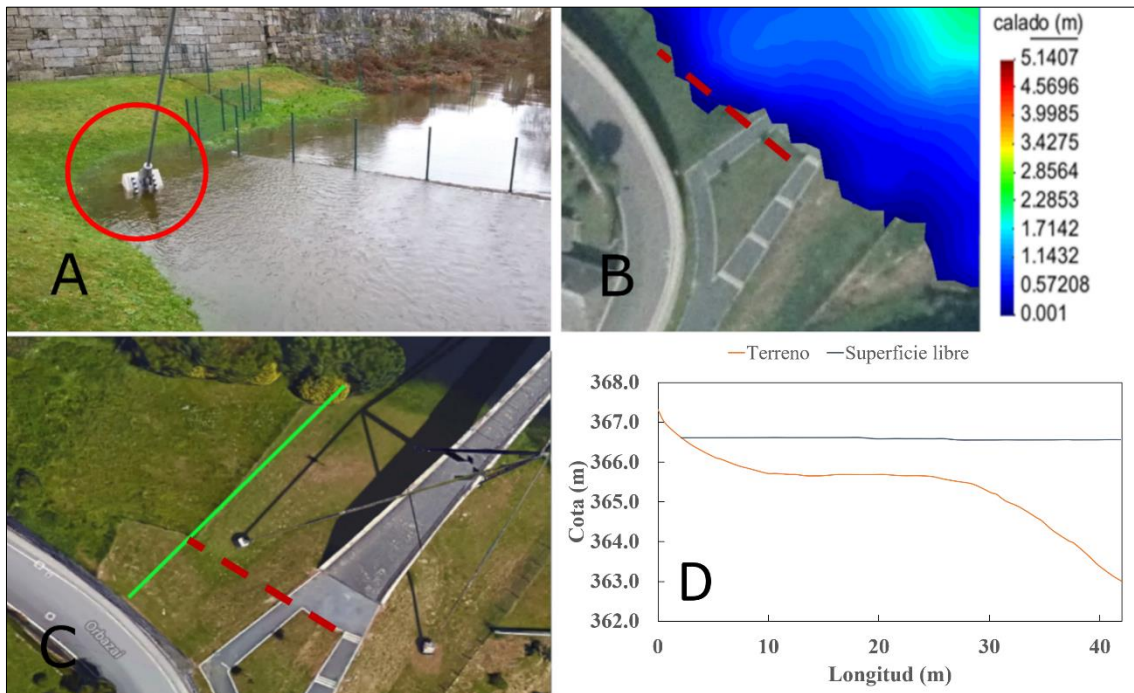


Figura 30. Fotografía tomada el 19/01/2013 (A) cuya fuente es [Vídeo1]; mapa de calado obtenido con Iber del pilar izquierdo del tirante de la pasarela (B); ortofoto con el corte transversal señalado en verde (C) obtenida de Google Earth y resultados de topografía y cota de agua en el corte transversal (D).

En la *Figura 31* se muestra la zona en donde se encuentra una antigua minicentral denominada Fábrica de la Luz. Al fijarnos en la fotografía tomada el día de la inundación (A) se observa que el edificio tiene su cara izquierda (más próxima al cauce del río) completamente inundada, al igual que el frente de la imagen. En el resultado de Iber (B) se observa la misma situación. Es interesante tener en cuenta también la zona más profunda coloreada con tonos rojizos y amarillentos, perteneciente a la zona de transición entre la ribera y el propio cauce fluvial.

