



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Modelización de eventos de inundación
realistas en la desembocadura del río Gállego

Autor

César Dieste Grañena

Directoras

Pilar Brufau García

Isabel Echeverribar Pérez

ESCUELA DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
2022

Resumen

Durante los eventos de avenida de la última década se ha puesto de manifiesto el gran coste económico que supone la reconstrucción de la desembocadura del río Gállego. El objetivo de este trabajo consiste en realizar una modelización numérica para estudiar en detalle los campos de velocidad del flujo en la confluencia de los ríos Gállego y Ebro, así como nivel de la superficie libre, como trabajo preliminar para posteriormente poder proponer medidas de control o mitigación en esta zona para eventos futuros extremos que se prevén abundantes bajo la acción del cambio climático.

Para acometer este trabajo se ha realizado un estudio geográfico de la zona para elaborar; a partir de modelos digitales de terreno (MDT) disponibles, un mapa de elevación del terreno del dominio a estudiar sobre el cual generar una malla de cálculo. Se ha procedido a un proceso de refinamiento y calibración de nuestro modelo de partida, donde estudiando casos reales de avenidas se ha procedido a ponderar la influencia de la condición inicial de partida en los resultados numéricos, así como la influencia del valor del coeficiente de rozamiento en el mismo. Las simulaciones numéricas se han realizado con un código comercial de cálculo de avenidas en volúmenes finitos 2D sobre tarjetas gráficas (GPU) que garantizan la mayor rapidez de cálculo y gran precisión en los resultados.

Posteriormente se ha procedido al estudio en detalle de la confluencia del río Ebro con el río Gállego, reduciendo nuestro dominio de estudio y tomando mucho más detalle en la toma de niveles y mapas de velocidades.

Finalmente, y basándonos en los datos extraídos de los resultados de nuestras simulaciones, se proponen algunas medidas a estudiar para medir el caudal en la estación de aforo del río Gállego en Zaragoza que recoja el caudal que proviene de ambos ríos, así como algunas medidas a estudiar para evitar que la inundación del Ebro se propague aguas arriba del río Gállego.

Abstract

During the flood events of the last decade, the great economic cost of reconstructing the mouth of the Gállego river has become evident. This work aims to carry out numerical modeling to study in detail the flow velocity fields at the confluence of the Gállego and Ebro rivers, as well as the free surface level, as preliminary work to subsequently propose control or mitigation measures in this area for future extreme events that are expected to be abundant under the action of climate change.

To undertake this work, a geographical study of the area has been carried out to create, starting from available digital terrain models (DTM), a bed elevation map which serves as basis of the computational mesh. A process of refinement and calibration of our initial model has been developed, studying real flood events, in which the influence of initial condition on the numerical results, as well as the influence of the value of the friction coefficient have been analysed. The numerical simulations have been carried out with a commercial 2D finite volume river flood calculation code on graphic cards (GPU) that guarantee the highest calculation speed and high precision in the results.

Subsequently, a detailed study of the confluence of the Ebro river with the Gállego river has been carried out, reducing the study domain and looking carefully water levels and velocity maps.

Finally, based on the data extracted from the results of the simulations, some measures are proposed to be studied: flow discharge registration in the gauge station of the Gállego river in Zaragoza which collects the flow coming from both rivers, as well as some measures to prevent the flooding of the Ebro river upstream the Gállego river.

Índice

Índice de figuras	6
Capítulo 1. Introducción.....	12
Capítulo 2. Planteamiento del problema	18
Capítulo 3. Calibración del modelo.....	22
3.1. Influencia de la condición inicial en el río Gállego	22
3.2. Influencia de la distribución de coeficiente de rozamiento.....	31
3.2.1. Distribución del coeficiente de rozamiento según usos de suelo.....	31
3.2.2. Distribución del coeficiente de rozamiento en el cauce.....	38
Capítulo 4. Análisis de la avenida de 2021.....	47
Capítulo 5. Análisis detallado de la confluencia.....	55
Capítulo 6. Conclusiones y trabajo futuro	68
Bibliografía	70
Anexos.....	72
A. Preparación del modelo	74
A.1. QGIS.....	74
A.1.1. Refinamiento de la malla.....	74
A.1.2. Condiciones de contorno.....	80
A.1.3. Coeficiente de rozamiento de Manning y capa ráster asociada.....	82
A.1.4. Puntos de observación y secciones de caudal	86
A.1.5. RiverFlow2D: Parámetros de simulación	89
A.1.6. Archivos de introducción y extracción de datos. Carpeta <i>shape</i>	93
A.2. Paraview.....	96
A.2.1. Filtro <i>Threshold</i> . Obtención de imágenes de manchas de inundación.....	97
A.2.2. Filtro <i>Glyph</i> . Obtención de imágenes de mapas de velocidades	101
B. Ecuaciones del modelo de aguas poco profundas.....	103
C. Método de cálculo del programa RiverFlow2D	107

Índice de figuras

Figura 1.1. Restos de la presa de Sadd el Kafara, en Egipto.....	12
Figura 1.2. Imagen de un satélite de la NASA en la que se aprecia el progreso y los efectos de la construcción de la presa de las Tres Gargantas.	13
Figura 1.3. Desastres naturales desglosados según su tipo y pérdidas humanas y económicas provocadas por los mismos en el período de tiempo comprendido entre 1970 y 2019. Fuente: Nuevo Atlas de la MMO.	14
Figura 1.4. Los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible fijados por Naciones Unidas.	15
Figura 1.5. Estadística de siniestralidad, daños en los bienes. Número de expedientes, indemnizaciones y costes medios por año de ocurrencia según causa del siniestro.	16
Figura 2.1. Cuenca hidrográfica del Ebro con algunas de las estaciones de aforo más importantes. Fuente: SAIH Ebro.....	18
Figura 2.2. Cuenca del Gállego. Fuente: SAIH Ebro.	18
Figura 2.3. Margen derecha del río Ebro. Se aprecia la estación de Alagón, la última antes de llegar a Zaragoza. Fuente: SAIH Ebro.	19
Figura 2.4. Sección del Huerva-Aguas Vivas. Gelsa es la última estación de aforo en tierras aragonesas. Fuente: SAIH Ebro.	19
Figura 2.5. Extensión del dominio del modelo numérico.....	20
Figura 2.6. Extensión del dominio del modelo reducido para el análisis detallado de la confluencia.....	21
Figura 3.1.1. Hidrograma de entrada introducido en la condición de contorno del río Gállego.	22
Figura 3.1.2. Hidrograma de entrada introducido en la condición de contorno del río Ebro.....	23
Figura 3.1.3. Evolución temporal del caudal de la avenida de 2018 del río Gállego en la localización de Zuera.	24
Figura 3.1.4. Evolución temporal del caudal de la avenida de 2018 del río Gállego en la localización de Zaragoza.....	25
Figura 3.1.5. Evolución temporal del nivel de la avenida de 2018 del río Gállego en la localización de Zuera.....	25
Figura 3.1.6. Evolución temporal del nivel de 2018 del río Gállego en la localización de Zaragoza.....	26
Figura 3.1.7 Mapas superficiales de altura de agua en t=120 h alrededor de la confluencia de los ríos Gállego y Ebro partiendo de lecho seco como condición inicial (arriba) o húmedo (abajo).....	27

Figura 3.1.8 Mapas superficiales de altura de agua en $t=528$ alrededor de la confluencia de los ríos Gállego y Ebro partiendo de lecho seco como condición inicial (arriba) o húmedo (abajo).....	28
Figura 3.1.9. Mapas de velocidad del flujo alrededor de la confluencia de los ríos Gállego y Ebro en $t=120$ h partiendo de lecho seco como condición inicial (arriba) o húmedo (abajo).	29
Figura 3.1.10 Mapas de velocidad del flujo alrededor de la confluencia de los ríos Gállego y Ebro en $t=528$ h partiendo de lecho seco como condición inicial (arriba) o húmedo (abajo).	30
Figura 3.2.1.1. Evolución temporal del caudal de la avenida de 2018 del río Gállego en la localización de Zuera.	31
Figura 3.2.1.2. Evolución temporal del caudal de la avenida de 2018 del río Gállego en la localización de Zaragoza.	32
Figura 3.2.1.3. Evolución temporal del nivel de la avenida de 2018 del río Gállego en la localización de Zuera.	33
Figura 3.2.1.4. Evolución temporal del nivel de la avenida de 2018 del río Gállego en la localización de Zaragoza.	33
Figura 3.2.1.5. Mapas superficiales de altura de agua alrededor de la confluencia de los ríos Gállego y Ebro en $t=120$ h con un coeficiente de rozamiento $n=0.030$ cte. En todo el dominio (arriba) o con una distribución espacial de coeficientes de rozamiento de Manning según los usos del suelo (abajo).	34
Figura 3.2.1.6 Mapas superficiales de altura de agua alrededor de la confluencia de los ríos Gállego y Ebro en $t=528$ h con un coeficiente de rozamiento $n=0.030$ cte. En todo el dominio (arriba) o con una distribución espacial de coeficientes de rozamiento de Manning según los usos del suelo (abajo).....	35
Figura 3.2.1.7. Mapas de velocidad del flujo alrededor de la confluencia de los ríos Gállego y Ebro en $t=120$ h con un coeficiente de rozamiento $n=0.030$ cte. en todo el dominio (arriba) o con una distribución espacial de coeficientes de rozamiento de Manning según los usos del suelo (abajo).	36
Figura 3.2.1.8 Mapas de velocidad del flujo alrededor de la confluencia de los ríos Gállego y Ebro en $t=528$ h con un coeficiente de rozamiento $n=0.030$ cte. en todo el dominio (arriba) o con una distribución espacial de coeficientes de rozamiento de Manning según los usos del suelo (abajo).	37
Figura 3.2.2.1. Hidrograma de entrada introducido en la condición de contorno del río Gállego.	38
Figura 3.2.2.2. Hidrograma de entrada introducido en la condición de contorno del río Ebro.....	38
Figura 3.2.2.3. Evolución temporal del caudal de la avenida de 2018 del río Gállego en la localización de Zuera.	39
Figura 3.2.2.4. Evolución temporal del caudal de la avenida de 2018 del río Gállego en la localización de Zaragoza.	39

Figura 3.2.2.5. Evolución temporal del nivel de la avenida de 2018 del río Gállego en la localización de Zuera.	40
Figura 3.2.2.6. Evolución temporal del nivel de la avenida de 2018 del río Gállego en la localización de Zaragoza.	40
Figura 3.2.2.7. Mapas superficiales de altura de agua alrededor de la confluencia de los ríos Gállego y Ebro en $t=120h$ con un coeficiente de rozamiento $n=0.030$ (arriba), $n=0.035$ (centro) y $n=0.040$ (abajo).....	41
Figura 3.2.2.8. Mapas superficiales de altura de agua alrededor de la confluencia de los ríos Gállego y Ebro en $t=384 h$ con un coeficiente de rozamiento $n=0.030$ (arriba), $n=0.035$ (centro) y $n=0.040$ (abajo).....	42
Figura 3.2.2.9. Mapas de velocidad del flujo alrededor de la confluencia de los ríos Gállego y Ebro en $t=120h$ con un coeficiente de rozamiento con un coeficiente de rozamiento $n=0.030$ (arriba), $n=0.035$ (centro) y $n=0.040$ (abajo).....	44
Figura 3.2.2.10. Mapas de velocidad del flujo alrededor de la confluencia de los ríos Gállego y Ebro en $t=384h$ con un coeficiente de rozamiento con un coeficiente de rozamiento $n=0.030$ (arriba), $n=0.035$ (centro) y $n=0.040$ (abajo).....	45
Figura 4.1. Hidrograma de entrada introducido en la condición de contorno del río Gállego.	47
Figura 4.2. Hidrograma de entrada introducido en la condición de contorno del río Ebro.	47
Figura 4.3. Evolución temporal del caudal de la avenida de 2021 del río Gállego en la localización de Zuera.....	48
Figura 4.4. Evolución temporal del caudal de la avenida de 2021 del río Gállego en la localización de Zaragoza.....	49
Figura 4.5. Evolución temporal del caudal de la avenida de 2021 del río Ebro en la localización de Zaragoza.	49
Figura 4.6. Evolución temporal del nivel de la avenida de 2021 del río Gállego en la localización de Zuera.	50
Figura 4.7. Evolución temporal del nivel de la avenida de 2021 del río Gállego en la localización de Zaragoza.	50
Figura 4.8. Evolución temporal del nivel de la avenida de 2021 del río Ebro en la localización de Zaragoza.....	51
Figura 4.9. Mapas superficiales de altura de agua alrededor de la confluencia de los ríos Gállego y Ebro para diversos valores del tiempo; $t=336 h$ (arriba), $t=384 h$ (centro) y $t=456 h$ (abajo).....	52
Figura 4.10. Mapas de velocidad del flujo alrededor de la confluencia de los ríos Gállego y Ebro para diversos valores del tiempo; $t=336 h$ (arriba), $t=384 h$ (centro) y $t=456 h$ (abajo).....	53
Figura 5.1. Hidrograma de entrada introducido en la condición de contorno del río Gállego.	55

Figura 5.2. Evolución temporal del caudal simulado en la sección E2 con diferentes coeficientes de rozamiento de Manning en el cauce durante el evento de avenida del 2018.	56
Figura 5.3. Evolución temporal del nivel de agua simulado en el punto de observación E31 con diferentes coeficientes de rozamiento de Manning en el cauce para el evento de avenida del 2018.	57
Figura 5.4. Evolución temporal del nivel de agua simulado en el punto de observación E33 con diferentes coeficientes de rozamiento de Manning en el cauce para el evento de avenida del 2018.	57
Figura 5.5. Evolución temporal del nivel de agua simulado en el punto de observación E51 con diferentes coeficientes de rozamiento de Manning en el cauce para el evento de avenida del 2018.	58
Figura 5.6. Evolución temporal del nivel de agua simulado en el punto de observación E53 con diferentes coeficientes de rozamiento de Manning en el cauce para el evento de avenida del 2018.	58
Figura 5.7. Evolución temporal del nivel de agua simulado en el punto de observación G23 con diferentes coeficientes de rozamiento de Manning en el cauce para el evento de avenida del 2018.	59
Figura 5.8. Evolución temporal del nivel de agua simulado en el río Gállego en la sonda situada en Zaragoza con diferentes coeficientes de rozamiento de Manning en el cauce para el evento de avenida del 2018.	59
Figura 5.9. Mapas superficiales de altura de agua alrededor de la confluencia de los ríos Gállego y Ebro en t=120h con un coeficiente de rozamiento n=0.030 (arriba), n=0.035 (centro) y n=0.040 (abajo).	60
Figura 5.10. Mapas superficiales de altura de agua alrededor de la confluencia de los ríos Gállego y Ebro en t=192h con un coeficiente de rozamiento n=0.030 (arriba), n=0.035 (centro) y n=0.040 (abajo).	61
Figura 5.11. Mapas superficiales de altura de agua alrededor de la confluencia de los ríos Gállego y Ebro en t=384 h con un coeficiente de rozamiento n=0.030 (arriba), n=0.035 (centro) y n=0.040 (abajo).	62
Figura 5.12. Mapas de velocidad del flujo alrededor de la confluencia de los ríos Gállego y Ebro en t=120h con un coeficiente de rozamiento n=0.030 (arriba), n=0.035 (centro) y n=0.040 (abajo).	64
Figura 5.13. Mapas de velocidad del flujo alrededor de la confluencia de los ríos Gállego y Ebro en t=192h con un coeficiente de rozamiento n=0.030 (arriba), n=0.035 (centro) y n=0.040 (abajo).	65
Figura 5.14. Mapas de velocidad del flujo alrededor de la confluencia de los ríos Gállego y Ebro en t=384h con un coeficiente de rozamiento n=0.030 (arriba), n=0.035 (centro) y n=0.040 (abajo).	66
Figura A.1.1.1. <i>DensityLines</i> colocadas únicamente sobre el curso del río.	75
Figura A.1.1.2. <i>DensityLines</i> colocadas en el curso y alrededores del río.	75
Figura A.1.1.3. Opción de QGIS para abrir propiedades de una capa.	76

Figura A.1.1.4. Subapartado de Etiquetas dentro de la ventana de Propiedades.	76
Figura A.1.1.5. Malla resultante con <i>DensityLines</i> únicamente en el curso del río.	77
Figura A.1.1.6. Malla resultante con <i>DensityLines</i> en el curso y alrededores del río.....	77
Figura A.1.1.7. Selección de todas las <i>DensityLines</i> del dominio reducido.....	78
Figura A.1.1.8. Opción de QGIS para invertir selección.	78
Figura A.1.1.9. Ventana de selección de las <i>DensityLines</i> de nuestro modelo. ..	79
Figura A.1.1.10. <i>MeshDensityPolygon</i> (en rojo) colocando en el área de una de nuestras condiciones de contorno.	79
Figura A.1.1.11. Opción de QGIS de Generar la Malla TriMesh	80
Figura A.1.2.1. Localización de las condiciones de contorno en nuestro dominio inicial.....	80
Figura A.1.2.2. Localización de las condiciones de contorno en nuestro dominio reducido.	81
Figura A.1.2.3. Opción de QGIS para seleccionar condiciones de contorno.	81
Figura A.1.3.1. Opción de QGIS para abrir la calculadora ráster.	82
Figura A.1.3.2. Ventana de opciones de la calculadora ráster.	83
Figura A.1.3.3. Tabla con la clasificación CODIIGE de cubiertas del suelo.	84
Figura A.1.3.4. Capa con ráster de Manning generada. A la izquierda, leyenda con sus valores correspondientes por color.	85
Figura A.1.3.5. Tabla con usos del suelo y su correspondiente valor <i>n</i>	86
Figura A.1.4.1. Sondas y secciones de nuestro dominio de calibración.....	87
Figura A.1.4.2. Sondas y secciones de nuestro dominio de análisis detallado de la confluencia.	88
Figura A.1.4.3. Opción de QGIS de herramienta de vértices	88
Figura A.1.4.4. Opción de QGIS del editor de vértices	88
Figura A.1.4.5. <i>CrossSections</i> , con su numeración interna e indicando el vector normal de las mismas.....	89
Figura A.1.5.1. Opción de QGIS de Exportar a RiverFlow2D.....	90
Figura A.1.5.2. Ventana de QGIS previa a la exportación de datos a RiverFlow2D.	90
Figura A.1.5.3. Ventana de Riverflow2D con los parámetros relevantes de simulación.	91
Figura A.1.5.4. Ventana de RiverFlow2D con datos de las condiciones de contorno.	92
Figura A.1.5.5. Ventana de RiverFlow2D con diversas opciones de generación de ficheros gráficos.	93

Figura A.1.6.1. Estructura del archivo 2binitialized.HOTSTART.	93
Figura A.1.6.2. Estructura del archivo Q_IN.dat	94
Figura A.1.6.3. Estructura del archivo *.OUTI	94
Figura A.1.6.4. Estructura del archivo *.XSECS.....	95
Figura A.1.6.5. Estructura de la carpeta <i>shape</i>	96
Figura A.2.1. Opción de Paraview para abrir el archivo a analizar.	96
Figura A.2.2. Opción de Paraview para buscar el archivo deseada.....	97
Figura A.2.3. Sección en Paraview <i>Pipeline Browser</i>	97
Figura A.2.1.1. Opción de Paraview para selección de filtros.....	98
Figura A.2.1.2. Sección en Paraview del filtro a mostrar.	98
Figura A.2.1.3. Ventana <i>Properties</i> del filtro seleccionado.	98
Figura A.2.1.4. Pestaña <i>Time</i> para seleccionar el instante de tiempo mostrado en pantalla.	99
Figura A.2.1.5. Ventana <i>Color Map Editor</i> de edición de la leyenda.	99
Figura A.2.1.6. Diversas opciones de Paraview de gestión de la información mostrada en pantalla.	100
Figura A.2.1.7. Imagen de mancha de inundación obtenida en la confluencia del río Ebro con el río Gállego cuando se alcanza el caudal pico.....	100
Figura A.2.2.1. Ventana <i>Properties</i> con los parámetros que deben introducirse.	101
Figura A.2.2.2. Imagen de mapa de velocidades obtenida en la confluencia del río Ebro con el río Gállego cuando se alcanza el caudal pico.....	102
Figura B.1. Perfil del cauce.....	105

Capítulo 1. Introducción

Desde que ha habido vida en nuestro planeta, el agua ha sido un elemento fundamental de la misma. La especie humana, por supuesto no ha sido una excepción. Aunque su necesidad del agua ha sido constante, esta se acentúa a partir del Neolítico. Es en el Neolítico cuando, de manera traumática, la forma de interactuar del ser humano con el medio que le rodea cambia; se pasan de las sociedades nómadas a las sociedades sedentarias al abrigo de la aparición y generalización de la ganadería y la agricultura. La revolución agrícola supone un punto de inflexión y no retorno en la historia natural de nuestra especie, al poner a su disposición una mayor cantidad de energía calórica en una misma extensión de terreno. La explosión demográfica que propició la revolución agrícola hace imperiosa la necesidad de asentarse al lado de fuentes naturales de agua para asegurar la supervivencia de todos los miembros de estas nuevas sociedades sedentarias [1].

Pronto aparecieron en la historia más reciente las ciudades, y con ellas, las primeras civilizaciones. Son estas las que empiezan a tener las complejas estructuras sociales necesarias para intentar someter a las fuerzas de la naturaleza y ponerlas a su servicio. La presa de Sadd el Kafara (Figura 1.1), a unos 30 kilómetros al sur de El Cairo, en la actual República Árabe de Egipto, es una buena muestra de ello. Construida por la antigua civilización egipcia en torno al 2 700 a.C. es la primera presa de la que se tiene constancia en la historia escrita, y su función principal era la del control de las avenidas del caudaloso Nilo, que amenazaban periódicamente las cosechas. Contaba con un ancho de base de 98 m y un ancho de coronación de 56 m, su núcleo tenía 32 m de ancho y 60 000 toneladas de tierra y roca. El desconocido faraón que ordenó su construcción no pudo verla completada, pues una excepcional avenida se la llevó por delante durante los trabajos de construcción de la misma [2].



Figura 1.1. Restos de la presa de Sadd el Kafara, en Egipto.

Producto del progreso posterior es la gigantesca presa de las Tres Gargantas, situada en el curso del río Yangtsé en la República Popular China (Figura 1.2). Esta presa, cuya construcción ha supuesto la reubicación de 1.4 millones de personas y la pérdida por inundación de 600 km² de suelo firme; protege, según el gobierno chino, a 15 millones de personas que viven en las zonas de Jiangnan

y Donting y a sus 15 000 km² de tierras de cultivo, además de las zonas densamente pobladas del bajo Yangtsé, en las que se encuentran múltiples redes industriales y 60 000 km² de suelo cultivable en las que viven 80 millones de personas [3].



Figura 1.2. Imagen de un satélite de la NASA en la que se aprecia el progreso y los efectos de la construcción de la presa de las Tres Gargantas.¹

Como puede apreciarse, es una constante en la Historia del ser humano la importancia supina de los ríos y sus cuencas como base fundamental sobre la que se asientan nuestras sociedades, y se entenderá que su correcto cuidado y entendimiento es de máximo interés para asegurar nuestra supervivencia y necesidades. Es por ello que el estudio de los elementos que influyen en las inundaciones de los mismos fundamental para prevenir daños materiales y pérdidas de vidas humanas irreversibles. Entre las técnicas de estudio de las inundaciones se encuentran las simulaciones por ordenador, base y fundamento del presente trabajo.

Los datos, por sí solos, pueden ilustrar la capital importancia de esta labor. De acuerdo al Nuevo Atlas [4] de la Organización Meteorológica Mundial, entre el período de tiempo comprendido entre los años 1970 y 2019, el 44% de los desastres naturales reportados fueron por causa de inundaciones, las cuales ocasionaron la muerte de aproximadamente 330 000 personas, así como pérdidas económicas estimadas en más de 1.1 billones de dólares (Figura 1.3).

¹ Imagen extraída de 'El proyecto de las Tres Gargantas de China: su historia y sus consecuencias', Jordi López-Pujol, 2008.

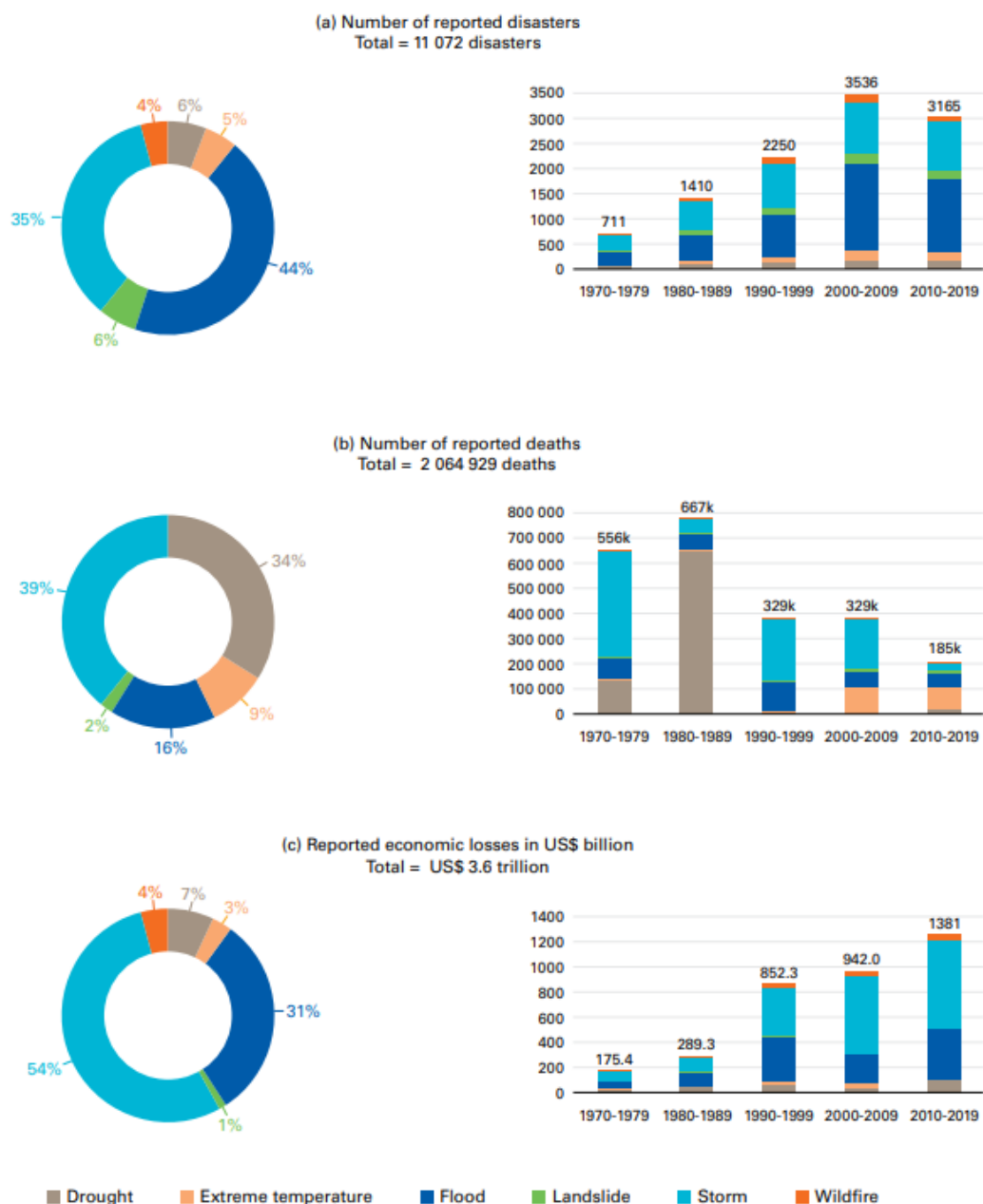


Figura 1.3. Desastres naturales desglosados según su tipo y pérdidas humanas y económicas provocadas por los mismos en el período de tiempo comprendido entre 1970 y 2019. Fuente: Nuevo Atlas de la MMO.

Bajo líneas generales, son los países con menos recursos los que más pérdidas humanas han de lamentar generadas por estos desastres; pues no disponen de medios para evitarlas, pero paradójicamente esta falta de medios es la que hace que estos no generen tantas pérdidas económicas como sí lo hacen en los países desarrollados. El huracán Katrina, acaecido en 2005, produjo pérdidas por valor de más de 160 billones de dólares a los Estados Unidos de América. En este aspecto, fue el desastre natural más ruinoso de los últimos 50 años.

Al tratarse de una problemática internacional, en la conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, celebrada en Río de Janeiro en el año 2012 nacen los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS por sus siglas);

estos consisten en una colección de 17 objetivos globales (Figura 1.4) estrechamente ligados entre sí y orientados a la preservación y cuidado del medioambiente, el fin de la pobreza y una prosperidad económica a nivel global. Encuadrado en este ámbito se encuentra la cuestión referida de las inundaciones, en el objetivo número 6, 'Agua y saneamiento'².



Figura 1.4. Los 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible fijados por Naciones Unidas.

A pesar de todo, por nuestra cercanía y familiaridad conviene dejar a un lado la lupa global y tomar la local para tomar plena conciencia de que no es un problema que nos sea ajeno. Las inundaciones son el desastre natural que mayores daños genera en España. De acuerdo al Consorcio de Compensación de Seguros y el Instituto Geológico y Minero de España, los daños por inundaciones en nuestra patria se estiman en total en una media de 800 millones de euros anuales. Por dar más contexto a estos datos, sólo en bienes asegurados, en el período 1971-2020, según las estadísticas del Consorcio, el 45.7 % de los expedientes tramitados han sido debidos a daños por inundaciones, que han supuesto el 64.6 % del total de las indemnizaciones, las cuales, de media, suponen cerca de 140 millones de euros cada año [5] (Figura 1.5).

² <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/water-and-sanitation/>

K. RESUMEN DE TODOS LOS AÑOS
SERIE 1971 - 2020

Importes en euros actualizados a 31-12-20

CAUSA	Nº de Expedientes	%	Indemnizaciones	%	Costes Medios
Inundación	765.498	45,7	7.159.855.377	64,6	9.353
Terremoto	43.569	2,6	547.279.682	4,9	12.561
Tempestad Ciclónica Atípica	808.737	48,3	2.128.213.939	19,2	2.632
Caída de Cuerpos Siderales y Aerolitos	3	0,0	103.656	0,0	34.552
Terrorismo	30.169	1,8	538.100.580	4,9	17.836
Motín	153	0,0	1.165.592	0,0	7.618
Tumulto Popular	6.733	0,4	84.750.050	0,8	12.587
Hechos o actuaciones de las FF.AA.	2.196	0,1	4.338.086	0,0	1.975
Varios	18.946	1,1	625.337.244	5,6	33.006
TOTAL	1.676.004	100	11.089.144.207	100	6.616



Figura 1.5. Estadística de siniestralidad, daños en los bienes. Número de expedientes, indemnizaciones y costes medios por año de ocurrencia según causa del siniestro.

En el caso de la Comunidad Autónoma de Aragón, se encuentra la última crecida del río Ebro, acaecida en Diciembre del año 2021. Las primeras estimaciones de la Unión de Agricultores y Ganaderos de Aragón hablan de 15000 hectáreas de cultivo arrasadas por la catástrofe, con sus correspondientes pérdidas millonarias. Además, 2 personas perdieron la vida como consecuencia de la misma.

En el año 2007, la Unión Europea establece la Directiva 2007/06/CE relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación. La implantación de esta Directiva supuso una oportunidad para mejorar la coordinación de todas las administraciones a la hora de reducir estos daños, centrándose fundamentalmente en las zonas con mayor riesgo de inundación, las llamadas Áreas de Riesgo Potencial Significativo de Inundación (ARPSIs)³. La metodología para generar los mapas de peligrosidad se recoge en la Guía Metodológica para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas

³ <https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/gestion-de-los-riesgos-de-inundacion/>

Inundables. Dentro de estas áreas de riesgo referidas se encuentra la Demarcación del Ebro, que es donde se sitúa el área de estudio del presente trabajo.

Establecida la importancia y gravedad de la problemática que generan las inundaciones se justifican la realización de estudios de todo tipo que tengan a bien entender mejor su naturaleza para ayudar a mitigar las pérdidas de las mismas. El presente trabajo se hace con esta intención, empleando para ello las herramientas digitales que la modernidad ha puesto a nuestro alcance. Se recurre así a la simulación numérica para determinar el valor de los caudales, velocidades y alturas de agua en diferentes situaciones en la confluencia del río Ebro con el río Gállego y los alrededores, recurriendo para ello a RiverFlow2D, un motor de cálculo de elevado rendimiento para cálculos precisos en proyectos de estudios de ríos y estuarios. Recurriremos también al pre-procesador de datos QGIS, que nos facilitará mucho la tarea de lanzar las simulaciones pertinentes en RiverFlow2D; y por último recurriremos a Paraview, una aplicación de código abierto que nos ayudará a interpretar mejor algunos ficheros de datos que obtendremos como resultado de nuestro trabajo de simulación.

En el capítulo 2 del presente trabajo se expondrá el planteamiento del problema. Los capítulos 3, 4 y 5 presentan de formada ordenada el proceso de calibración del modelo y su posterior uso para la simulación de avenidas históricas. Por último, en el capítulo 6, la extracción de conclusiones.

Capítulo 2. Planteamiento del problema

El área de estudio comprende un área geográfica que cubre una parte concreta de la cuenca hidrográfica del Ebro (Figura 2.1).

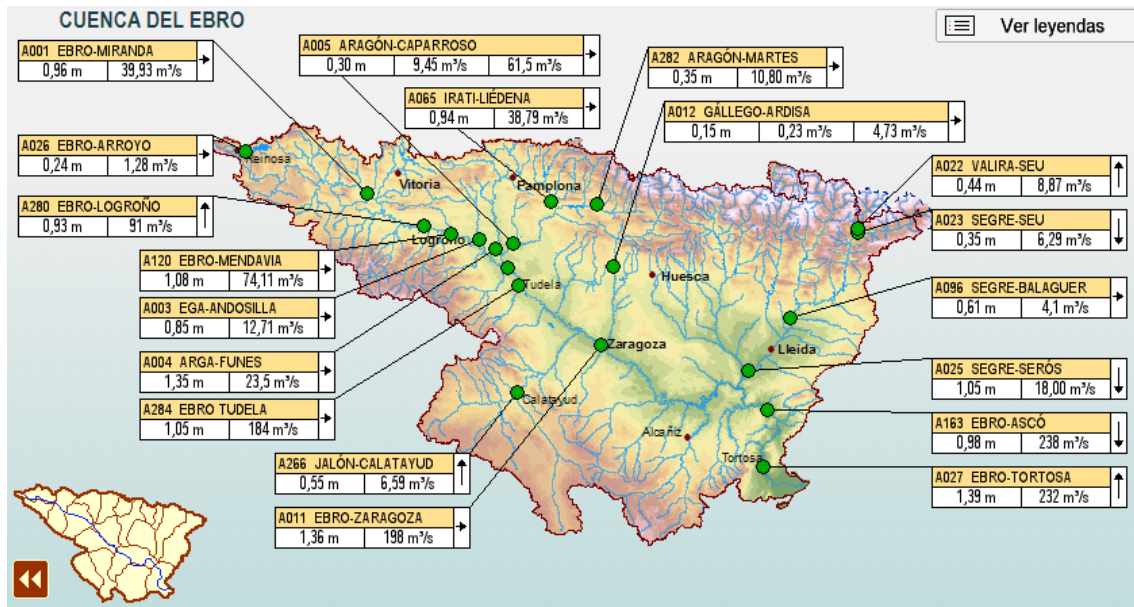


Figura 2.1. Cuenca hidrográfica del Ebro con algunas de las estaciones de aforo más importantes. Fuente: SAIH Ebro.

Para la parte de calibración del modelo, se ha partido de un dominio de estudio relativamente extenso, que comprende la estación de aforo A012 del río Gállego, en Ardisa, al Norte (Figura 2.2); la estación A296, del río Ebro en Alagón (Figura 2.3), al Oeste; y la estación A263 del río Ebro en Gelsa, al Este (Figura 2.4).

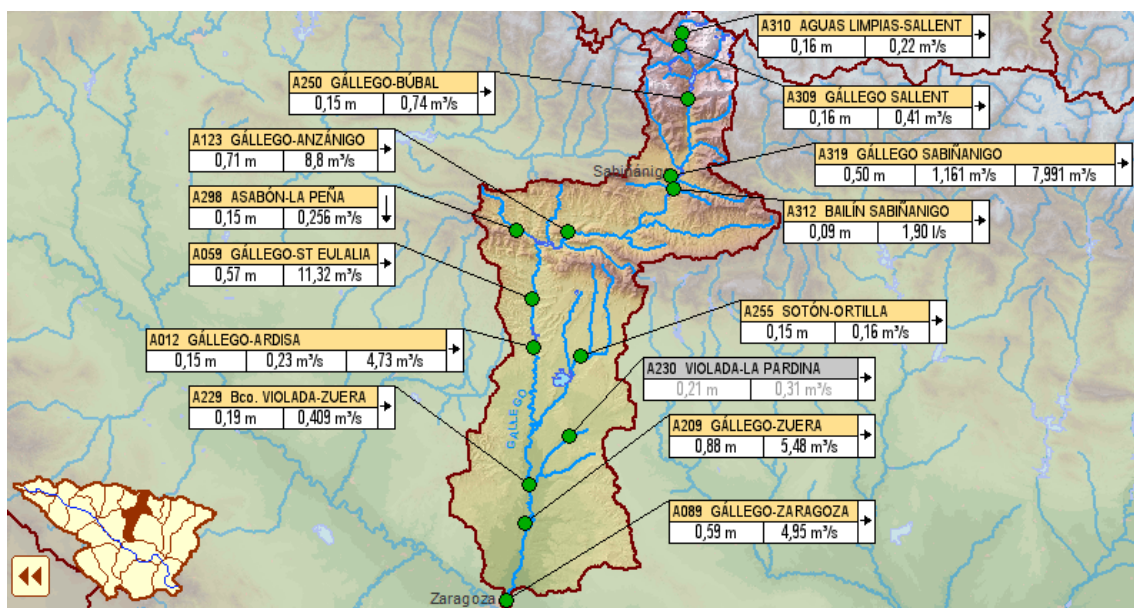


Figura 2.2. Cuenca del Gállego. Fuente: SAIH Ebro.

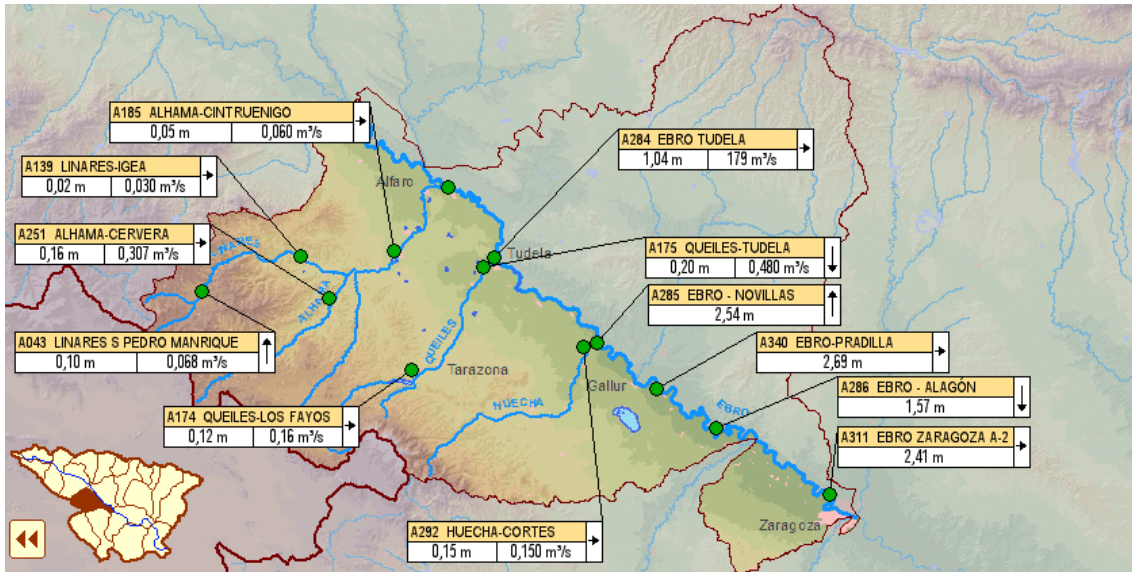


Figura 2.3. Margen derecha del río Ebro. Se aprecia la estación de Alagón, la última antes de llegar a Zaragoza. Fuente: SAIH Ebro.

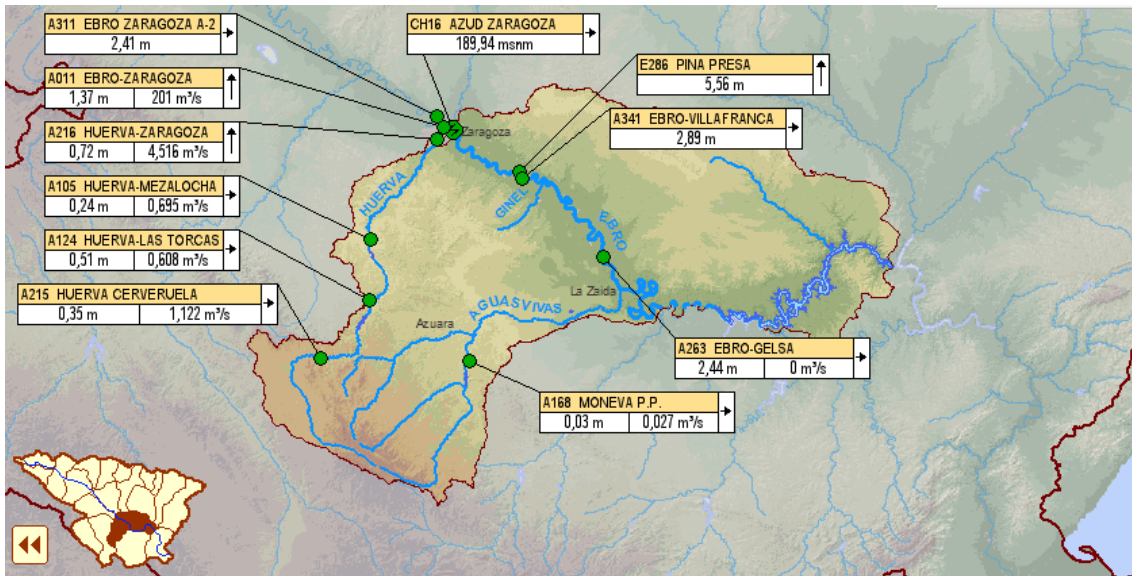


Figura 2.4. Sección del Huerva-Aguas Vivas. Gelsa es la última estación de aforo en tierras aragonesas. Fuente: SAIH Ebro.

Para el análisis detallado del estudio de la confluencia, el área de estudio se reduce: se pasa a considerar la franja de terreno comprendida entre la estación de aforo A208 del río Gállego en Zuera (Figura 2.2), la estación A296, del río Ebro en Alagón, al Oeste (Figura 2.3); y la localidad de Pina de Ebro, al Este (Figura 2.4). Tomando como referencia la Figura 2.4, Pina de Ebro se encuentra a mitad de camino entre la Presa de Pina y la estación de aforo del río Ebro en Gelsa.

Para apreciar mejor las áreas de estudio referidas se adjuntan dos figuras: la Figura 2.5 y la Figura 2.6, extraídas de la visión del dominio de simulación usado en cada caso: completo y reducido. La mancha de color azul que se puede observar en la confluencia del río Ebro con el río Gállego corresponde a la ciudad de Zaragoza.