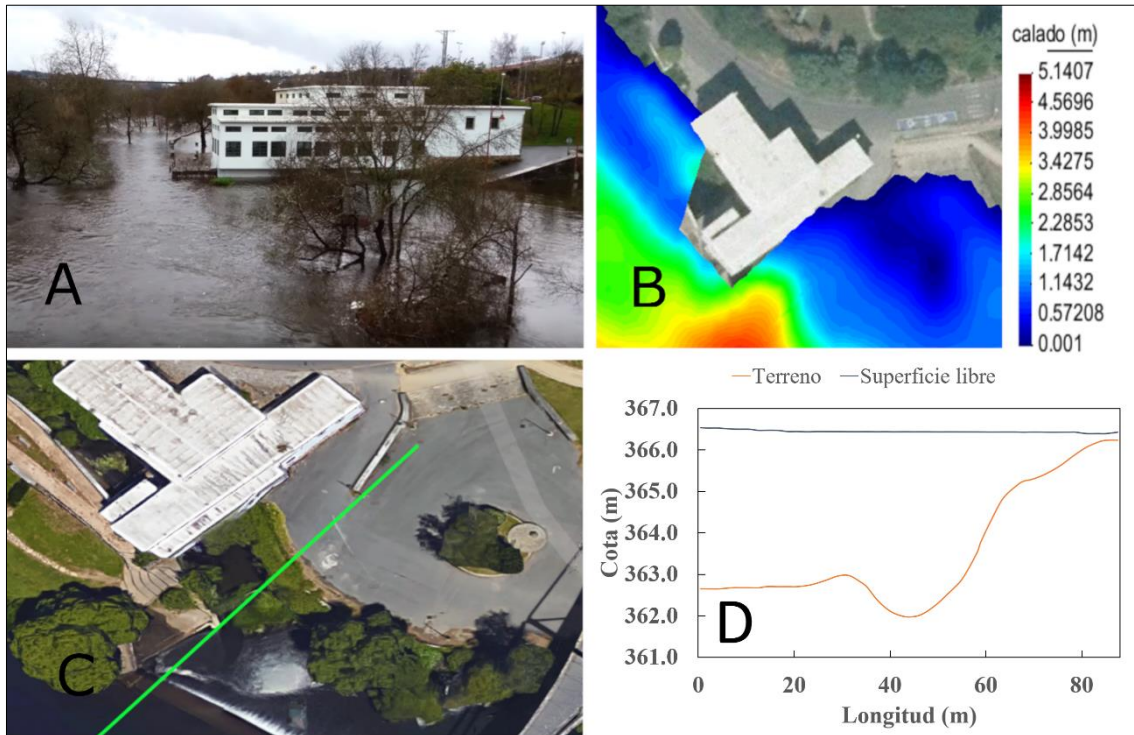


Figura 31. Fotografía tomada el 19/01/2013 (A) cuya fuente es [Vídeo2]; mapa de calado obtenido con Iber en las inmediaciones de la Fábrica de la Luz (B); ortofoto con el corte transversal señalado en verde (C) obtenida de Google Earth y resultados de topografía y cota de agua en el corte transversal (D).

En la *Figura 32* resulta interesante fijarse en la ubicación de un banco situado entre los dos senderos procedentes de la pasarela. Éste se encuentra señalado con un círculo rojo tanto en (A) como en (B). Al observar la imagen real del día de la inundación (A) se distingue que la masa de agua se detiene a una distancia aproximada de unos dos metros del banco. Los resultados obtenidos con Iber (B) muestran una escena similar a la del evento real. En el corte transversal (D) se puede ver que el fondo del río es regular y no posee cambios bruscos de pendiente.

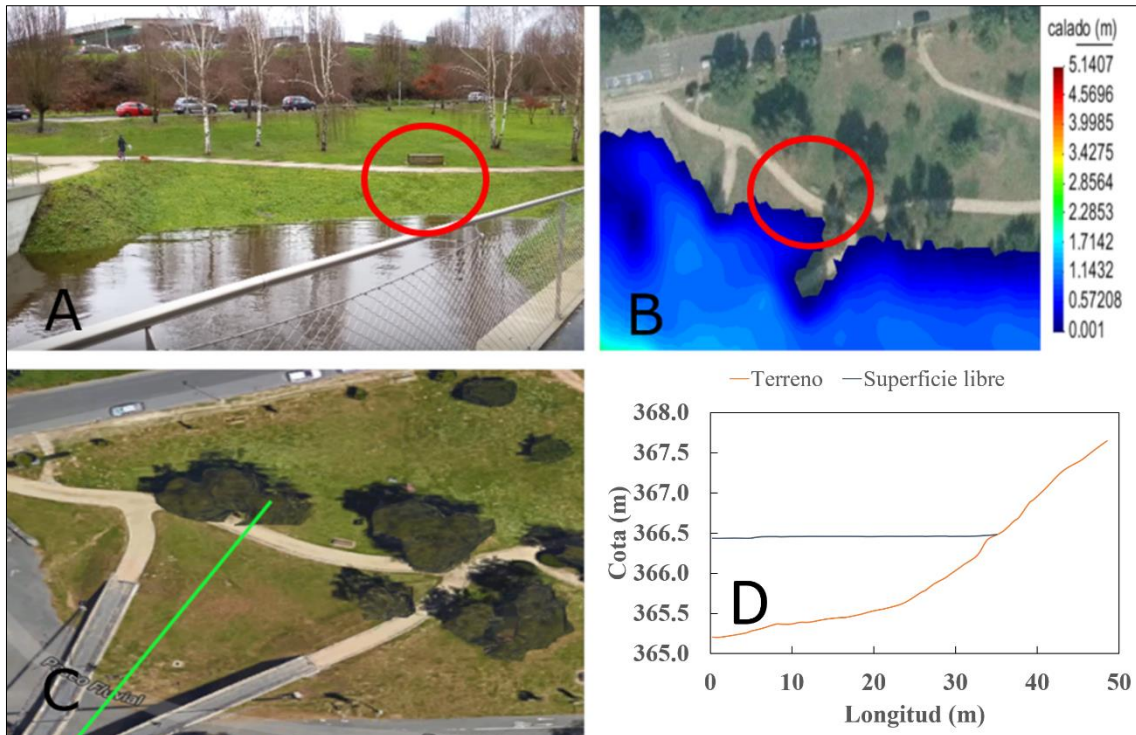


Figura 32. Fotografía tomada el 19/01/2013 (A) cuya fuente es [Vídeo2]; mapa de calado obtenido con Iber al final de la pasarela junto a la Fábrica de la Luz (B); ortofoto con el corte transversal señalado en verde (C) obtenida de Google Earth y resultados de topografía y cota de agua en el corte transversal (D).

La Figura 33 incluye fotografías tomadas desde la pasarela y en ella se muestra el Paseo Fluvial contiguo al río Miño y el parque allí localizado. Se ve claramente la similitud entre la disposición de la lámina de agua alcanzada en la realidad (A) y la obtenida en la simulación (B). El agua discurre de manera paralela al sendero de tierra tanto en la simulación numérica como en el evento real. El corte transversal (D) muestra el gran desnivel que existe entre la zona de ribera y el cauce del río en estado normal.