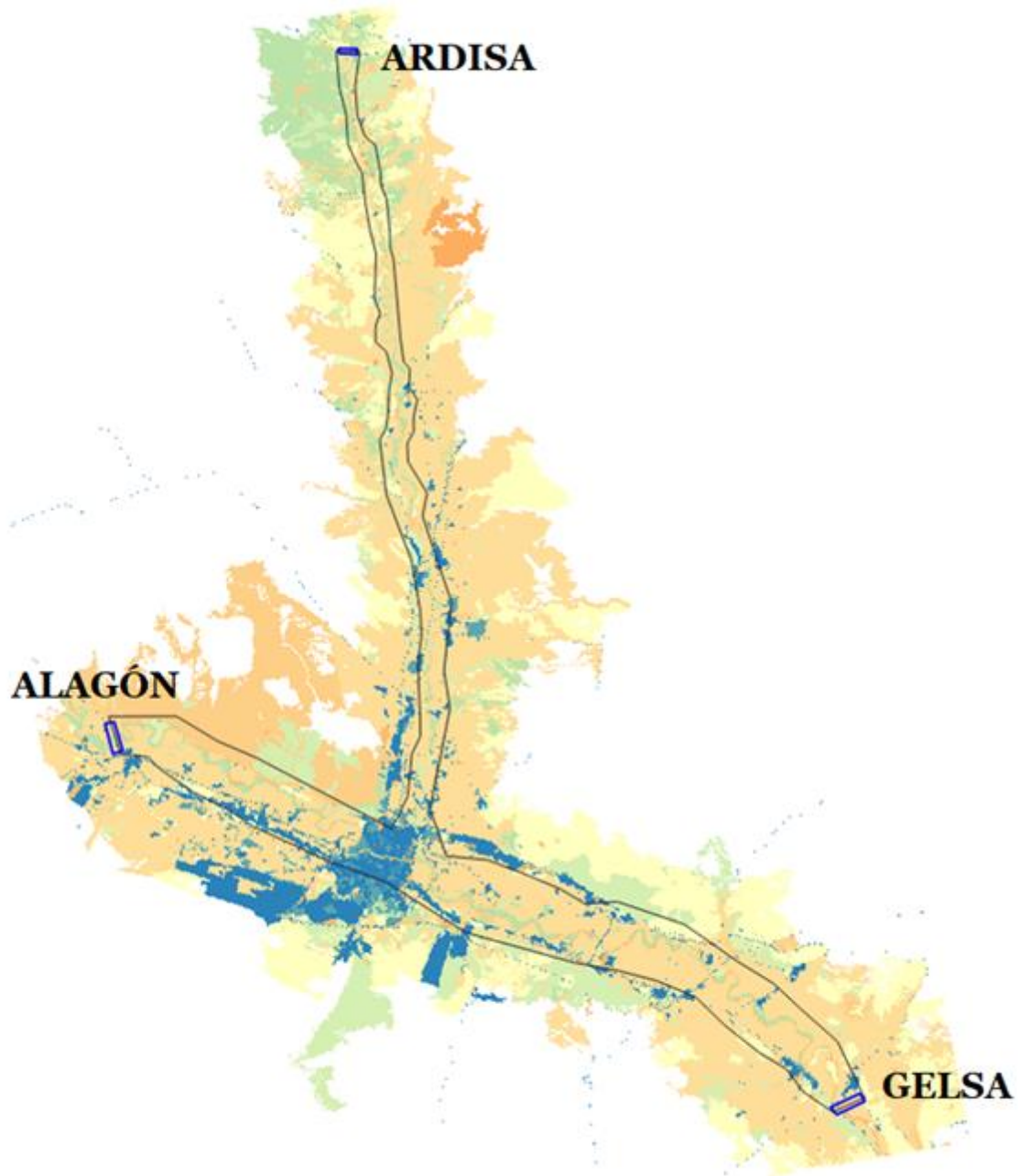


Figura 2.5. Extensión del dominio del modelo numérico.

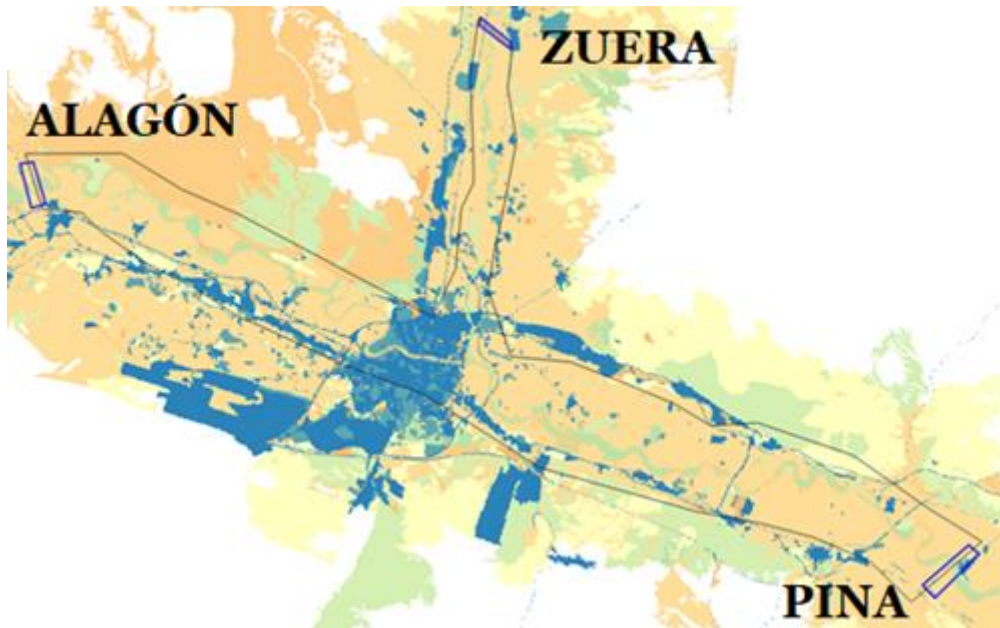


Figura 2.6. Extensión del dominio del modelo reducido para el análisis detallado de la confluencia.

Se puede observar que en ambas Figuras 2.5 y 2.6, en los extremos del dominio, hay unos rectángulos azules, que marcan las zonas en las que estableceremos condiciones de contorno de entrada o salida de flujo. En el resto de líneas que delimitan el dominio de cálculo se establecerán condiciones de contorno de tipo pared; ya que se elige un dominio lo suficientemente grande para que el flujo de agua nunca llegue a este contorno. En la Figura 2.5, en Alagón y en Ardisa se impondrán las condiciones de contorno de entrada de flujo a través de hidrogramas de avenida, que reflejan la evolución temporal del caudal registrado durante un evento de avenida. En la Figura 2.6, son Alagón y Zuera las que desempeñan este papel. En Gelsa y Pina (Figuras 2.5 y 2.6) se establecerán las condiciones de contorno de salida de flujo, para las que se ha elegido una condición de tipo flujo libre.

Las estaciones de aforo suponen la base fundamental para realizar el presente estudio. En ellas se registran los datos de nivel de los cursos de los ríos, datos a partir de los cuales se obtienen valores estimados de caudal¹. De dichas estaciones se han extraído los datos necesarios para construir los hidrogramas que hemos introducido como condiciones de contorno de entrada de nuestra simulación para obtener los resultados correspondientes y también se han utilizado para comparar los resultados de las simulaciones con los valores observados de estas variables.

¹ No debe de perderse de vista que las estaciones de aforo solo miden el nivel de agua que está circulando por una sección determinada. Mediante una ley de equivalencia que se denomina curva de gasto se realizan las estimaciones de los caudales que se suponen que están atravesando la sección en cuestión.

Capítulo 3. Calibración del modelo

Antes de analizar en detalle el comportamiento del flujo en la confluencia de los ríos Gállego y Ebro, se ha procedido a calibrar el modelo físico para garantizar que los resultados de la simulación sean lo más fiables y cercanos a la realidad. Para ello, se comparan resultados numéricos de la simulación de eventos de avenida pasados de los que se disponen medidas; y se analiza, si es adecuado partir de una condición inicial de lecho seco o de un estado estacionario con caudal constante. También se estudiará si es mejor considerar un coeficiente de rozamiento constante en todo el dominio o una distribución de distintos valores de coeficientes de rozamiento, según los usos del suelo que haya en el dominio de cálculo. En base a lo último, se tratará de determinar cuál es el valor más adecuado del coeficiente de rozamiento en el cauce del río. Todos estos casos se analizarán para el evento de avenida de 2018 y, posteriormente, se analiza una avenida más reciente, la del 2021, con las hipótesis más adecuadas resultado de las calibraciones anteriores. Por último, se elige un dominio de cálculo más pequeño, centrado en la confluencia y con un número de celdas muy alto para analizar en detalle el patrón de flujo en la confluencia ante un evento de avenida.

3.1. Influencia de la condición inicial en el río Gállego

En primer lugar, se va a analizar el caso de la crecida que sucedió en el año 2018 en el río Gállego. Para ello, se harán dos simulaciones. En ambas se introducirán como datos de contorno de entrada la evolución temporal del caudal en Ardisa, según las medidas tomadas en la estación A012 del río Gállego en este punto para el período de tiempo comprendido entre el 07/Abril/2018 a las 0:00 horas hasta el 29/Abril/2018 a las 0:00 horas, con lo que el tiempo de estudio de nuestra simulación es de 528 horas.



Figura 3.1.1. Hidrograma de entrada introducido en la condición de contorno del río Gállego.

Al centrarnos en primer lugar en la modelización del río Gállego, la influencia del río Ebro no es muy importante, por lo que se introducirá, como condición de contorno en Alagón, un caudal constante equivalente al primer valor del dato de caudal del río Ebro en Zaragoza, para el período de estudio que hemos referido, que en este caso, será el valor registrado en la estación AO11 del río Ebro en Zaragoza el 07/Abril/2018 a las 0:00 horas.

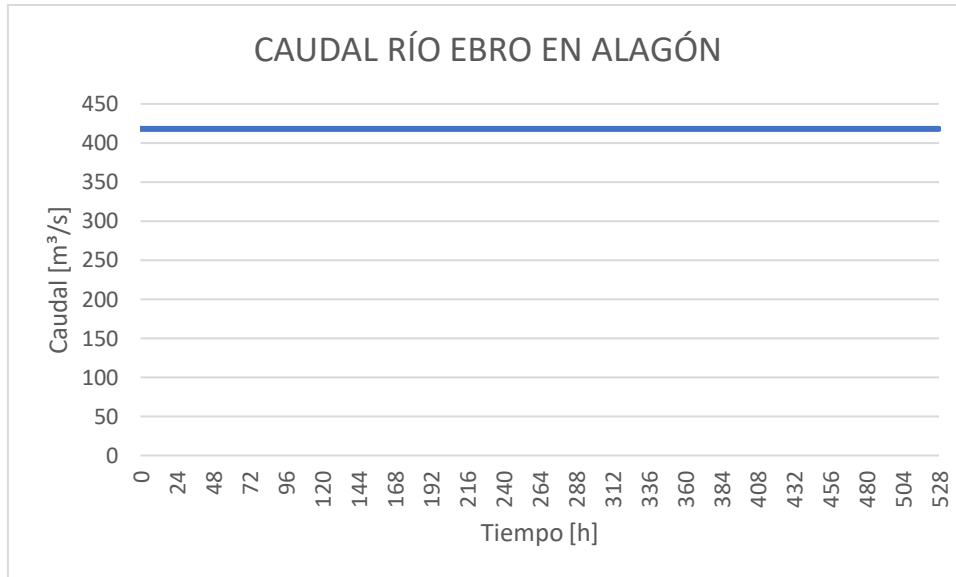


Figura 3.1.2. Hidrograma de entrada introducido en la condición de contorno del río Ebro.

Para esta simulación no se usará un ráster de coeficientes de rozamiento de Manning, si no que se supondrá que su valor es constante en toda el área de estudio, en concreto $n=0.030$. La diferencia entre las dos simulaciones estribará en que una se realizará partiendo de lecho seco en el río Gállego ($h=0$ m), mientras que otra se desarrollará bajo lecho mojado; habiendo calculado anteriormente un estado estacionario con el mismo caudal de entrada. El resultado estacionario obtenido se impone condición inicial. En el río Ebro se sigue el mismo procedimiento.

La simulación sobre lecho seco supone que toda nuestra área de estudio está seca, y la misma sólo empezará a llenarse, según como se configuren los valores de tiempo y caudal en las condiciones de contorno. La simulación sobre lecho mojado, sin embargo, parte de la base de una superficie mojada, en particular, del cauce del río, con más o menos desbordamiento de las llanuras adyacentes según el caudal impuesto.

La obtención de esta superficie mojada requiere de una preparación, como ya hemos indicado anteriormente. Para ello, es preciso hacer una simulación previa introduciendo caudales constantes por las dos condiciones de contorno de entrada (Ardisa para el río Gállego y Alagón para el río Ebro) hasta conseguir que toda la zona de cauces (o una parte muy importante de la misma) sea mojada. La duración de esta simulación, que finaliza cuando en todo el cauce se tiene el caudal constante impuesto en la condición de contorno de entrada, es bastante menor que la de eventos de avenida, y está supeditada al valor de los caudales que introducimos por las condiciones de contorno: a mayores valores,

menor tiempo de simulación será necesario para obtener un estado inicial estacionario. En este caso en concreto, una simulación de 128 horas es suficiente para conseguir el objetivo. Los valores de caudal introducidos son los correspondientes al primer valor de las series de datos de caudal del evento de 2018 registrado en las estaciones AO12 del río Gállego en Ardisa ($Q=10.535 \text{ m}^3/\text{s}$) y de la estación AO11 del río Ebro en Zaragoza ($Q=418 \text{ m}^3/\text{s}$); ya que en Alagón no se dispone de medidas de caudal.

A continuación, se presentan los resultados numéricos obtenidos de las simulaciones en las dos secciones de caudal que hemos colocado para el estudio de este caso y los sucesivos, coincidentes con las estaciones A209 (río Gállego a su paso por Zuera) y AO89 (río Gállego a su paso por Zaragoza) (Figura A.1.4.1). En ambos casos, en las gráficas que se muestran podrá verse el caudal real medido en la inundación de 2018 y el caudal simulado, tanto en la simulación realizada bajo el supuesto de lecho seco como en la de lecho húmedo.

En las Figuras 3.1.3 y 3.1.4 se muestra la evolución temporal del caudal del río Gállego en la localización de Zuera y en la de Zaragoza respectivamente para la avenida de 2018 observada (azul), simulada partiendo de lecho seco (naranja) y simulada partiendo de lecho húmedo (gris). En las Figuras 3.1.5 y 3.1.6 se muestra la evolución temporal del nivel del río Gállego, con las mismas características descritas.

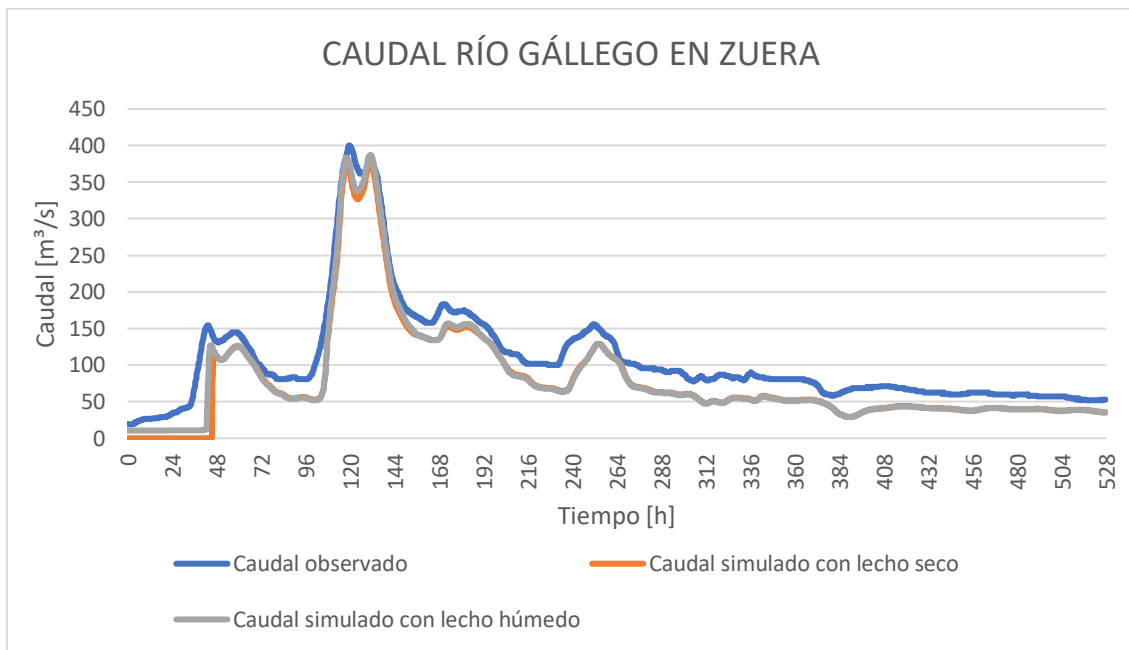


Figura 3.1.3. Evolución temporal del caudal de la avenida de 2018 del río Gállego en la localización de Zuera.

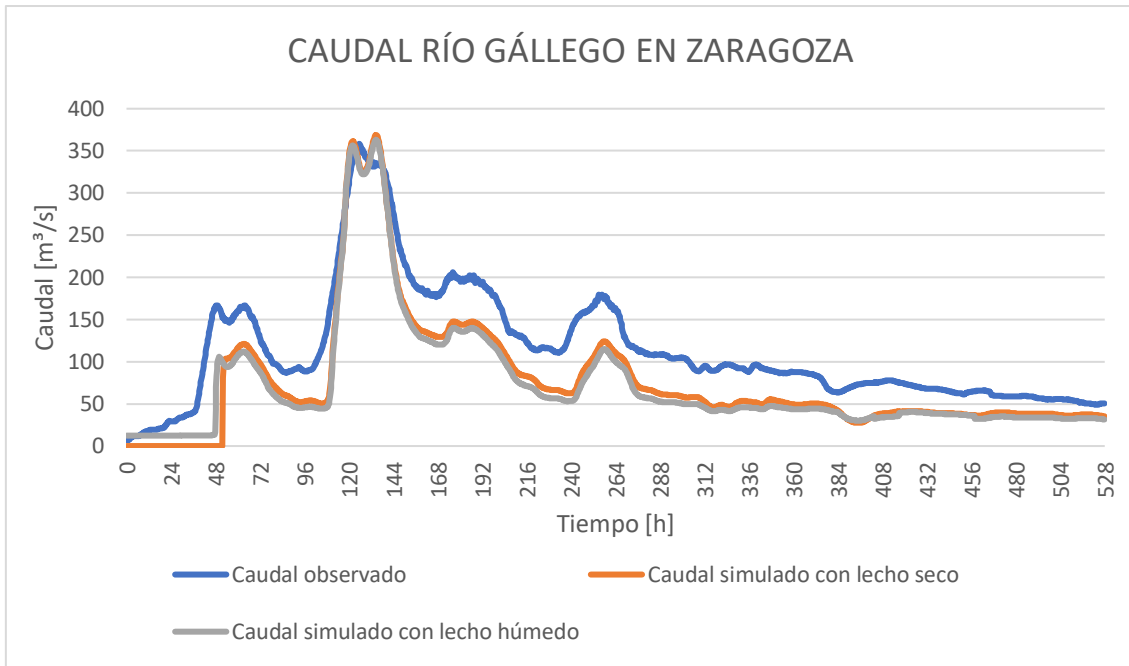


Figura 3.1.4. Evolución temporal del caudal de la avenida de 2018 del río Gállego en la localización de Zaragoza.

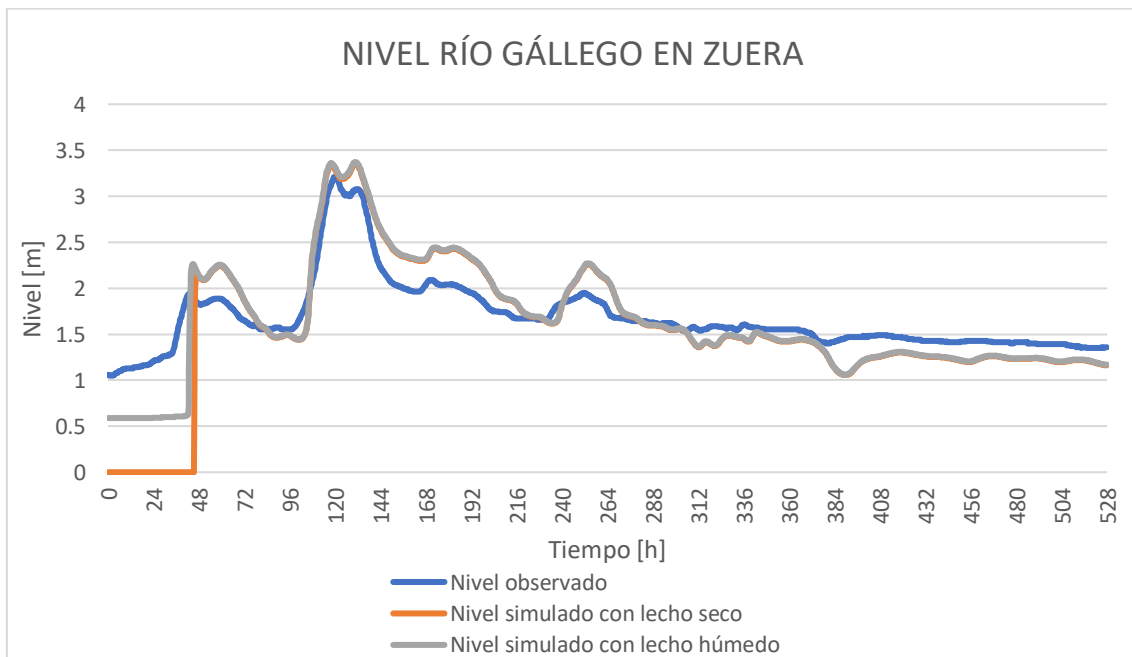


Figura 3.1.5. Evolución temporal del nivel de la avenida de 2018 del río Gállego en la localización de Zuera.

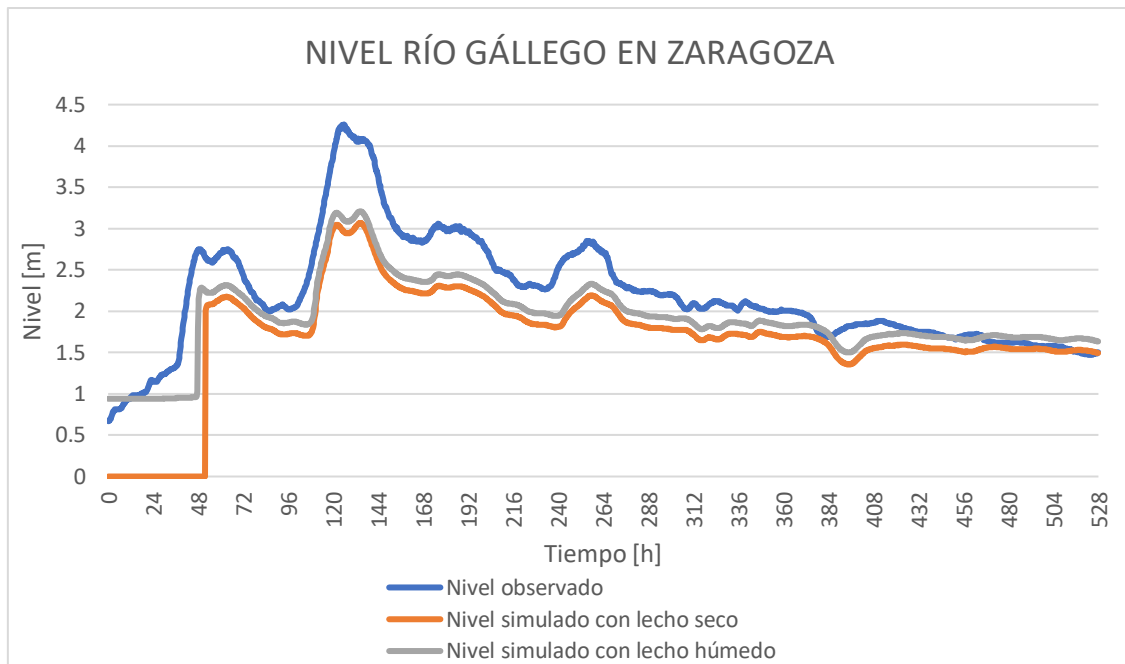


Figura 3.1.6. Evolución temporal del nivel de 2018 del río Gállego en la localización de Zaragoza.

Como puede observarse en las gráficas, existe una elevada coincidencia entre los niveles y caudales simulados y los registrados en las estaciones de aforo. Las líneas que corresponden a las simulaciones son coincidentes con una pequeña diferencia de caudal en Zuera que es mayor en Zaragoza; llegando a simular $50\text{m}^3/\text{s}$ menos que el medido, que sobre los $380\text{ m}^3/\text{s}$ máximos, suponen un error aproximado del 13%. En cuanto a la comparación de las dos simulaciones, para averiguar si es mejor partir de condición inicial de lecho seco o húmedo, vemos que partir sobre lecho seco retrasa la llegada de la onda de avenida 3 horas respecto a las medidas, mientras que partir de lecho húmedo la retrasa un poco menos. Por tanto, se puede concluir que en el río Gállego para simular eventos de avenida, se debería comenzar partiendo de lecho mojado como condición inicial. Partir de lecho húmedo da mejores resultados de nivel, al ser más aproximados a los observados, especialmente en las primeras 50 horas de simulación. Se observa igualmente el retraso de 3 horas de la onda de la avenida respecto a las medidas.

Además de analizar la evolución temporal del caudal en estaciones de aforo, resulta útil comparar mapas superficiales de altura de agua y velocidad de la zona en el tiempo final de la simulación o en el tiempo correspondiente al pico de caudal. En las Figuras 3.1.7 y 3.1.8 se muestra la comparación de los mapas superficiales de altura de agua alrededor de la confluencia partiendo de la condición inicial de lecho seco (arriba) o mojado (abajo) para el tiempo $t=120\text{h}$ (Figura 3.1.7) correspondiente al pico de caudal máximo de la avenida de 2018 y el tiempo $t=528\text{ h}$ (Figura 3.1.8) correspondiente al final de la simulación de la avenida de 2018.

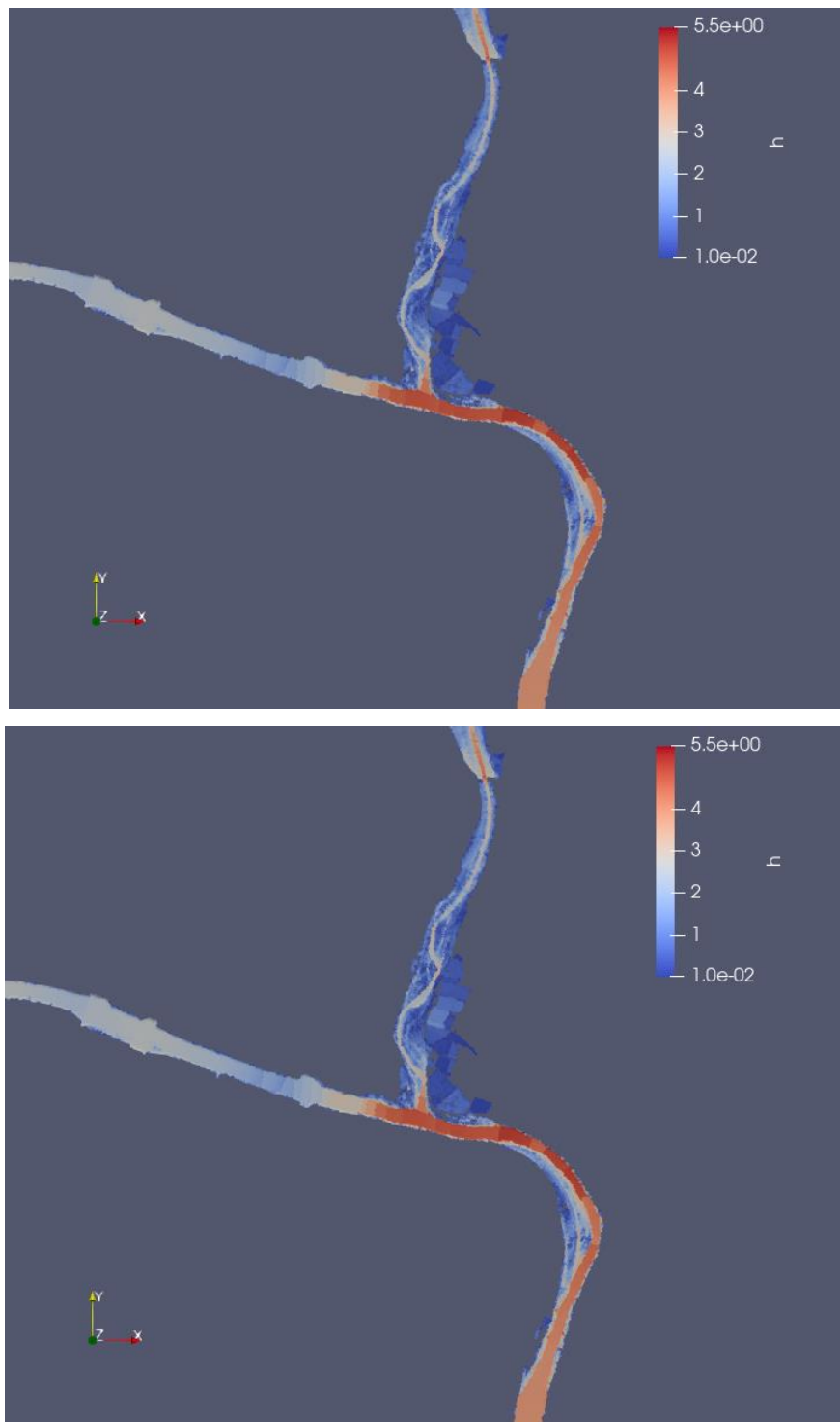


Figura 3.1.7 Mapas superficiales de altura de agua en $t=120$ h alrededor de la confluencia de los ríos Gállego y Ebro partiendo de lecho seco como condición inicial (arriba) o húmedo (abajo).

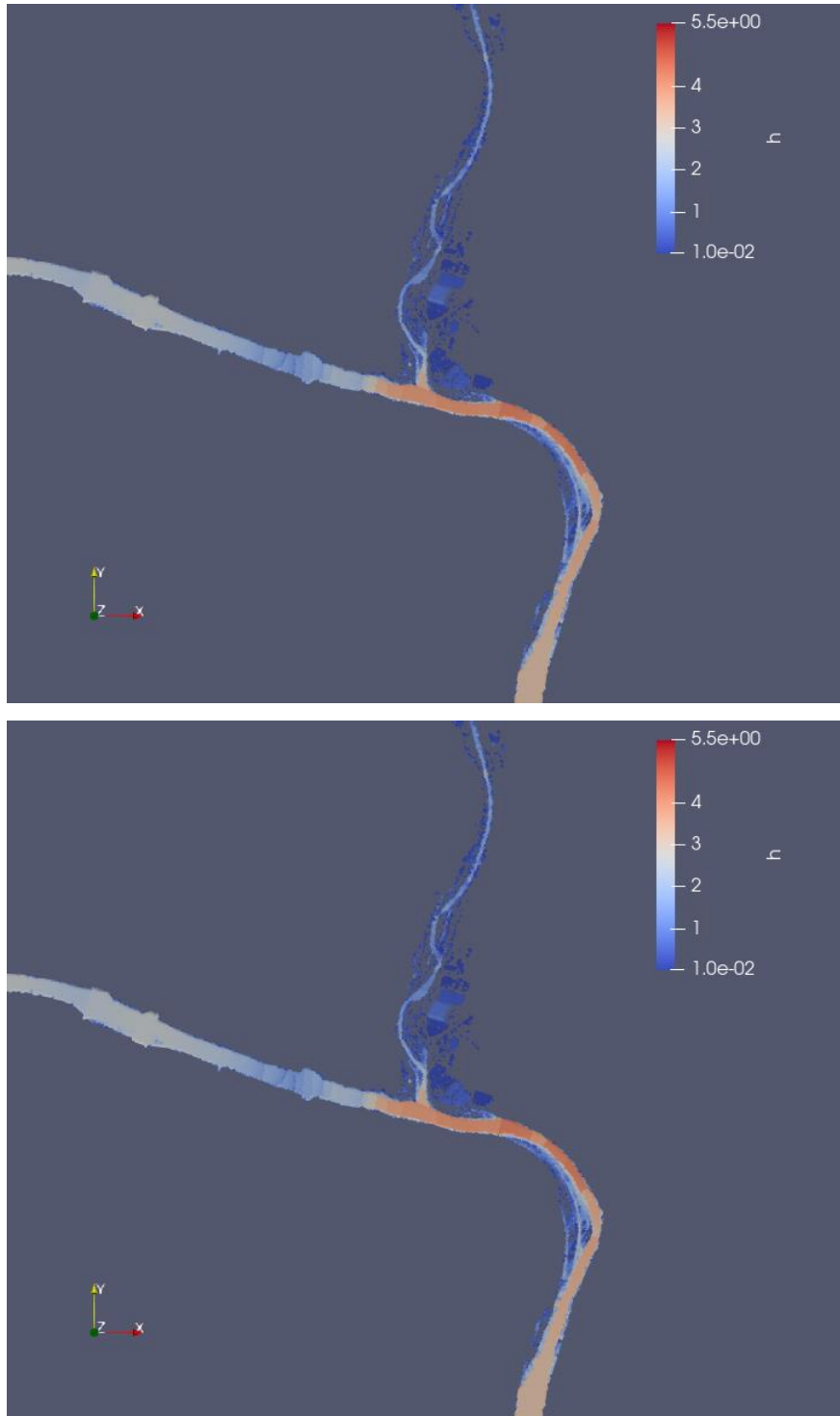


Figura 3.1.8 Mapas superficiales de altura de agua en $t=528$ alrededor de la confluencia de los ríos Gállego y Ebro partiendo de lecho seco como condición inicial (arriba) o húmedo (abajo).

Por otro lado, en las Figuras 3.1.9 y 3.1.10 se muestra la comparación de los mapas de velocidad del flujo alrededor de la confluencia partiendo de la condición inicial de lecho seco (arriba) o húmedo (abajo) para pico de caudal máximo (Figura 3.1.9) con $t=120$ h y para el tiempo $t=528$ h (Figura 3.1.10) correspondiente al final de la simulación de la avenida de 2018.

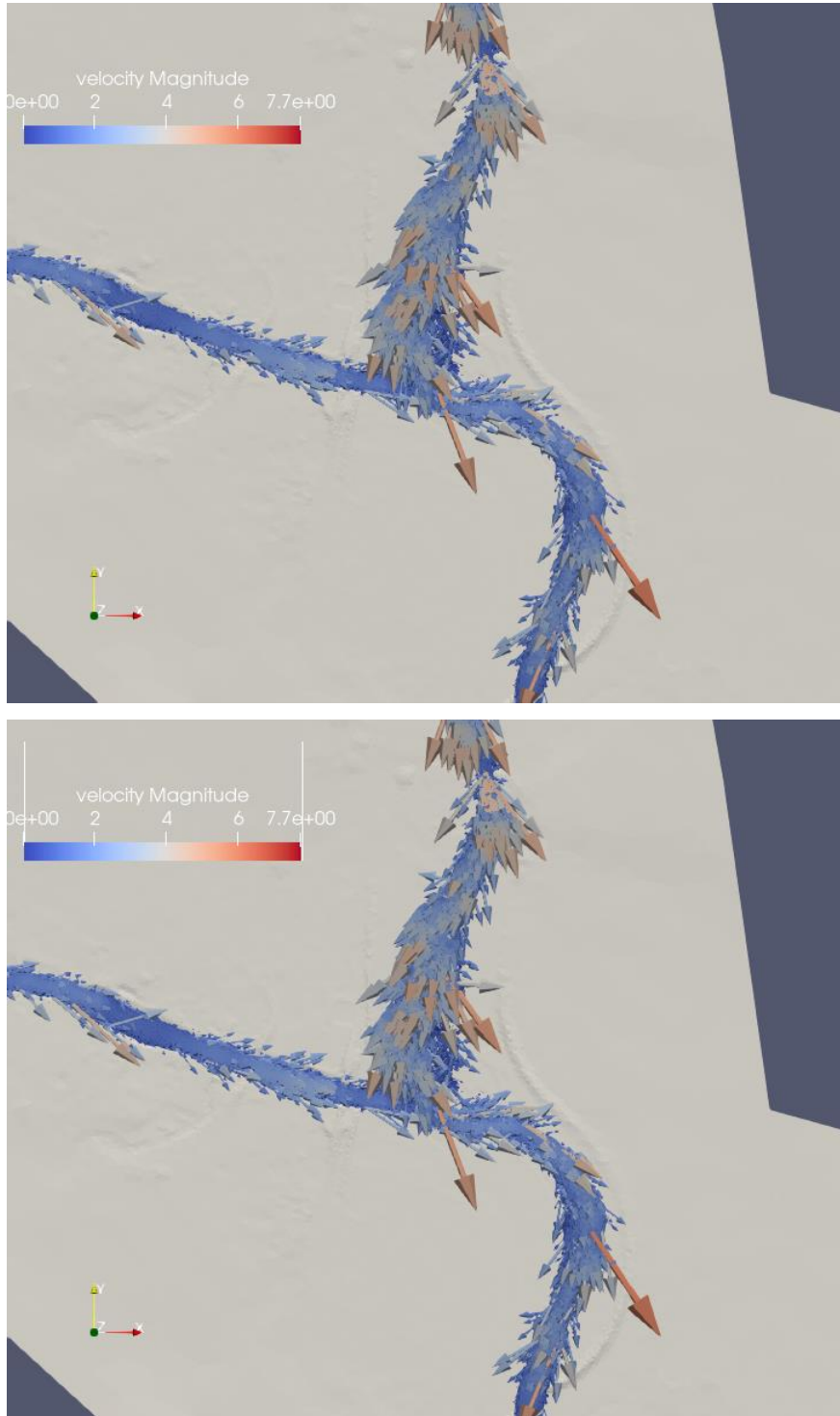


Figura 3.1.9. Mapas de velocidad del flujo alrededor de la confluencia de los ríos Gállego y Ebro en $t=120$ h partiendo de lecho seco como condición inicial (arriba) o húmedo (abajo).

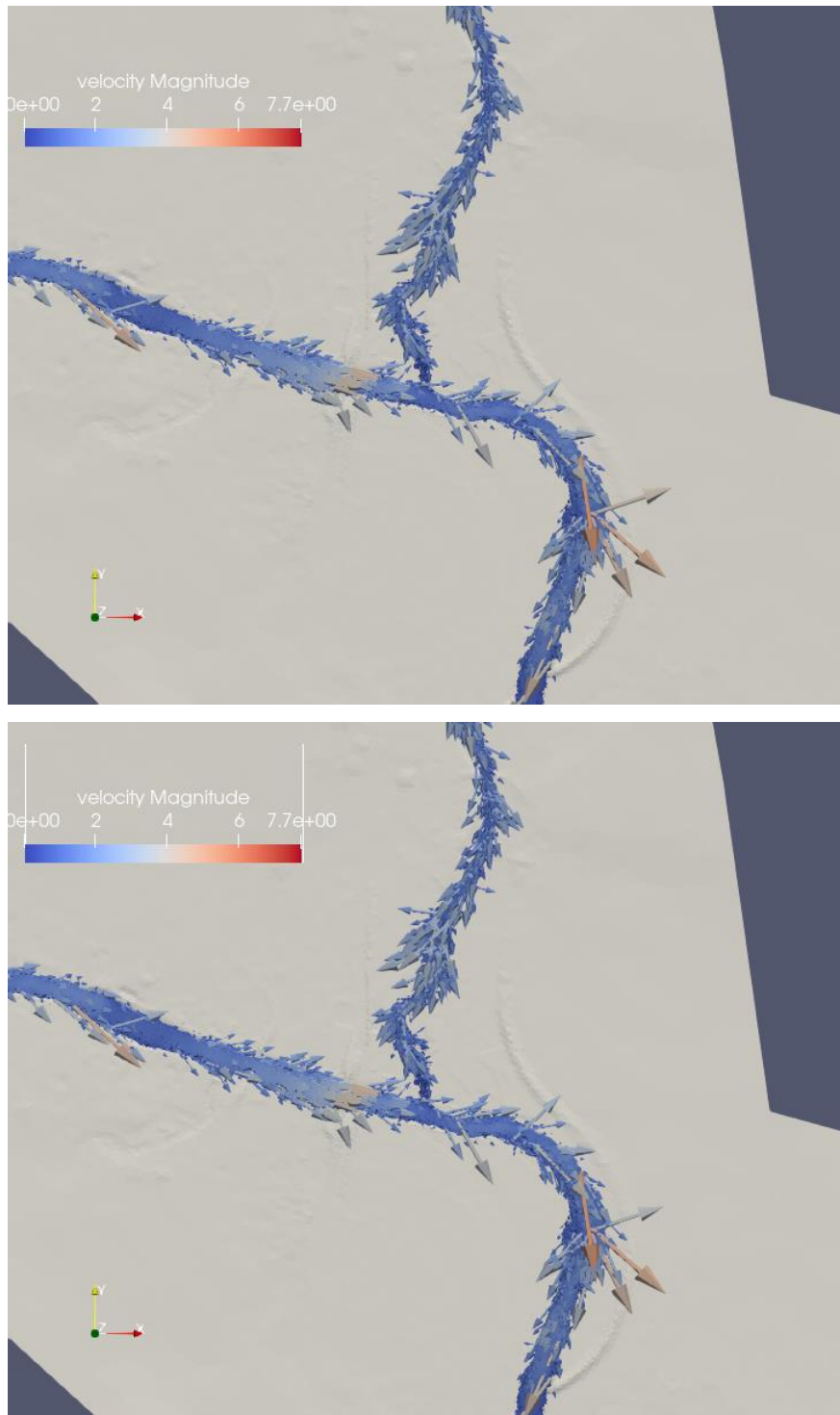


Figura 3.1.10 Mapas de velocidad del flujo alrededor de la confluencia de los ríos Gállego y Ebro en $t=528$ h partiendo de lecho seco como condición inicial (arriba) o húmedo (abajo).

De las figuras anteriores se puede indicar que no se aprecian diferencias en las manchas de inundación o en los vectores y valores de velocidad, por lo que se puede concluir que la condición inicial afecta al tiempo de llegada de la onda de avenida pero no a los valores de altura de agua o velocidad en el dominio.

3.2. Influencia de la distribución de coeficiente de rozamiento

En segundo lugar, se va a proceder al análisis de la influencia del coeficiente de rozamiento de Manning en el área de estudio. Las condiciones temporales de estudio y los caudales introducidos se mantienen con respecto al punto 1: se analizará la avenida de 2018 como condición de contorno de entrada en el río Gállego y como condición de contorno de entrada en el río Ebro se introducirá un caudal constante de valor $Q=414 \text{ m}^3/\text{s}$.

3.2.1. Distribución del coeficiente de rozamiento según usos de suelo

En este apartado, se considerarán dos simulaciones partiendo de la condición inicial de suelo húmedo; ya que en el apartado anterior se ha visto que se ajustaba mejor el tiempo de llegada de la onda de avenida. Esta condición inicial se ha generado previamente, y corresponde a un caudal constante $Q=10.535 \text{ m}^3/\text{s}$ en el río Gállego, y un caudal también constante $Q=414 \text{ m}^3/\text{s}$ en el río Ebro. En la primera simulación, se mantendrá un coeficiente de rozamiento de Manning constante para todo el dominio de valor $n=0.030$, mientras que en la segunda, se empleará una capa ráster de distribución espacial de diferentes valores de coeficientes de rozamiento de Manning en toda nuestra área de estudio.