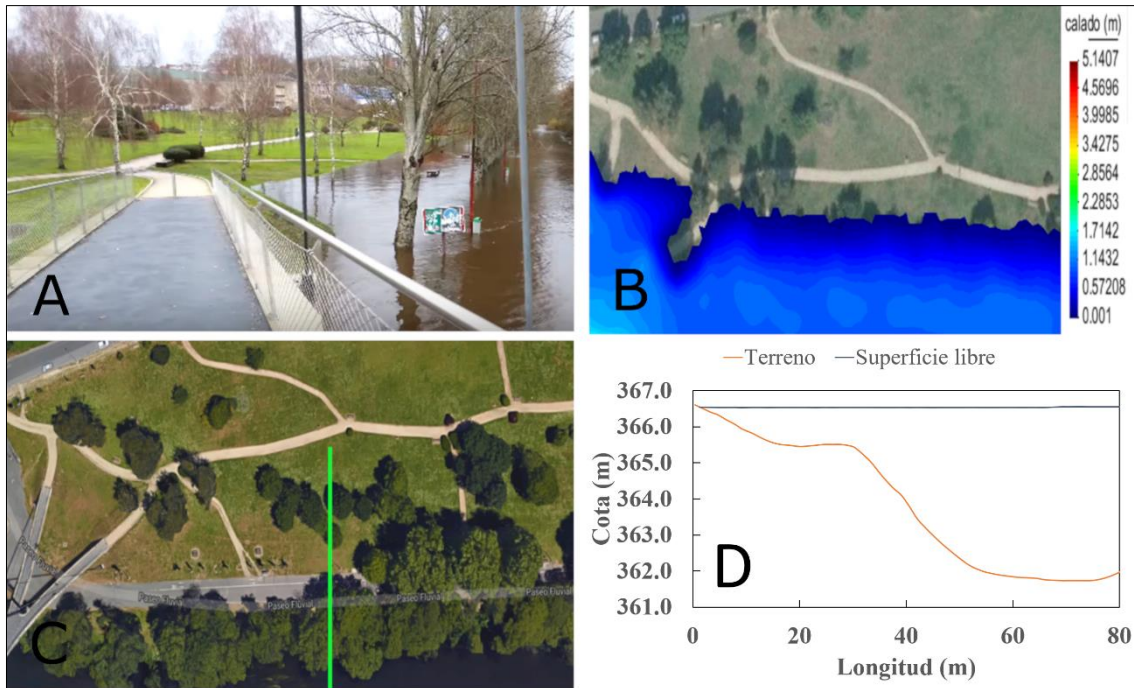


Figura 33. Fotografía tomada el 19/01/2013 (A) cuya fuente es [Video2]; mapa de calado obtenido con Iber en el Paseo Fluvial (B); ortofoto de la zona con el corte transversal señalado en verde (C) obtenida de Google Earth y resultados de topografía y cota de agua en el corte transversal (D).

En las figuras anteriores se puede apreciar hasta qué zonas llegaba la masa de agua. En este Trabajo de Fin de Grado se quiso profundizar más por lo que también se mostrarán evidencias más concretas relacionadas con la comparación entre el calado alcanzado en el evento real y el obtenido en la simulación.

En la *Figura 34* se observa una infraestructura de forma esférica situada cerca de la Fábrica de la Luz al lado de la cual se sitúa el punto de control resaltado en amarillo (A). Mediante las imágenes (B) y (E) podemos definir la altura de la plataforma sobre la que descansa dicha esfera: aproximadamente 72 cm. En la fotografía (C) se puede observar que la elevación de la masa de agua alcanza (aproximadamente) la cima de esta superficie. La figura (D) muestra que el calado máximo alcanzado durante el evento fue de aproximadamente 80 cm. Al no tener constancia de la hora exacta en la que se tomó la fotografía (C), no podemos conocer con exactitud el instante correspondiente en la gráfica de la figura (D). Aun así se puede afirmar que los órdenes de magnitud de la altura de agua obtenida en las simulaciones numéricas son similares a los del evento real.

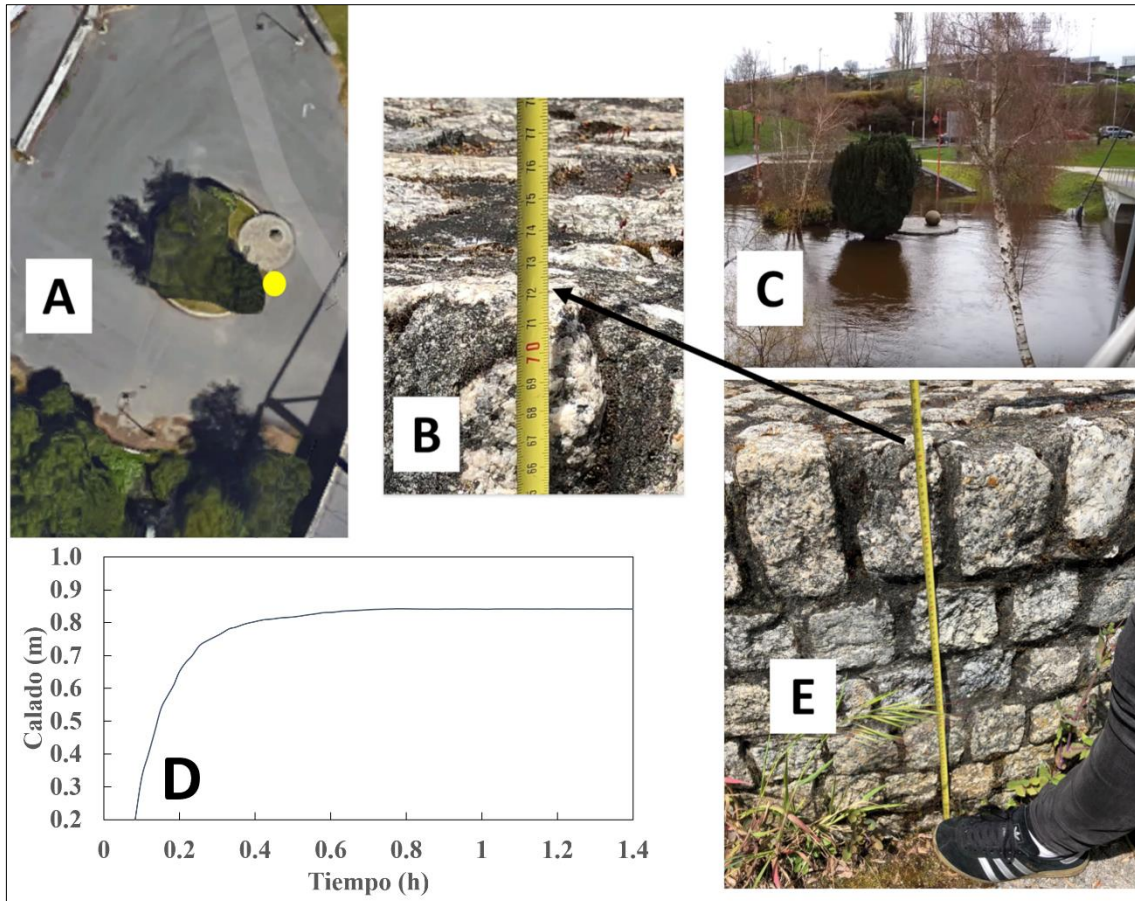


Figura 34. Ortofoto de la zona de estudio con el punto de control indicado en amarillo (A) obtenida de Google Earth; medida de la altura de la plataforma (B); fotografía tomada el 19/01/2013 (C) cuya fuente es [Vídeo2]; gráfica de la evolución del calado del punto de control (D) y medida general de la altura de la plataforma (E).

En la *Figura 35* se puede apreciar una puerta metálica situada en el lado del tirante izquierdo de la pasarela. En la imagen (A) se distingue la ortofoto de la zona con el punto que se representa en la gráfica (D) señalado en amarillo. En la imagen (C) tomada el día de la inundación se ve que el agua se queda entre la segunda y tercera barra metálica de la puerta. Teniendo en cuenta, como se puede ver en las figuras (B) y (D), que la tercera de las mismas empezando a contar desde el suelo mide 1.35 m y la altura de la puerta es de aproximadamente 2 m, el agua en la inundación real alcanza aproximadamente una altura de 1.20 m. En la gráfica (D) se aprecia que el calado máximo alcanzado en ese punto es de 1.30 metros. De nuevo los órdenes de magnitud obtenidos numéricamente son similares a los reales.