En las Figuras 3.2.1.1 y 3.2.1.2 se muestra la evolución temporal del caudal del río Gállego en la localización de Zuera y en la de Zaragoza, respectivamente, para la avenida de 2018 observada (azul), simulada con un coeficiente de rozamiento $n=0.030$ constante en todo el dominio de cálculo (rojo) y simulada con una distribución espacial de coeficientes de rozamiento distintos según los usos del suelo (gris).

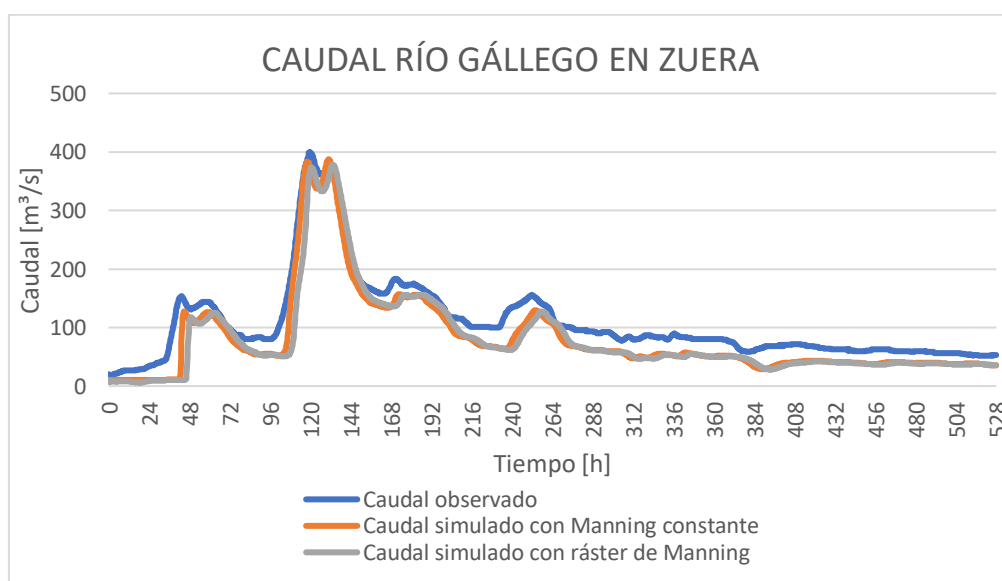


Figura 3.2.1.1. Evolución temporal del caudal de la avenida de 2018 del río Gállego en la localización de Zuera.

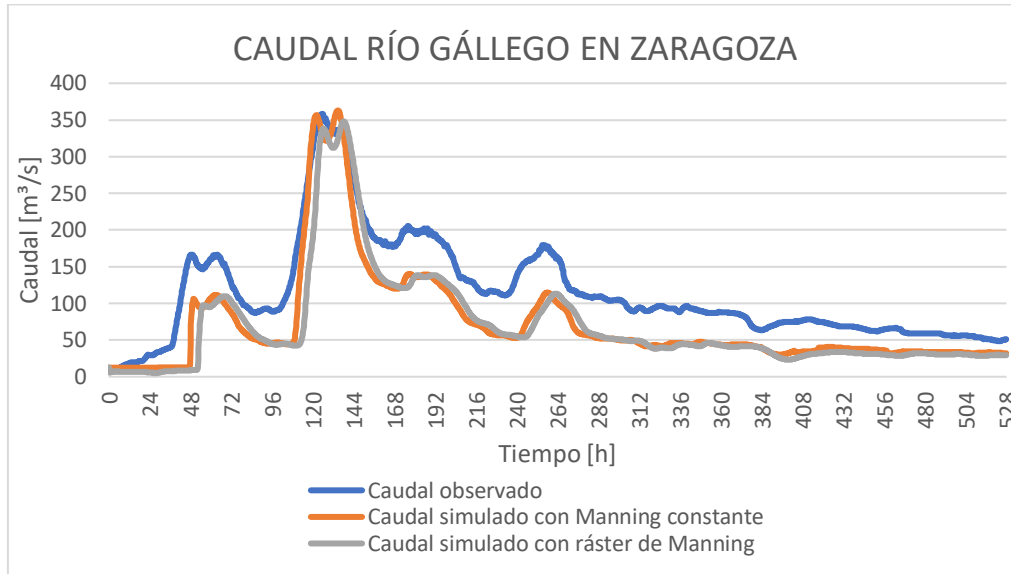


Figura 3.2.1.2. Evolución temporal del caudal de la avenida de 2018 del río Gállego en la localización de Zaragoza.

Como puede apreciarse en las gráficas, una distribución espacial de distintos coeficientes de rozamiento según los usos del suelo hace que las crecidas se demoren en torno a las 3 horas en llegar, con respecto a un coeficiente de rozamiento de Manning constante; y ambas, muestran un retraso de 3 h respecto a lo observado. Sin embargo, señalamos que en el ráster de coeficientes de rozamiento, al cauce se le ha asignado un valor $n=0.040$ que es superior al valor $n=0.030$ aplicado a todo el dominio, y esto provoca que la onda se retrase.

En las Figuras 3.2.1.3 y 3.2.1.4, se muestra la evolución temporal del nivel del río Gállego en la localización de Zuera y en la de Zaragoza respectivamente, para la avenida de 2018 observada (azul), simulada con un coeficiente de rozamiento $n=0.030$ constante en todo el dominio de cálculo (rojo), y simulada con una distribución espacial de coeficientes de rozamiento distintos según los usos del suelo (gris).

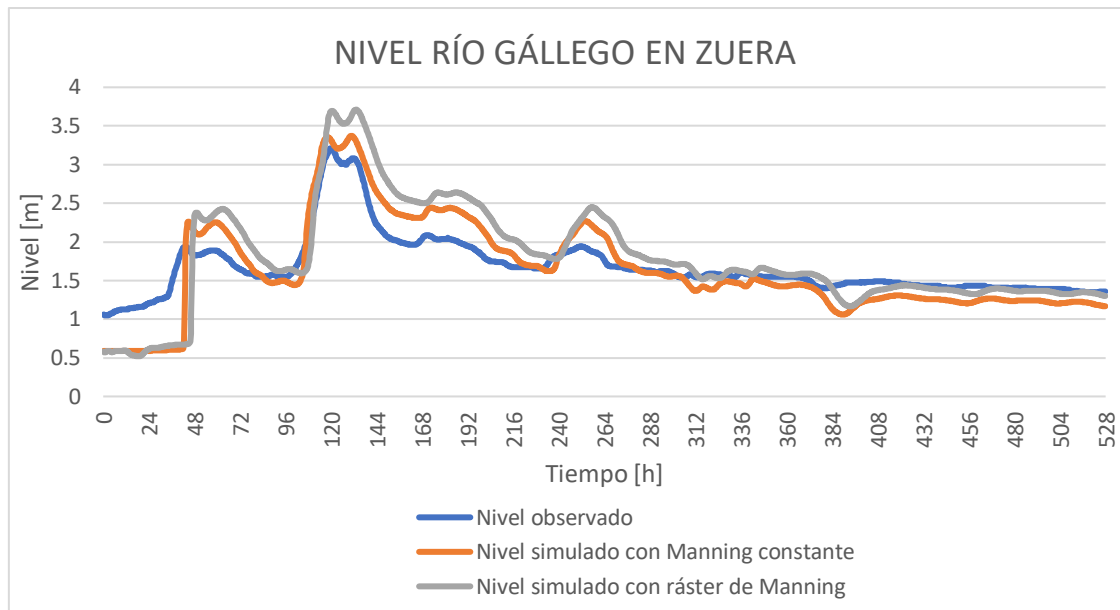


Figura 3.2.1.3. Evolución temporal del nivel de la avenida de 2018 del río Gállego en la localización de Zuera.

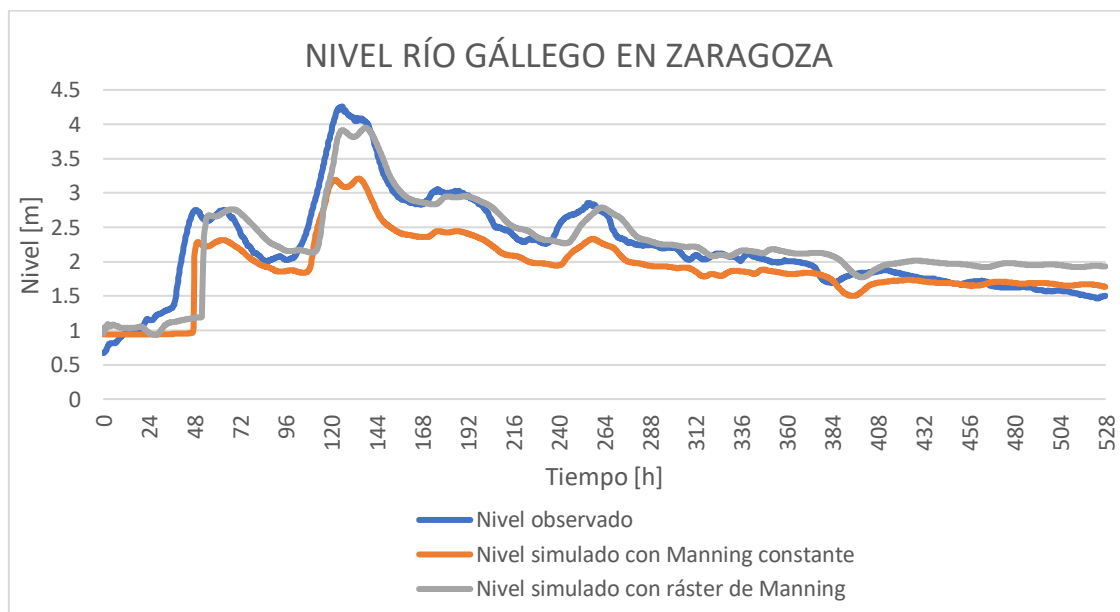


Figura 3.2.1.4. Evolución temporal del nivel de la avenida de 2018 del río Gállego en la localización de Zaragoza.

En el caso de las gráficas de los niveles de altura de agua en el río Gállego a la altura de Zuera y Zaragoza, puede apreciarse como el ráster usado de coeficientes de rozamiento de Manning refina los resultados numéricos de la simulación, obteniendo para la estación del Gállego en Zaragoza unos resultados muy buenos, coincidiendo prácticamente con el nivel de agua observado. En Zuera, esta misma simulación sobreestima el nivel de agua 0.5 m en los picos, que puede ser una cantidad asumible, dado que lo que nos interesa analizar en detalle, y con precisión, es lo que ocurre en la confluencia en Zaragoza. Por este motivo, se elige usar una distribución de coeficientes de rozamiento distribuida espacialmente según los usos del suelo de la zona.

Por otra parte, al igual que en el caso anterior, no es suficiente comparar la evolución temporal de caudales y alturas en determinados puntos del río Gállego, sino que también resulta útil, para realizar un análisis exhaustivo y poder tomar decisiones, comparar los mapas superficiales de altura de agua y velocidad de las dos simulaciones en la zona de la confluencia de los ríos Gállego y Ebro. Así se muestra en las Figuras 3.2.1.5 y 3.2.1.7, correspondiente al caudal máximo, y que a su vez correspondería a la inundación máxima alcanzada; y en las Figuras 3.2.1.6 y 3.2.1.8, para el tiempo final de la simulación.

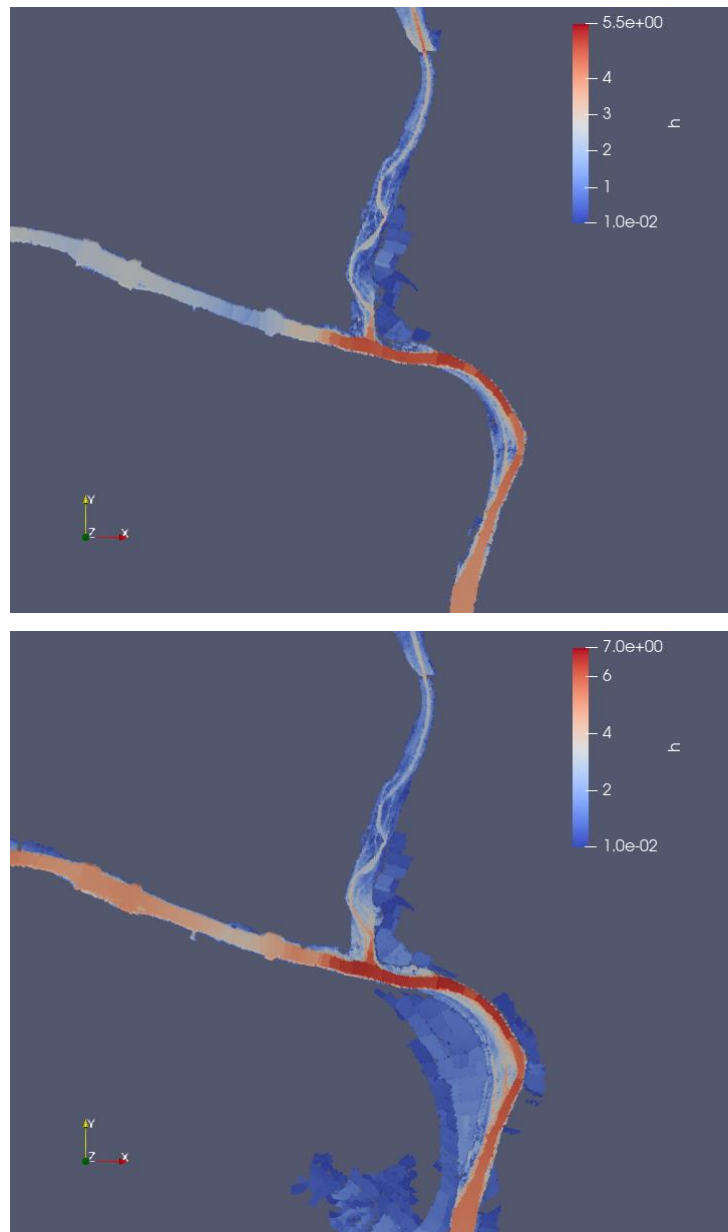


Figura 3.2.1.5. Mapas superficiales de altura de agua alrededor de la confluencia de los ríos Gállego y Ebro en $t=120h$ con un coeficiente de rozamiento $n=0.030$ cte. En todo el dominio (arriba) o con una distribución espacial de coeficientes de rozamiento de Manning según los usos del suelo (abajo).

De la Figura anterior se observa que se produce un desbordamiento de la lámina aguas abajo de la confluencia; en el caso de usar un ráster de coeficientes de rozamiento. Esto es debido a que los coeficientes son más altos en el cauce,

provocando una ralentización del flujo y una elevación de la lámina de agua. De este modo, se inundan las zonas del meandro aguas abajo.

Estos resultados permiten ver la importancia de la simulación numérica en este tipo de eventos, que permite, en el caso de tener bien ajustado el modelo de simulación, predecir qué zonas se van a inundar o no, y qué tipo de medidas de mitigación se pueden proponer para evitarlas. El aumento/disminución de coeficientes de rozamiento puede hacer que el río se desborde o no en esa zona; con lo cual podemos buscar qué tipo de elemento natural podríamos plantar para aumentar/reducir el rozamiento y que el río no se desbordara. Son preferibles medidas de mitigación naturales, aunque también podríamos poner medidas estructurales como un recrecimiento de mota en la zona.

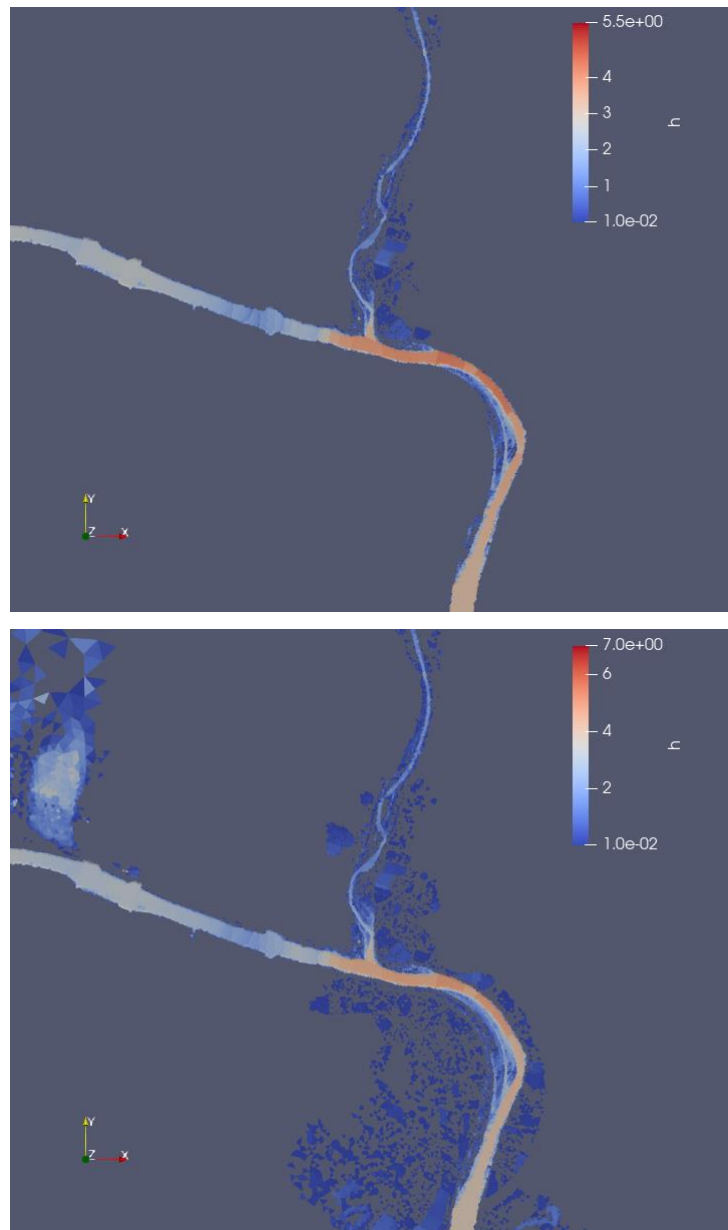


Figura 3.2.1.6 Mapas superficiales de altura de agua alrededor de la confluencia de los ríos Gállego y Ebro en $t=528h$ con un coeficiente de rozamiento $n=0.030$ cte. En todo el dominio (arriba) o con una distribución espacial de coeficientes de rozamiento de Manning según los usos del suelo (abajo).

En el tiempo final de la simulación vemos que la zona que durante el pico de caudal había sido anegada ya se ha ido secando, quedando sólo algunas manchas sueltas de agua con calados muy pequeños, que en la realidad se infiltrarán hacia aguas subterráneas (fenómeno que el modelo no contempla). El efecto de la distribución de coeficientes de rozamiento es también claro respecto a simular todo el dominio con un coeficiente de rozamiento de Manning constante.

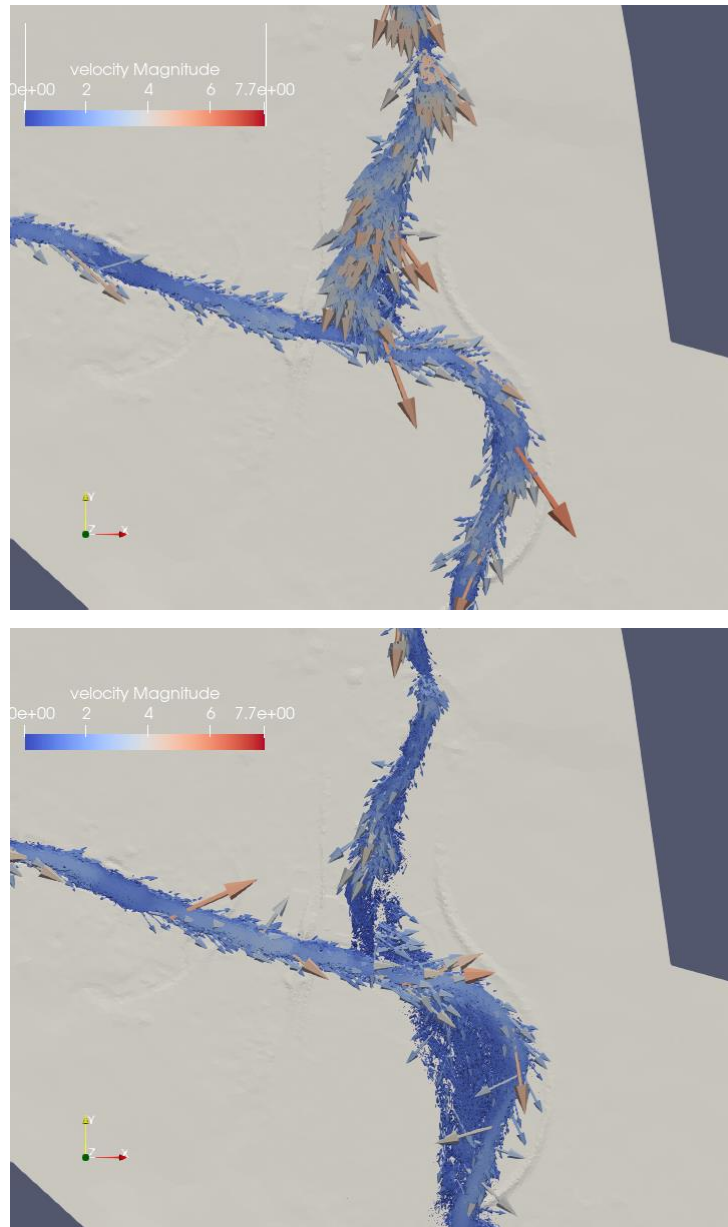


Figura 3.2.1.7. Mapas de velocidad del flujo alrededor de la confluencia de los ríos Gállego y Ebro en $t=120h$ con un coeficiente de rozamiento $n=0.030$ cte. en todo el dominio (arriba) o con una distribución espacial de coeficientes de rozamiento de Manning según los usos del suelo (abajo).