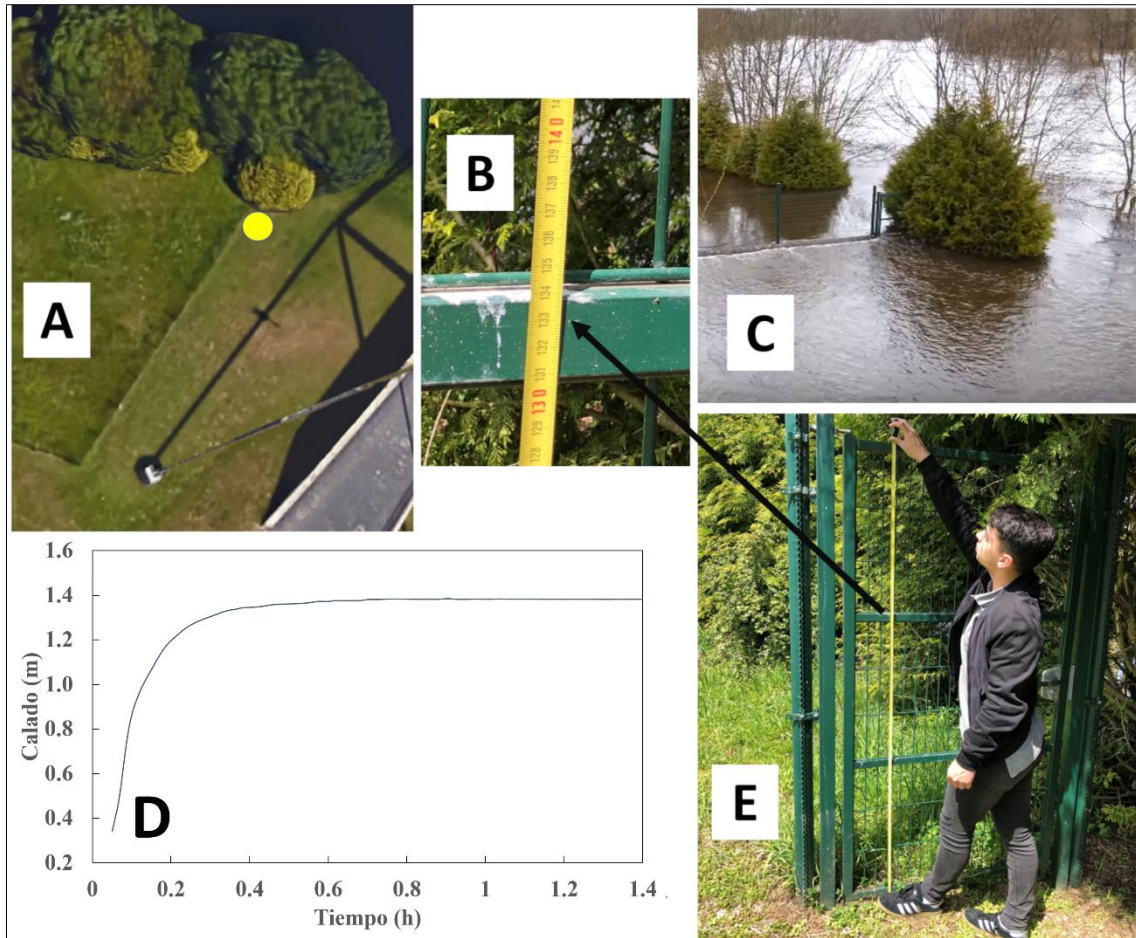


Figura 35. Ortofoto de la zona de estudio con el punto de control indicado en amarillo (A) obtenida de Google Earth; medida de la tercera barra de la puerta desde el suelo (B); fotografía tomada el 19/01/2013 (C) cuya fuente es [Vídeo1]; gráfica de la evolución del calado del punto de control (D) y medida total de la puerta metálica (E).

La *Figura 36* también nos ayuda a evaluar la capacidad del modelo para simular eventos reales. Así, en la imagen (A) se observa una ortofoto de la zona de estudio, en este caso el mesón O Muiño situado aguas abajo del Puente Romano de Lugo. Tomando como referencia el árbol que aparece en la imagen (C), cuyas medidas se muestran en las figuras (B) y (E), se puede afirmar que la altura de agua alcanzada en la realidad fue de aproximadamente 1.50 metros. Al representar la evolución del calado del punto marcado en amarillo correspondiente a la zona del árbol se obtiene un máximo de 1.45 metros. En este caso la simulación también es estrechamente semejante a la evidencia real.

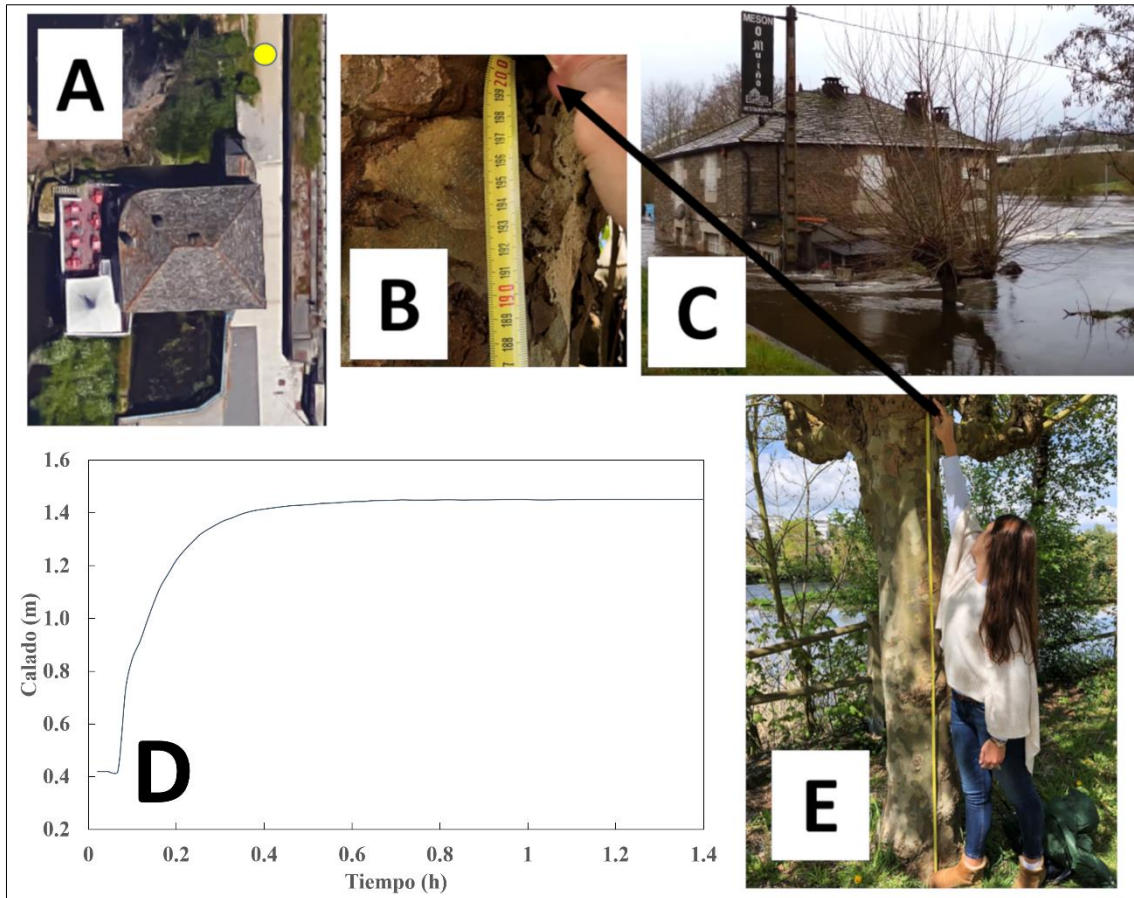


Figura 36. Ortofoto de la zona de estudio con el punto de control indicado en amarillo (A) obtenida de Google Earth; medida de la altura máxima del árbol tomado como referencia (B); fotografía tomada el 19/01/2013 del mesón O Muiño (C) cuya fuente es [Vídeo3]; gráfica de la evolución del calado del punto de control (D) y otra medida general del árbol (E).

Por último, en la *Figura 37* se muestra la zona del Paseo Fluvial mostrada también en la *Figura 33*. El punto marcado en amarillo se corresponde con una papelera cuyas medidas se ven en las fotografías (B) y (E). En la imagen (C) se marcó la situación de la papelera con un círculo rojo para distinguirla mejor; se observa hasta donde llegó el agua el día 19/01/2013. Teniendo en cuenta que el cambio de forma del plástico de la papelera señalado en (B) está a una altura de 92 cm, se puede decir que el agua en la fotografía (C) alcanzó un calado de aproximadamente 65 cm. En la gráfica (D) se muestra que el calado máximo registrado fue de 70 cm.

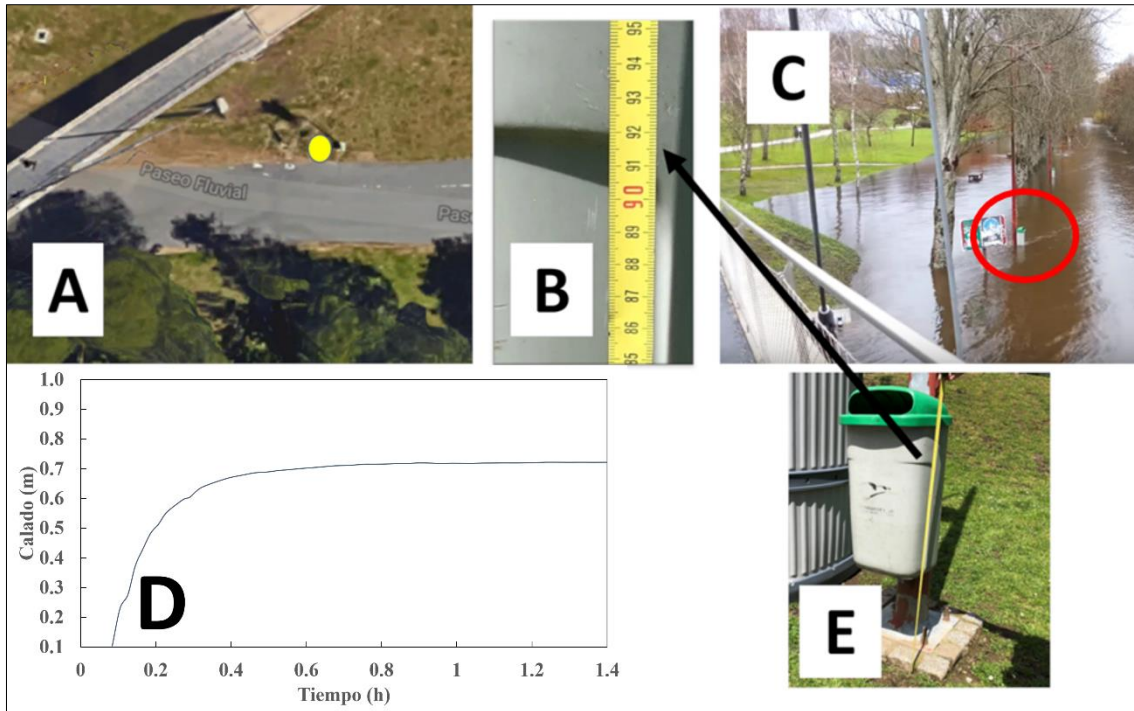


Figura 37. Ortofoto de la zona de estudio con el punto de control indicado en amarillo (A) obtenida de Google Earth; medida del cambio de forma en el plástico de la papelera (B); fotografía tomada el 19/01/2013 del paseo fluvial (C) cuya fuente es [Vídeo2]; gráfica de la evolución del calado del punto de control (D) y medida de la altura de la papelera (E).

Finalmente, como se explicó en capítulos anteriores de este Trabajo de Fin de Grado, la legislación vigente (concretamente la Directiva 2007/60) solicita la elaboración de los mapas de peligrosidad de inundación (cálculo de la zona inundable) y de riesgo de inundación (incorporando a la zona inundable los distintos usos del suelo y los principales daños esperados). Aunque existe una Guía Metodológica de acceso público que muestra el procedimiento a seguir para la creación de dichos mapas editada por el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables, Iber tiene implementada una opción para calcular los mapas de peligrosidad. Concretamente, se basa en el Real Decreto 9/2008, del 11 de enero, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que establece que una zona es de riesgo de daños graves si para un período de retorno de 100 años se cumple alguna de las siguientes condiciones: que el calado sea superior a 1 m, que la velocidad sea superior a 1 m/s o que el producto de ambas variables sea superior a 0.5 m²/s. De esta manera, en el visor del SNZI-IPE se comprobó que para la zona de estudio el caudal máximo correspondiente al período de retorno de 100 años es de 1,387 m³/s. Al llevar a cabo la simulación con los parámetros señalados en el apartado de metodología y con el caudal correspondiente al período de retorno de 100 años se obtuvo

el mapa de Máximo Daño Grave según el RD 9/2008 mostrado en la *Figura 38*. En la *Figura 39* se muestra el mapa de zonas de inundación para un período de retorno de 100 años obtenidos del SNCZI. Se puede comprobar que los resultados obtenidos con Iber reproducen de forma similar los mostrados por el visor del Sistema Nacional de Zonas Inundables.