En las Figuras de los mapas de velocidad se aprecia claramente como el flujo de agua que proviene del río Gállego, en el tiempo correspondiente al caudal máximo de la avenida, llega a la confluencia con bastante velocidad, cuando el coeficiente de rozamiento es constante; y por tanto, la altura de la lámina es

menor, no produciéndose desbordamiento en el entorno del mismo; mientras que al poner un mapa de rozamiento distribuido, la velocidad con la que el flujo llega a la confluencia es menor, haciendo que la altura de la lámina de agua aumente, que realmente es lo que ocurre en la realidad; ya que en la Figura 3.2.1.7 se ha demostrado que la simulación con este ráster se aproxima bastante a la realidad de lo observado en la estación de Zaragoza en el río Gállego.

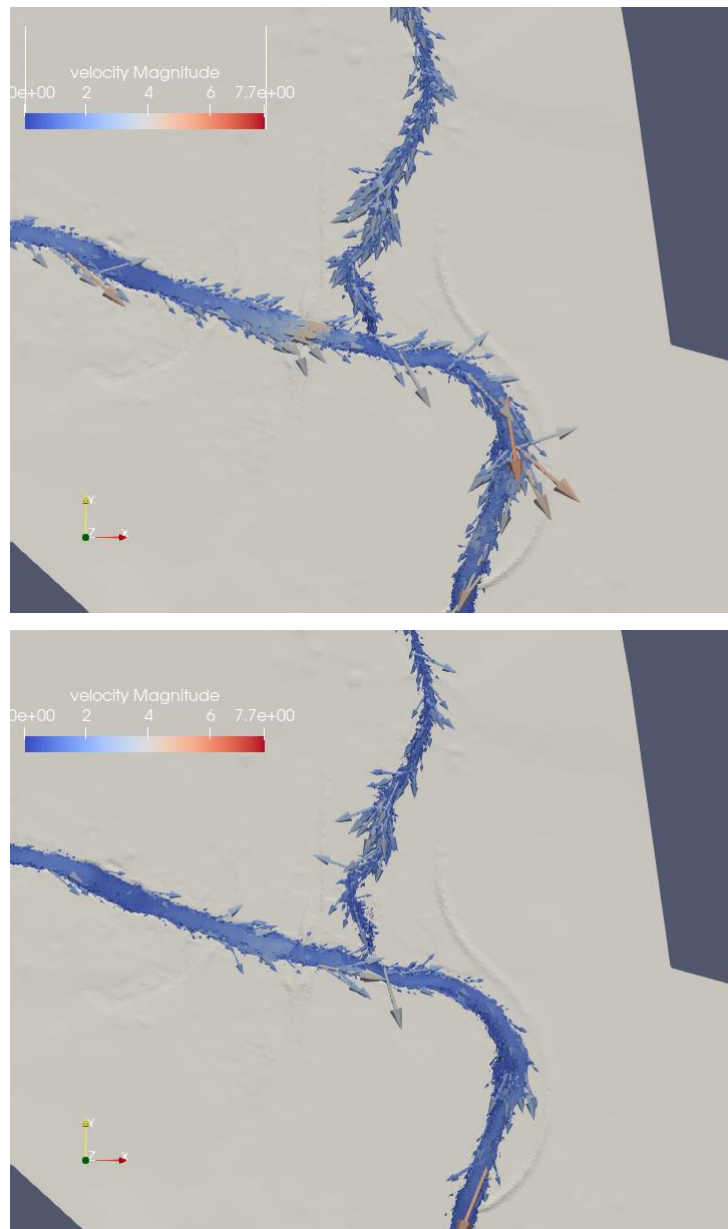


Figura 3.2.1.8 Mapas de velocidad del flujo alrededor de la confluencia de los ríos Gállego y Ebro en $t=528h$ con un coeficiente de rozamiento $n=0.030$ cte. en todo el dominio (arriba) o con una distribución espacial de coeficientes de rozamiento de Manning según los usos del suelo (abajo).

En el tiempo final de la simulación, se reproduce el mismo comportamiento que en el tiempo correspondiente al caudal pico de la avenida. Se puede concluir que la distribución de rozamientos espacial, según los usos del suelo, es más realista y reproduce mejor la situación real.

3.2.2. Distribución del coeficiente de rozamiento en el cauce

Una vez analizado cómo influye el coeficiente de rozamiento en todo el dominio de estudio, se procede a realizar un análisis más detallado de los valores óptimos que debería tomar este coeficiente de rozamiento de Manning en el cauce del río Gállego. Al igual que en los casos anteriores, los resultados de las simulaciones se compararán con las medidas observadas. En lo referente a las condiciones temporales de estudio y a los caudales, se va ahora a introducir también caudal en el río Ebro por nuestra condición de contorno de Alagón. Entre el período de tiempo comprendido entre el 07/Abril/2018 a las 0:00 y el 23/Abril/2018 se han tomado las medidas registradas de caudal en la estación de aforo A286 del río Ebro en Alagón y en la estación A012 del río Gállego en Ardisa: las dos son nuestras condiciones de entrada de caudal que se han descrito en anteriores apartados. Este intervalo temporal nos da una duración de la simulación de 384 horas. Consideraremos las simulaciones partiendo de la condición inicial de suelo húmedo con las mismas características que se han descrito en el apartado 3.2.1.

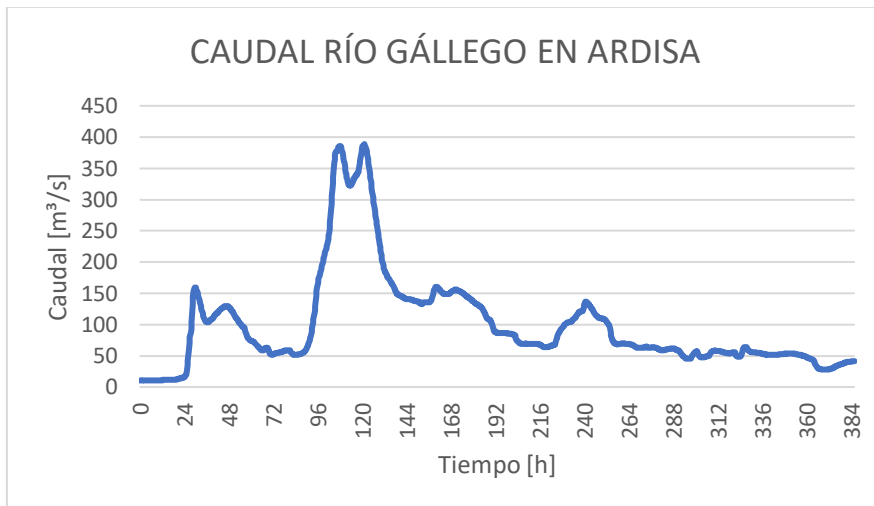


Figura 3.2.2.1. Hidrograma de entrada introducido en la condición de contorno del río Gállego.

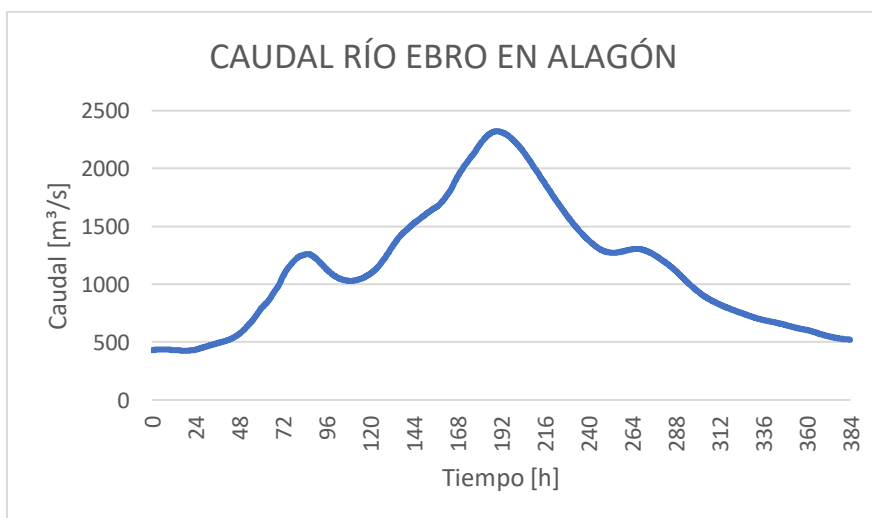


Figura 3.2.2.2. Hidrograma de entrada introducido en la condición de contorno del río Ebro.

Se procederá a realizar 3 simulaciones, todas ellas empleando el ráster de coeficientes de rozamiento de Manning que se ha generado para el análisis de nuestro problema, pero cambiado el valor del coeficiente de rozamiento de Manning para las zonas de curso de agua (cauce), descritas con el código 511 según la clasificación CODIIGE [8] de cubiertas del suelo. La primera simulación corresponde a un valor de coeficiente de rozamiento de Manning en el cauce de $n=0.030$, la segunda, a un valor de $n=0.035$, y la última, a un valor de $n=0.040$.

En las Figuras 3.2.2.3 y 3.2.2.4, se muestra la evolución temporal del caudal del río Gállego en la localización de Zuera y en la de Zaragoza, respectivamente, para la avenida de 2018 observada (azul), simulada partiendo con un valor de un coeficiente de rozamiento $n=0.030$ (naranja), simulada partiendo con un valor de un coeficiente de rozamiento $n=0.035$ (gris), y simulada partiendo con un valor de un coeficiente de rozamiento $n=0.040$ (amarillo). En las Figuras 3.2.2.5 y 3.2.2.6, se muestra la evolución temporal del nivel del río Gállego, con la misma leyenda.

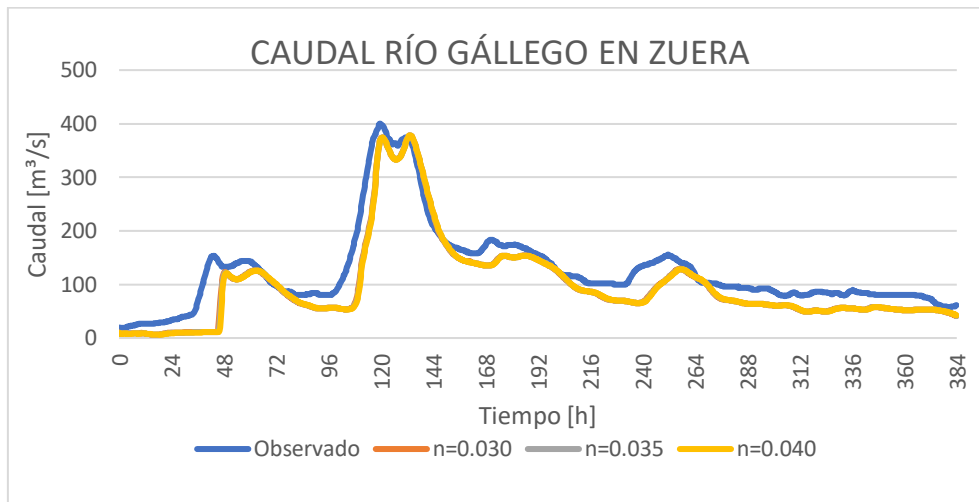


Figura 3.2.2.3. Evolución temporal del caudal de la avenida de 2018 del río Gállego en la localización de Zuera.

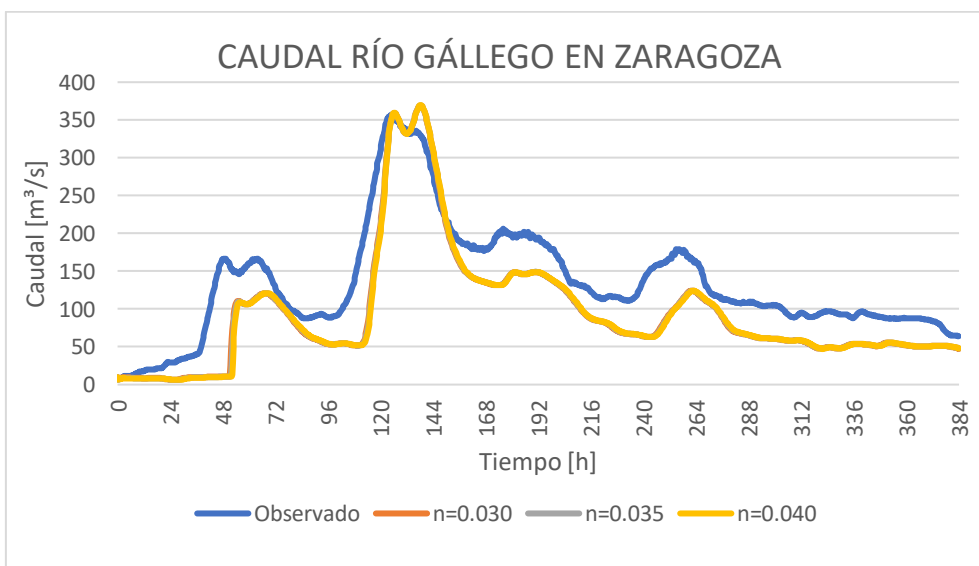


Figura 3.2.2.4. Evolución temporal del caudal de la avenida de 2018 del río Gállego en la localización de Zaragoza.

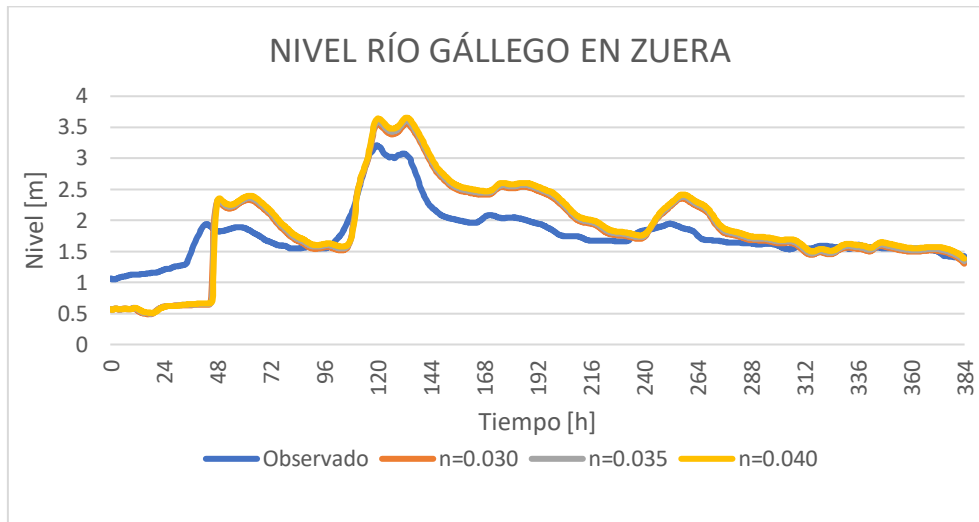


Figura 3.2.2.5. Evolución temporal del nivel de la avenida de 2018 del río Gállego en la localización de Zuera.

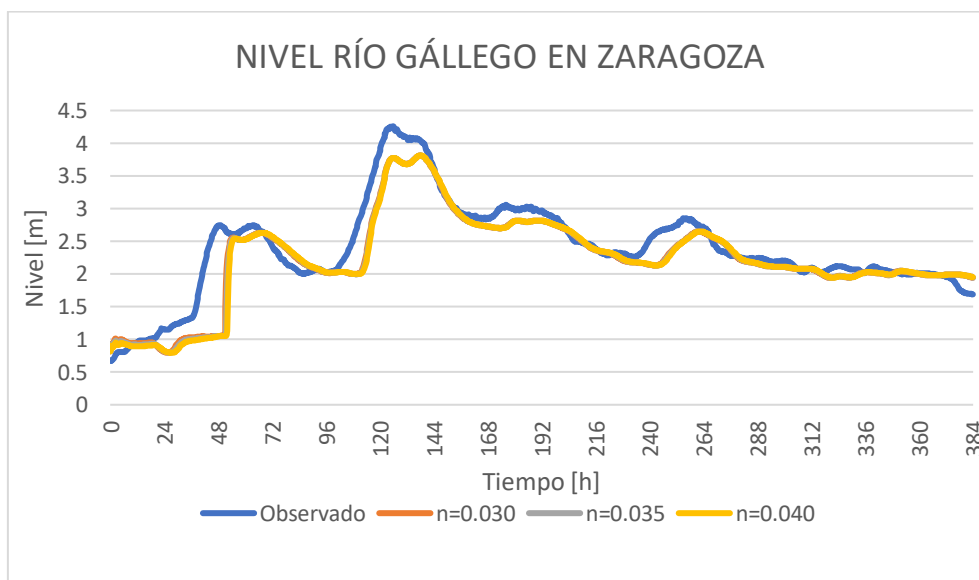


Figura 3.2.2.6. Evolución temporal del nivel de la avenida de 2018 del río Gállego en la localización de Zaragoza.

Como puede apreciarse en las Figuras anteriores, la variación del valor del coeficiente de rozamiento de Manning para el cauce del río no tiene ninguna influencia, ya que todos los resultados de las tres simulaciones realizadas coinciden.

Por otra parte, como ya hemos indicado en los casos anteriores, no es suficiente comparar la evolución temporal de caudales y alturas en determinados puntos del río Gállego sino que también resulta útil, comparar los mapas superficiales de altura de agua y velocidad de las tres simulaciones en la zona de la confluencia de los ríos Gállego y Ebro tal y como se muestra en las Figuras 3.2.2.7 y 3.2.2.9 correspondiente al caudal máximo que a su vez correspondería a la inundación máxima alcanzada; y 3.2.2.8 y 3.2.2.10 para el tiempo final de la simulación.

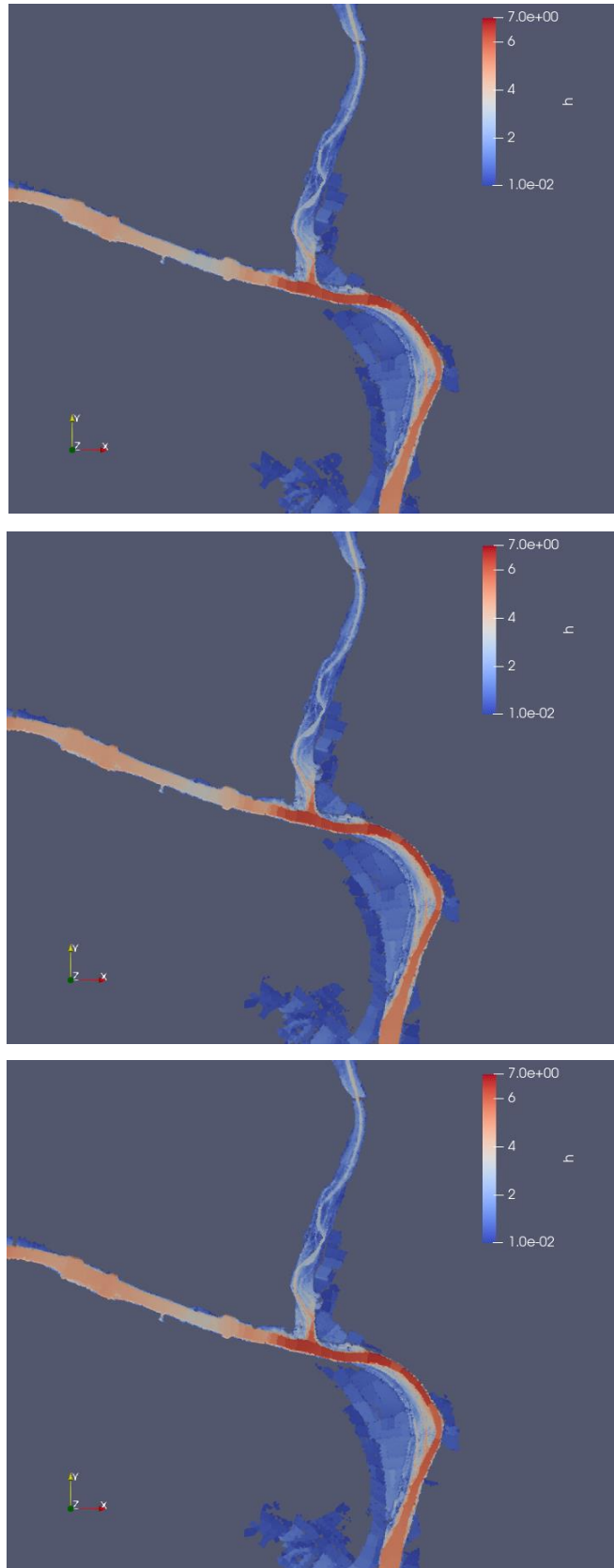


Figura 3.2.2.7. Mapas superficiales de altura de agua alrededor de la confluencia de los ríos Gállego y Ebro en $t=120h$ con un coeficiente de rozamiento $n=0.030$ (arriba), $n=0.035$ (centro) y $n=0.040$ (abajo)

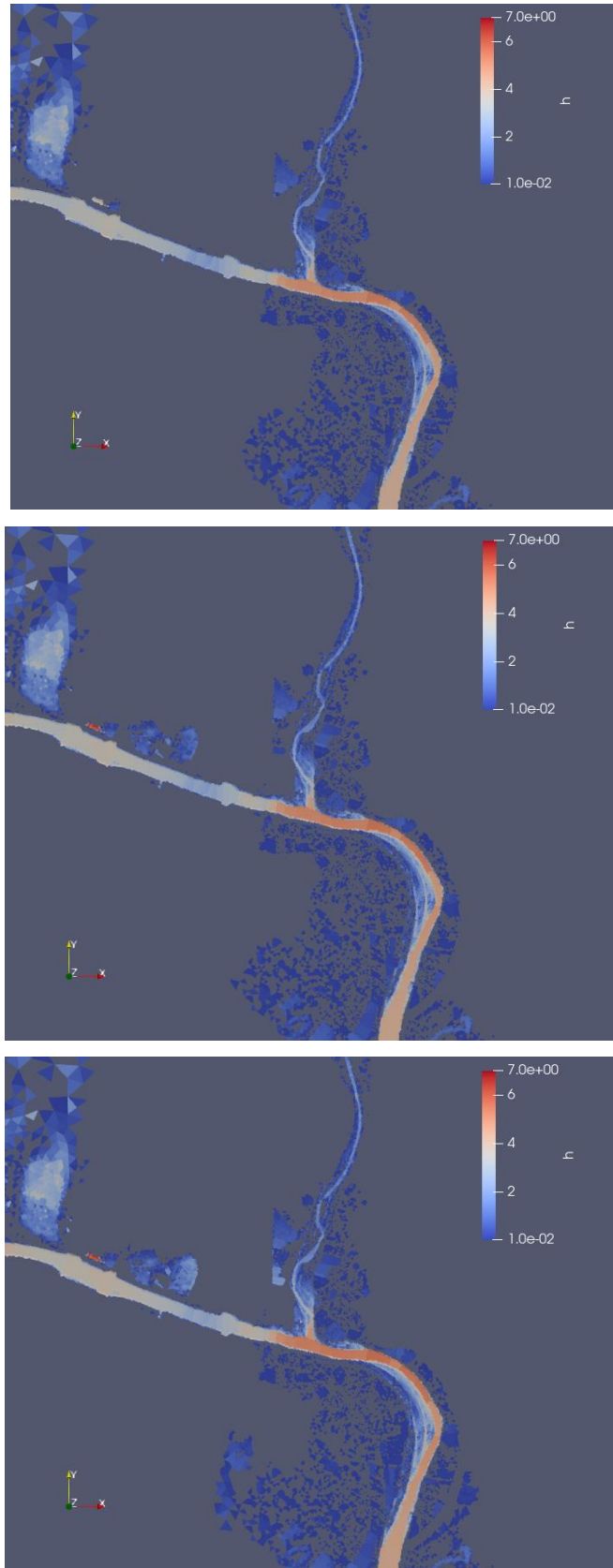


Figura 3.2.2.8. Mapas superficiales de altura de agua alrededor de la confluencia de los ríos Gállego y Ebro en $t=384$ h con un coeficiente de rozamiento $n=0.030$ (arriba), $n=0.035$ (centro) y $n=0.040$ (abajo)

De las Figuras anteriores se puede concluir que los resultados de las simulaciones son idénticos con $n=0.03$ o $n=0.035$, apreciando una diferencia muy pequeña con el caso $n=0.04$, en el que al ser el coeficiente de rozamiento un poco mayor, el flujo se ve frenado en su avance produciendo un pequeño levantamiento de la lámina de agua, observable sólo en el tiempo final de la simulación en el que vemos que la extensión de la mancha inundada ha sido un poco mayor.