Figura 38. Mapa de zonas de máximo daño grave según el RD9/2008 obtenido con Iber.

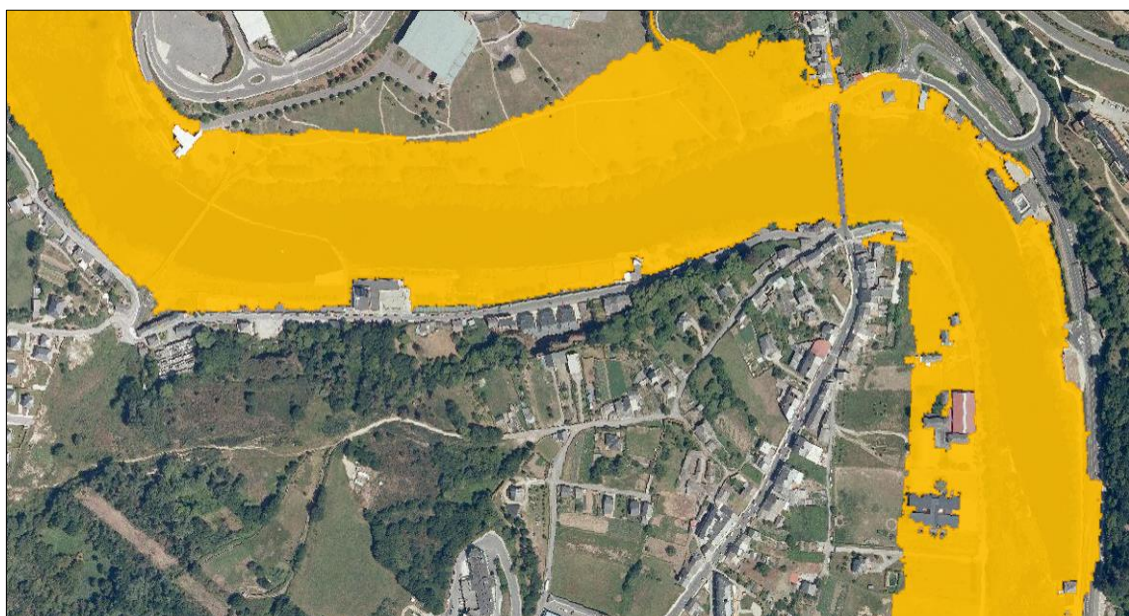


Figura 39. Mapa de zonas de inundación con probabilidad media u ocasional (período de retorno de 100 años). Fuente: visor del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI).

5

Conclusiones

En este Trabajo de Fin de Grado se trataron de reproducir numéricamente mediante el código Iber las inundaciones derivadas de los grandes temporales ocurridos en la ciudad de Lugo en enero de 2013. Iber es un modelo ampliamente utilizado por las administraciones para realizar estudios en materia de avenidas dada su capacidad para obtener resultados muy semejantes a los eventos reales.

Las modelizaciones numéricas realizadas ponen de manifiesto la necesidad de definir de manera correcta todos los parámetros que pueden influir en los resultados de dichas simulaciones como, por ejemplo, las condiciones iniciales, las condiciones de contorno, definición de los usos del suelo de la zona de estudio, etc.

Los resultados obtenidos muestran que el modelo Iber es capaz de delimitar las zonas de inundación de forma muy aproximada a las registradas en el evento real. En comparaciones detalladas entre el evento real y las simulaciones, tomando como referencia distintos elementos y objetos localizados en la zona de estudio, se puede afirmar que Iber es capaz de calcular con bastante precisión el calado máximo de puntos concretos. Por tanto, podemos concluir que Iber es una herramienta muy eficaz a la hora de predecir y modelizar inundaciones fluviales.

6

Referencias

- Apel, H., Thielen, A., Merz, B., Bloschl, G. (2006). A probabilistic modelling system for assessing flood risks. *Nat. Hazards* 38 (1-2), 79-100.
- Arduino, G., Reggiani, P., Todini, E. (2005). Recent advances in flood forecasting and flood risk assessment. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 9 (4), 280-284.
- Ayala-Carcedo, F. J. y Olcina Santos, J. (2002). *Riesgos Naturales*. Ed. Ariel. Barcelona.
- Beven, K. (1989). Changing ideas in hydrology - the case of physically-based models. *J. Hydrol.* 105 (1-2), 157-172.
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, CIMNE, 30(1), 1-10.
- Brufau, P., García-Navarro, P., Vázquez-Cendón, M.E. (2000). Zero mass error using unsteady wetting–drying conditions in shallow flows over dry irregular topography. *International Journal for Numerical Methods in Fluids.* 45(10), 1047-1082. doi:10.1002/ fld.729
- Bryant, E. (1991). *Natural Hazards*. 294 pp. Cambridge University Press. Cambridge.
- Calvo Garcia-Tornel, F. (1984). Geografía de los riesgos, *Geocrítica* nº 54.
- Campos Aranda, D.F. (1998). *Procesos del ciclo hidrológico*. Editorial Universitaria Potosina. Tercera Reimpresión. México. 9-10.
- Chow, V. T., Maidment, D. R.; Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology*, McGraw-Hill International editions.
- Comisión Técnica de Emergencia para Inundaciones. (1988). *Informe: Las Inundaciones en la España Peninsular*. Madrid.

- de Moel, H., Aerts, J.C.J.H. (2011). Effect of uncertainty in land use, damage models and inundation depth on flood damage estimates. *Nat. Hazards* 58, 407–425.
- Díez Herrero, A., Lalín Huerta, L., Llorente Isidro, M. (2008). Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid, España. 45-54.
- Dutta, D., Herath, S., Musiake, K. (2006). An application of a flood risk analysis system for impact analysis of a flood control plan in a river basin. *Hydrol. Process.* 20 (6), 1365-1384.
- FEMA. (2001). *Understanding Your Risks. identifying hazards and estimating losses.* F.E.M. Agency, ed., Federal Emergency Management Agency.
- Floodsite. (2009). *Flood risk assessment and flood risk management. An introduction and guidance based on experiences and findings of FLOODsite.*
- Gallegos, H.A., Schubert, J.E., Sanders, B.F. (2009). Two-dimensional, high-resolution modeling of urban dam-break flooding: a case study of Baldwin Hills, California. *Adv. Water Resour.* 32 (8), 1323-1335.
- González-Aguirre, J.C., Vázquez-Cendón, M.E., Alavez-Ramírez, J. (2016). Simulación numérica de inundaciones en Villahermosa México usando el código IBER. IWA Publishing, Editorial UPV, FFIA. doi: 10.4995/ia.2016.5231
- Knight, D.W. (2013). River hydraulics – a view from midstream. *Journal of Hydraulic Research*, 51(1), 2-18.
- MARM. (2011). *Guía Metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables.* (Ministerio de Medio Ambiente, Medio Rural y Marino, ed.), 349.
- Matte, P. (1968): La structure de la virgation hercynienne de Galice (Espagne). *Revue de Géologie Alpine*, 44: 1-128.
- Merz, B., Kreibich, H., Schwarze, R., Thielen, A. (2010). Review article “Assessment of economic flood damage”. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 10, 1697–1724.

- Olcina Cantos, J. (2007). Prevención de riesgos: cambio climático, sequías e inundaciones. Panel científico-técnico de seguimiento de políticas de agua. Fundación Nueva Cultura del Agua.
- Ollero, A. (2014). Guía metodológica sobre buenas prácticas en gestión de inundaciones. Manual para gestores. Contrato del río Matarraña, ECODES.
- Organización meteorológica mundial/UNESCO. (2012). Glosario internacional de hidrología. Ginebra.
- Schumann, G., Bates, P.D., Horritt, M.S., Matgen, P., Pappenberger, F. (2009). Progress in integration of remote sensing-derived flood extent and stage data and hydraulic models. *Rev. Geophys.* 47 (4).
- Smith, K., Ward, R. (1998). *Floods: Physical Processes and Human Impacts*. John Wiley & Sons, Chichester.
- Smith, L.C. (1997). Satellite remote sensing of river inundation area, stage, and discharge: a review. *Hydrol. Process.* 11 (10), 1427-1439.
- Stelling, G., Zijlema, M. (2003). An accurate and efficient finite-difference algorithm for non-hydrostatic free-surface flow with application to wave propagation. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 43(1), 1-23.
- Tarbut, E. J., Lutgens. F. K. (2004). *Ciencias de la Tierra, una introducción a la Geología Física*. Ed. Pearson Madrid.
- Teng, J., Vaze, J., Dutta, D., Marvanek, S. (2015). Rapid inundation modelling in large floodplains using LiDAR DEM. *Water Resour. Manag.* 29 (8), 2619-2636.
- Vaze, J., Viney, N., Stenson, M., Renzullo, L., Van Dijk, A., Dutta, D., Crosbie, R., Lerat, J., Penton, D., Vleeshouwer, J., Peeters, L., Teng, J., Kim, S., Hughes, J., Dawes, W., Zhang, Y., Leighton, B., Perraud, J.-M., Joehnk, K., Yang, A., Wang, B., Frost, A., Elmahdi, A., Smith, A., Daamen, C. (2013). The Australian Water Resource Assessment System (AWRA). In: *Proceedings of the 20th International Congress on Modelling and Simulation (MODSIM2013)*. Adelaide, Australia.

Páginas web consultadas:

Módulos Universitarios en Ciencia del Desarrollo Sostenible a día 26/03/2018:

<http://www.desenvolupamentsostenible.org>

Periódico de Aragón Heraldo a día 26/03/2018: <https://www.heraldo.es>

Agencia Catalana del Agua a día 26/03/2018: <http://aca-web.gencat.cat>

Meteogalicia a día 09/05/2018: <http://www.meteogalicia.gal>

Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente a día 02/04/2018:

<http://www.mapama.gob.es/es/>

Youtube, en la cual se encuentran los siguientes vídeos:

- [Vídeo1]: <https://www.youtube.com/watch?v=a6LGdqRusk4>
- [Vídeo2]: <https://www.youtube.com/watch?v=tSWS5tTcxRo>
- [Vídeo3]: <https://www.youtube.com/watch?v=vrlo1S5t6NE>



Environmental | Physics | Laboratory
EPhysLab