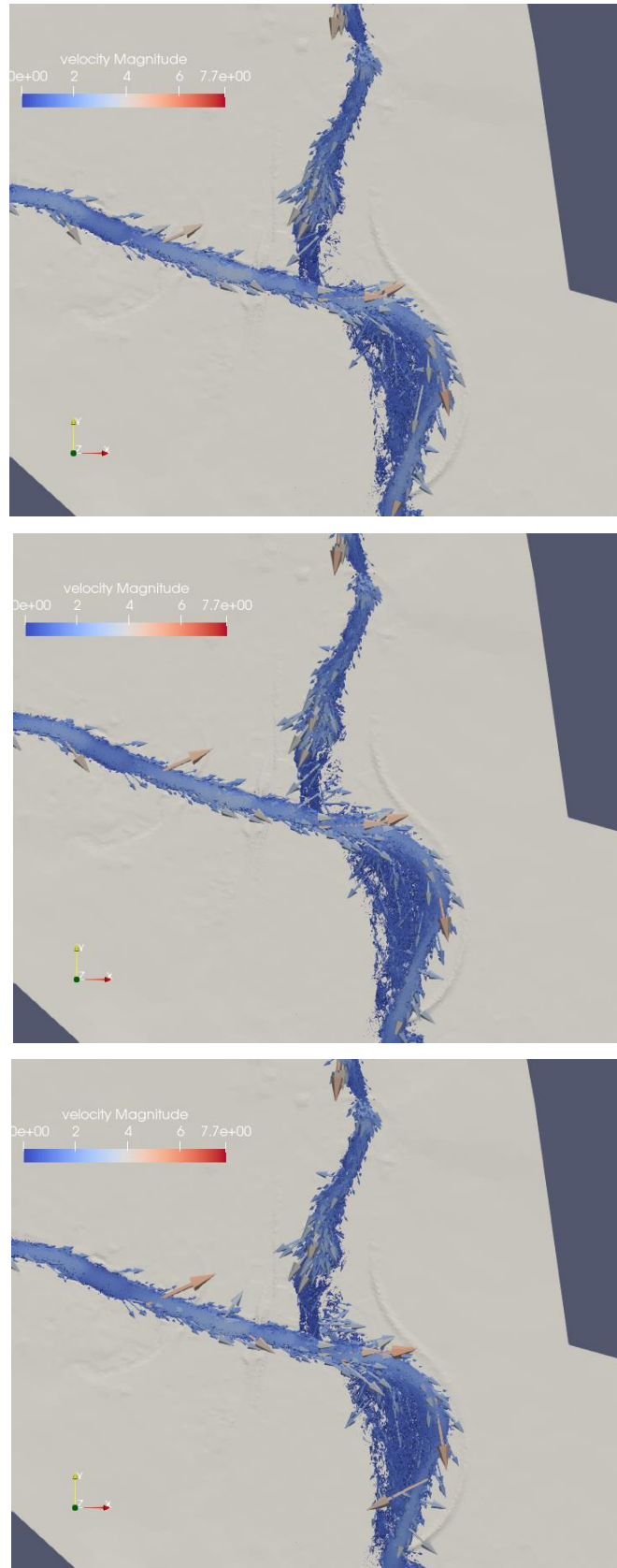


Figura 3.2.2.9. Mapas de velocidad del flujo alrededor de la confluencia de los ríos Gállego y Ebro en $t=120h$ con un coeficiente de rozamiento con un coeficiente de rozamiento $n=0.030$ (arriba), $n=0.035$ (centro) y $n=0.040$ (abajo)

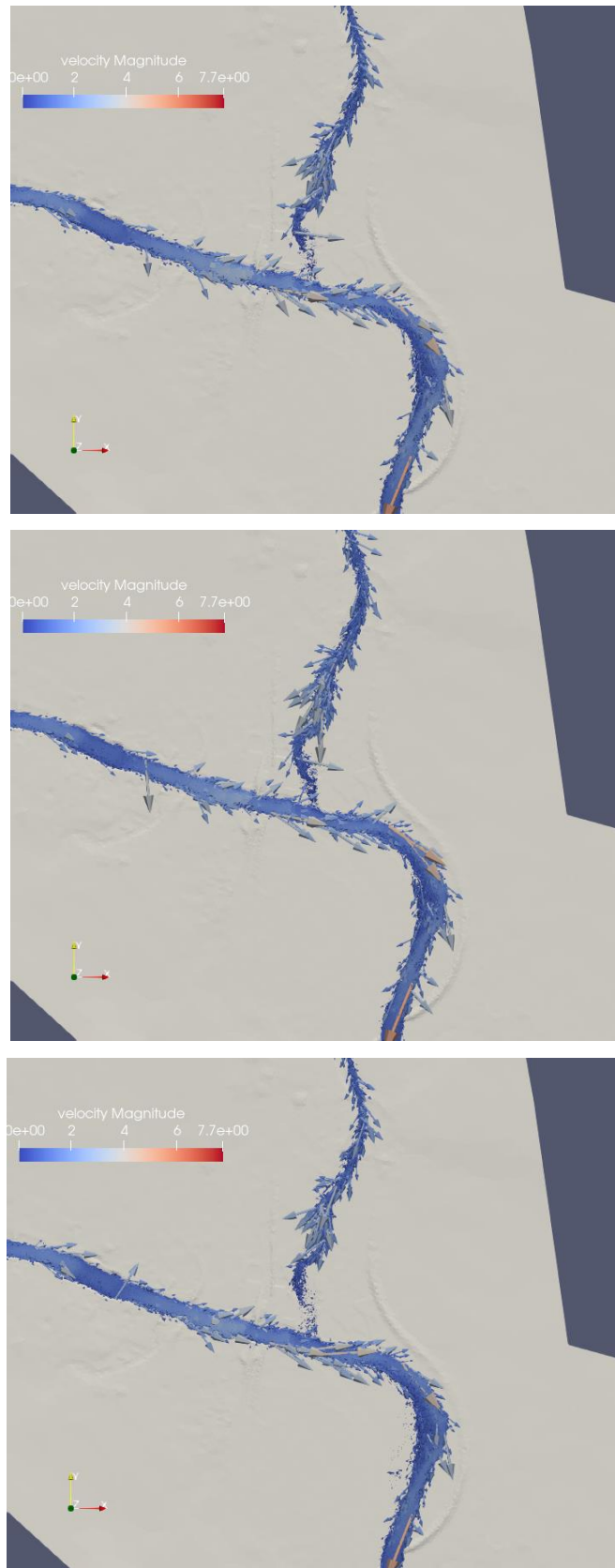


Figura 3.2.2.10. Mapas de velocidad del flujo alrededor de la confluencia de los ríos Gállego y Ebro en $t=384h$ con un coeficiente de rozamiento con un coeficiente de rozamiento $n=0.030$ (arriba), $n=0.035$ (centro) y $n=0.040$ (abajo)

Al comparar los resultados de las simulaciones en los mapas de vectores de velocidad vemos que no hay diferencias apreciables, con lo cual se puede concluir que se puede usar cualquiera de estos tres valores seleccionados de coeficiente de rozamiento de Manning para el cauce del río Gállego. Se seleccionará el valor $n=0.030$ para el resto de simulaciones.

Capítulo 4. Análisis de la avenida de 2021

Terminado el proceso de calibración y ajuste de nuestro modelo numérico, y aprovechando la cercanía en el tiempo del suceso, se va a proceder a realizar una simulación de la avenida de 2021 para verificar que el modelo obtenido es el adecuado para realizar el estudio con detalle de la desembocadura del río Gállego. Al igual que en el apartado 3.2, se introducirán hidrogramas de entrada de caudal, tanto en nuestra condición de contorno para el río Ebro como en la del río Gállego. Entre el período de tiempo comprendido entre el 28/Noviembre/2021 a las 3:00 y el 17/Diciembre/2021 a las 3:00, se han tomado las medidas registradas de caudal en la estación de aforo A286 del río Ebro en Alagón y en la estación A012 del río Gállego en Ardisa: las dos son nuestras condiciones de entrada de caudal que se han descrito en anteriores apartados. Este intervalo temporal nos da una duración de la simulación de 456 horas.

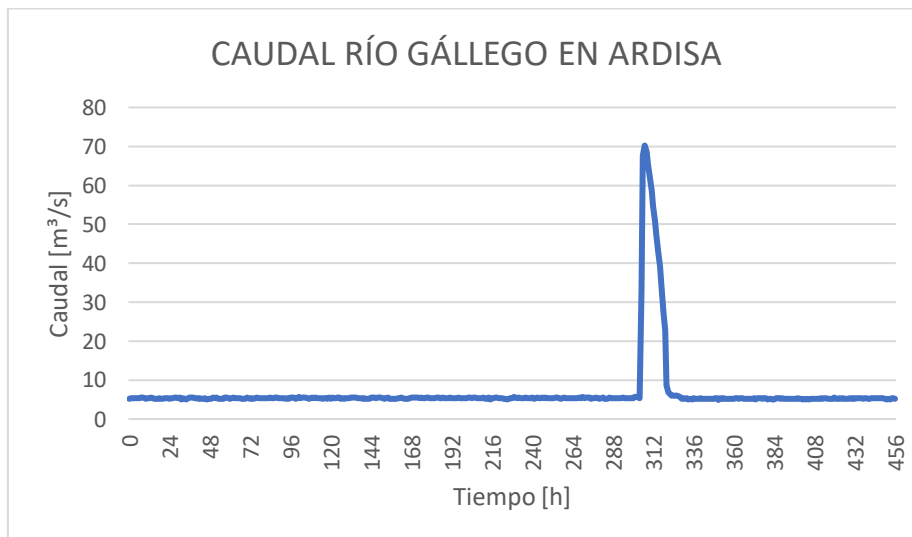


Figura 4.1. Hidrograma de entrada introducido en la condición de contorno del río Gállego.

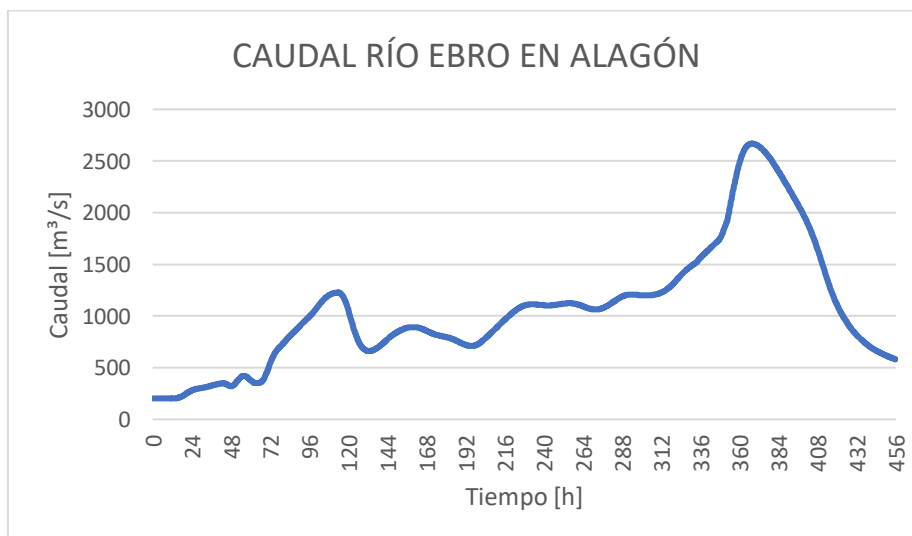


Figura 4.2. Hidrograma de entrada introducido en la condición de contorno del río Ebro.

Como se ha visto en anteriores apartados, se empleará una condición inicial de suelo húmedo y una capa ráster de distribución espacial de diferentes valores de coeficientes de rozamiento de Manning (con un valor de $n=0.030$ en el curso de ambos ríos) por ser los que han aportado resultados más aproximados a la avenida real. Al tratarse de una avenida distinta, se hace necesario volver a generar la condición inicial de suelo húmedo. Esta condición inicial corresponde a un caudal constante $Q=5.25 \text{ m}^3/\text{s}$ en el río Gállego y un caudal también constante $Q=201.98 \text{ m}^3/\text{s}$ en el río Ebro.

En las Figuras 4.3, 4.4 y 4.5 se muestra la evolución temporal del caudal del río Gállego en la localización de Zuera y en la de Zaragoza, así como del río Ebro en Zaragoza. En las Figuras 4.6, 4.7 y 4.8 se muestra la evolución temporal del nivel en las mismas referencias.

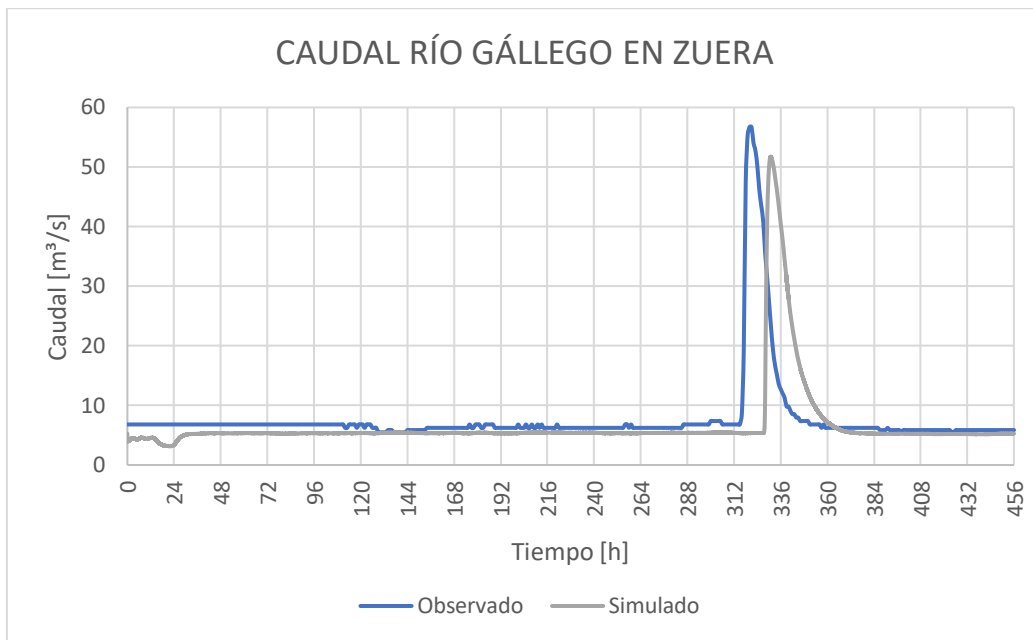


Figura 4.3. Evolución temporal del caudal de la avenida de 2021 del río Gállego en la localización de Zuera.

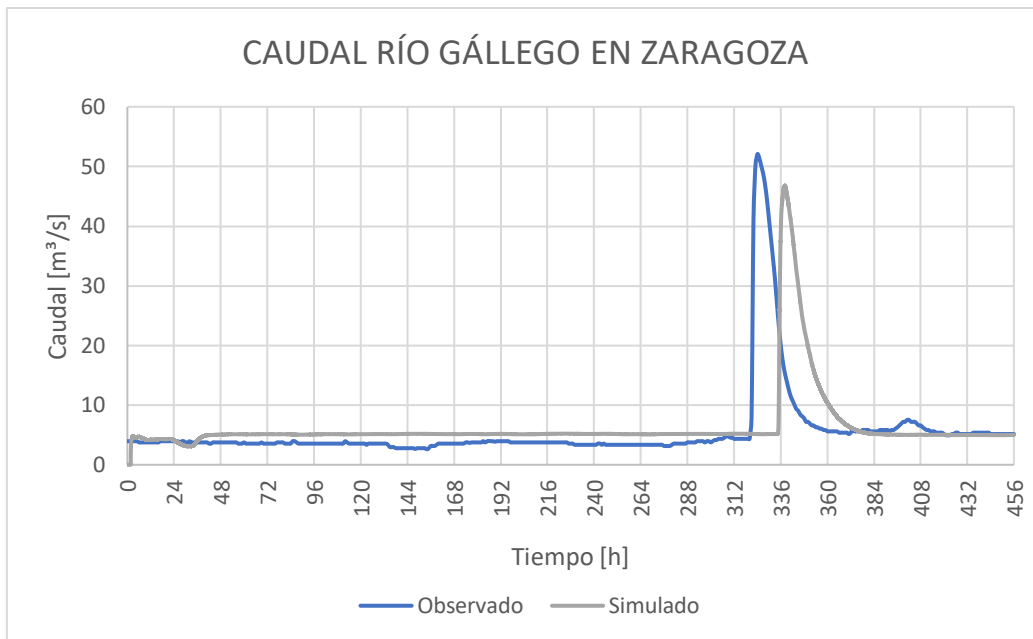


Figura 4.4. Evolución temporal del caudal de la avenida de 2021 del río Gállego en la localización de Zaragoza.

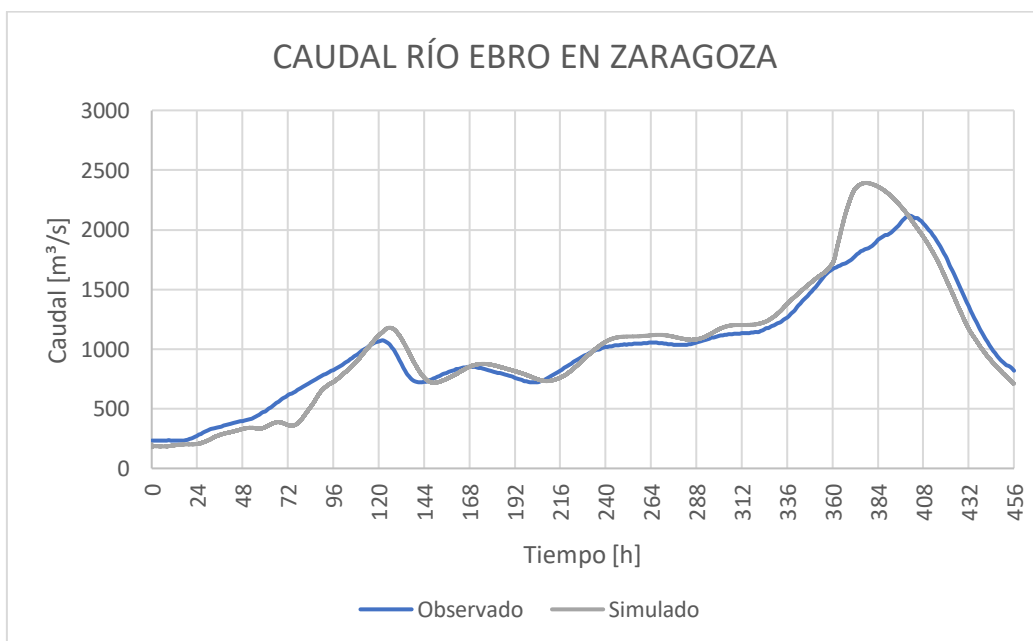


Figura 4.5. Evolución temporal del caudal de la avenida de 2021 del río Ebro en la localización de Zaragoza.

En el río Gállego se observa un retraso de la avenida aproximado de unas 15 horas, mientras que en el río Ebro la simulación obtiene unos valores muy ajustados a los observados. Esto es debido a que el río Ebro en el tramo de estudio se tiene bien caracterizado y calibrado en cuanto a topografía, usos del suelo, posición de motas... mientras que en el río Gállego todavía se están haciendo los primeros estudios. El retraso de la llegada de la onda en el río Gállego podría mejorarse llevando a cabo un estudio más exhaustivo de los coeficientes de rozamiento en la zona; ya que hemos visto que es el factor que más influye en esta variable. También se observa que el valor del pico de caudal

difiere en aproximadamente $5 \text{ m}^3/\text{s}$ entre el valor observado y el simulado. Esta diferencia no se considera importante ya que se tienen valores de caudal muy bajos y puede ser debido también a cualquier error en la toma de medidas de caudal en la estación de aforo. En el caso del río Ebro, los resultados numéricos son prácticamente los mismos que los observados excepto en el caudal pico, donde parece haber un recorte. Esta singularidad se observa en simulaciones de eventos anteriores y se ha detectado que se debe a rotura de motas que tienen lugar aguas arriba de ese punto que laminan el pico. Estas roturas son impredecibles, en principio, y se está trabajando en la forma de incorporarlas al modelo de simulación.

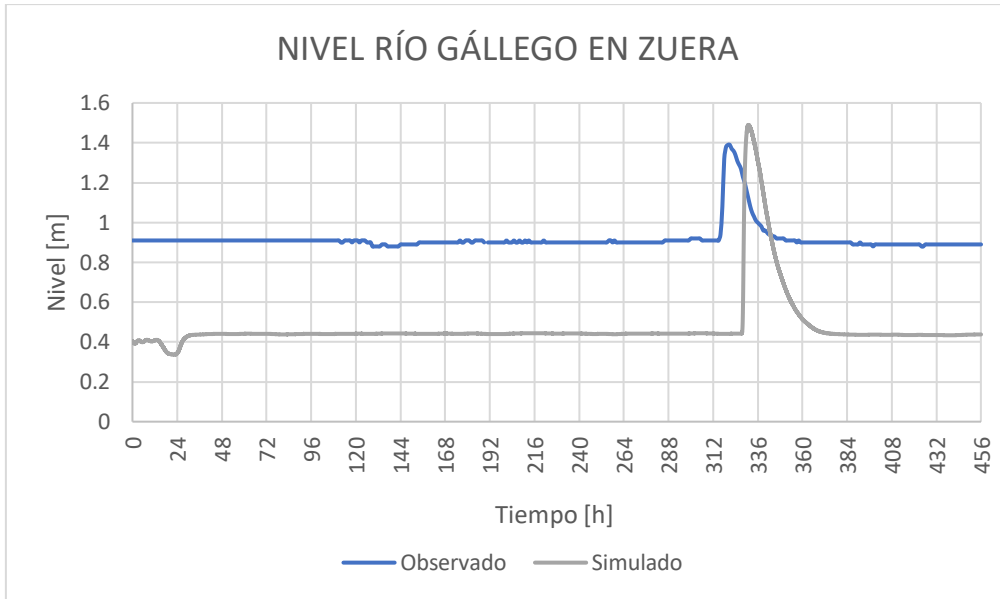


Figura 4.6. Evolución temporal del nivel de la avenida de 2021 del río Gállego en la localización de Zuera.

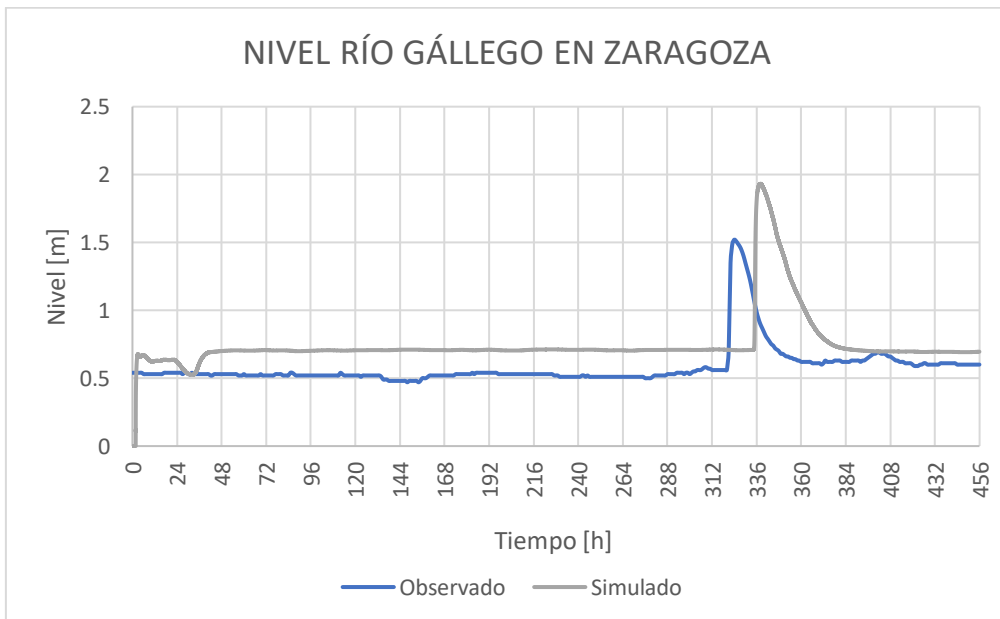


Figura 4.7. Evolución temporal del nivel de la avenida de 2021 del río Gállego en la localización de Zaragoza.

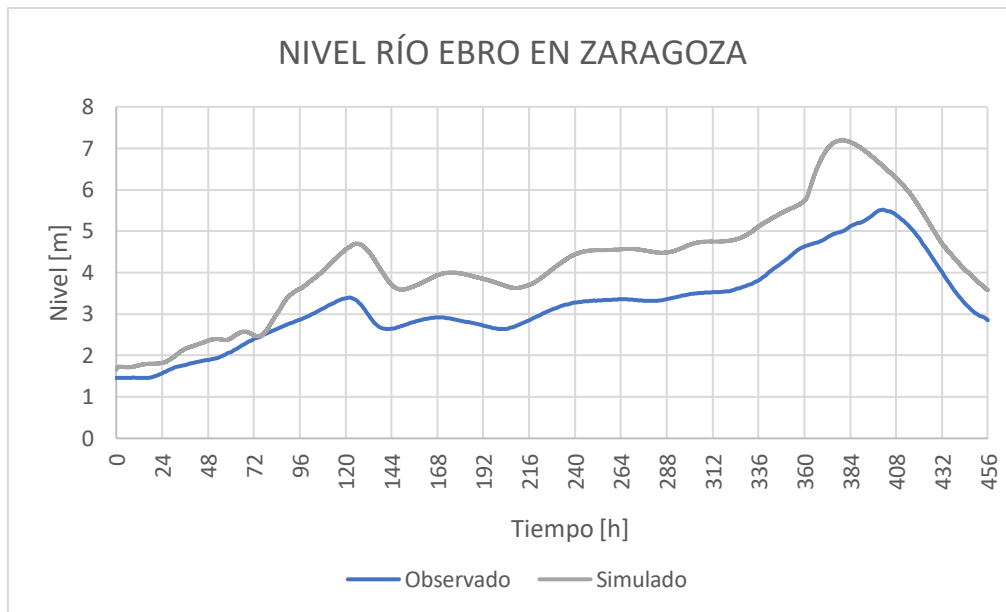


Figura 4.8. Evolución temporal del nivel de la avenida de 2021 del río Ebro en la localización de Zaragoza.

En la estación del río Gállego en Zuera puede apreciarse una discrepancia de 0.5 m en 1.5m, asumible dada su distancia a la confluencia y la falta de precisión al determinar el punto y la cota del fondo de ese punto de observación de datos registrados. Como es de esperar, en las gráficas de niveles también es palpable el retraso de la avenida. A partir de las 120 horas de simulación, los datos observados y simulados del río Ebro cuentan con una diferencia aproximada de 1 m. En la Figura 4.8 se aprecia la diferencia de altura de agua debida a la posible rotura de mota que comentábamos anteriormente.

Siguiendo la metodología de los anteriores apartados, se compararán ahora los mapas superficiales de altura de agua y velocidad de la simulación en la zona de la confluencia de los ríos Gállego y Ebro. Se seleccionarán 3 instantes de tiempo concretos para analizar: cuando el pico de caudal es alcanzado en el río Gállego ($t=336$ h), cuando dicho pico es alcanzado en el río Ebro ($t=384$ h) y cuando la simulación llega a su conclusión ($t=456$ h). La Figura 4.9 versará sobre los mapas de manchas de inundación, mientras que la Figura 4.10 contendrá la información de los mapas de velocidades.

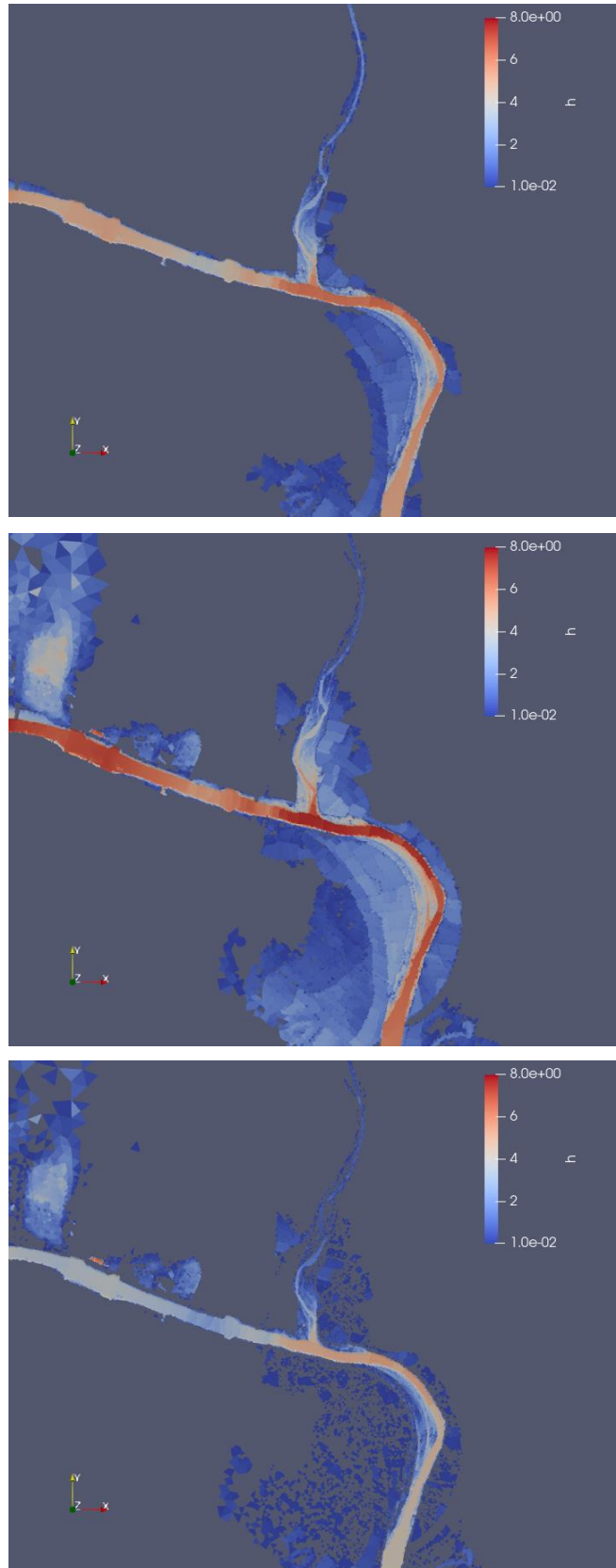


Figura 4.9. Mapas superficiales de altura de agua alrededor de la confluencia de los ríos Gállego y Ebro para diversos valores del tiempo; $t=336$ h (arriba), $t=384$ h (centro) y $t=456$ h (abajo).

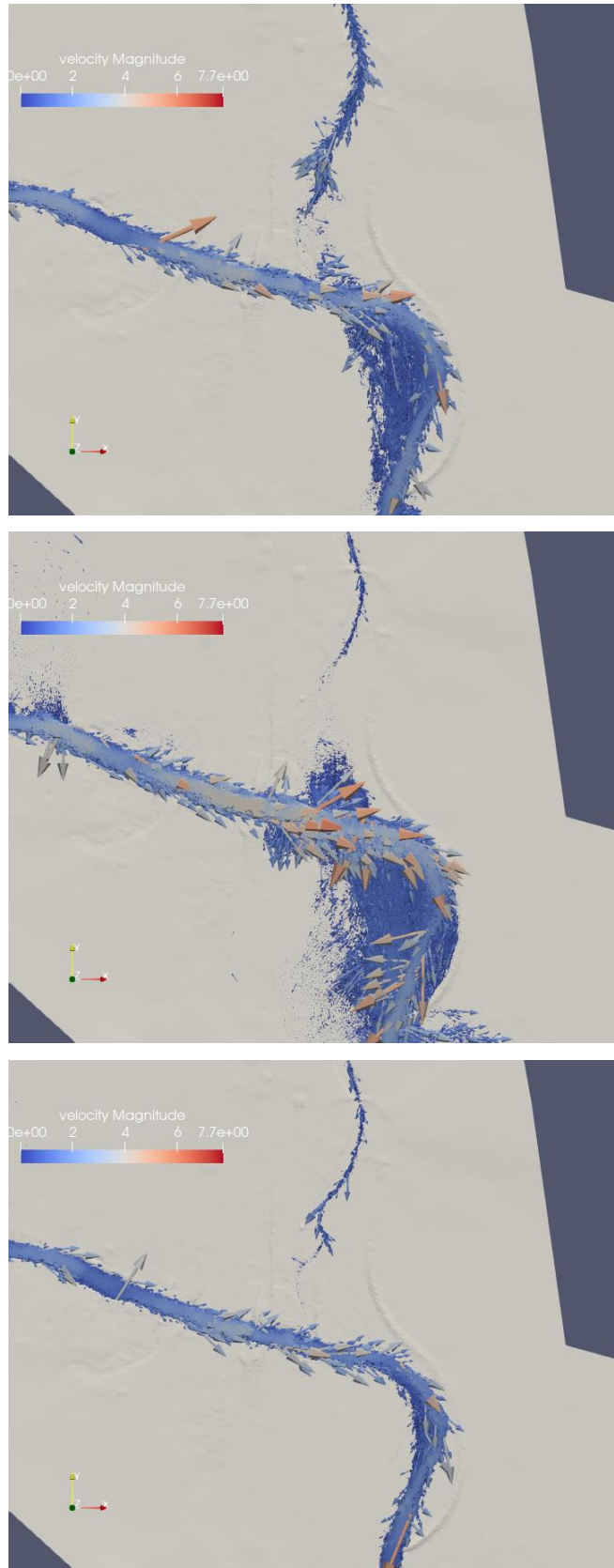


Figura 4.10. Mapas de velocidad del flujo alrededor de la confluencia de los ríos Gállego y Ebro para diversos valores del tiempo; $t=336$ h (arriba), $t=384$ h (centro) y $t=456$ h (abajo).

A la vista de los resultados de las imágenes, puede decirse que cuando el río Gállego muestra un caudal pico pequeño ($50\text{m}^3/\text{s}$), su avenida no tiene apenas influencia sobre el río Ebro, no sucediendo así a la inversa, como se puede apreciar en las imágenes centrales de las Figuras 4.9 y 4.10. En todo caso, la influencia que ejerce el río Ebro sobre el río Gállego es limitada, pudiendo ver claramente que la misma no llega hasta la localidad de Zuera. Esto justificará la adopción de un dominio de simulación más reducido en el siguiente capítulo, dado que lo que ocurra aguas arriba de Zuera no nos resulta de ningún interés para analizar en detalle lo que ocurre en la desembocadura del río Gállego que es el objetivo de este estudio. También se puede observar en estas Figuras 4.9 y 4.10 lo que se ha comentado de la rotura de motas aguas arriba de la confluencia.

Capítulo 5. Análisis detallado de la confluencia

Una vez hechos los análisis en el dominio ampliado, se hace un análisis detallado en un dominio reducido. En lo referente a las condiciones temporales de estudio y a los caudales la condición de contorno de entrada se va a mantener en Alagón como se ha hecho en anteriores apartados, mientras que en lugar de tener la condición de entrada del río Gállego en Ardisa, se colocará en Zuera. Entre el período de tiempo comprendido entre el 07/Abril/2018 a las 0:00 y el 23/Abril/2018 se han tomado las medidas registradas de caudal en la estación de aforo A286 del río Ebro en Alagón (ver Figura 3.2.2.1) y en la estación A209 del río Gállego en Zuera, detallado en la Figura 5.1. En la figura A.1.4.2 del Anexo A pueden consultarse la ubicación de las secciones de caudal y puntos de observación empleados.

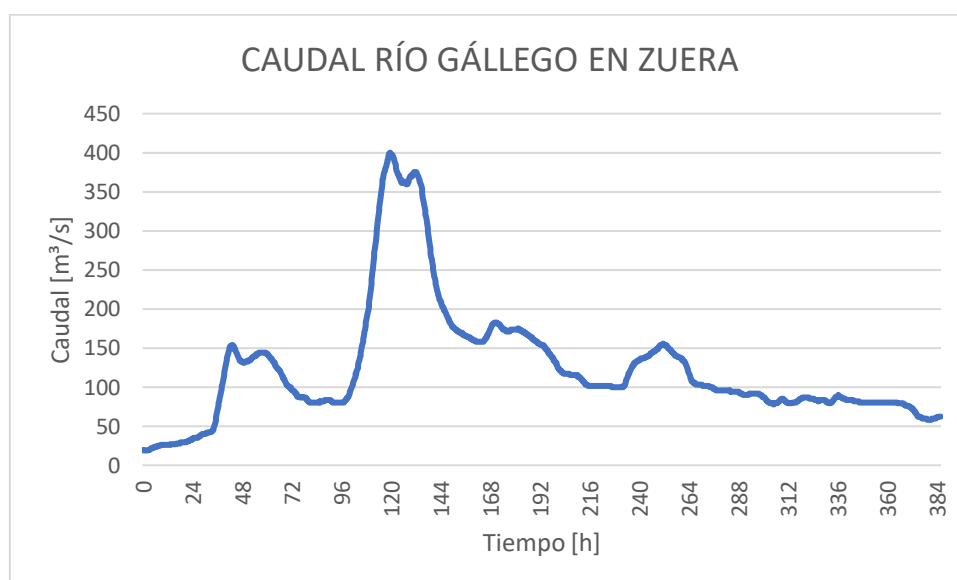


Figura 5.1. Hidrograma de entrada introducido en la condición de contorno del río Gállego.

Este intervalo temporal da una duración de la simulación de 384 horas. Se consideran las simulaciones partiendo de la condición inicial de suelo húmedo, generada introduciendo un caudal constante de valor $Q = 19.88 \text{ m}^3/\text{s}$ por el río Gállego (Zuera) y un caudal $Q = 431.886 \text{ m}^3/\text{s}$ por el río Ebro en Alagón.

Se procede a realizar 3 simulaciones, todas ellas empleando el ráster de coeficientes de rozamiento de Manning generado a partir de los datos del SIOSE¹, pero cambiado el valor del coeficiente de rozamiento de Manning para las zonas de curso de agua (cauce), descritas con el código 511 según la clasificación CODIIGE de cubiertas del suelo. La primera simulación corresponde a un valor de coeficiente de rozamiento de Manning en el cauce de $n=0.030$, la segunda, a un valor de $n=0.035$, y la última, a un valor de $n=0.040$.

¹ Anejo V de la 'Guía metodológica para el desarrollo del sistema nacional de cartografía de zonas inundables'.

En la Figura A.1.4.2 se muestra la localización de las secciones y sondas o puntos de observación analizados en el entorno de la desembocadura del río Gállego, en los que se registran los valores que toman las variables a lo largo del tiempo durante el evento de avenida de 2018. Como se puede observar, el número de puntos y secciones es demasiado elevado como para mostrar todas las gráficas obtenidas. Se comentarán únicamente las más interesantes.

En la Figura 5.3 se muestra la evolución temporal del caudal en la sección E2 que se encuentra situada sobre el río Ebro y coincide con el inicio de la desembocadura del río Gállego.

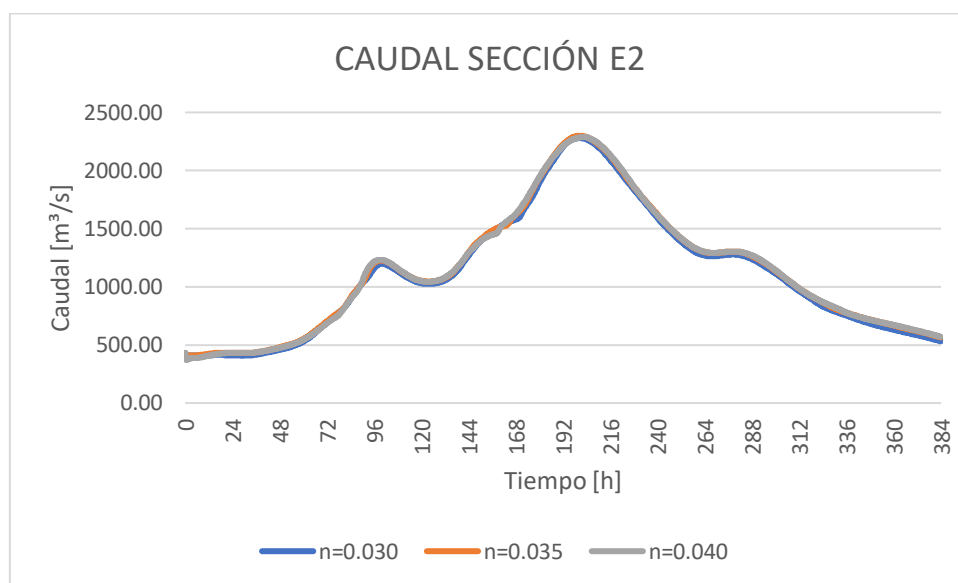


Figura 5.2. Evolución temporal del caudal simulado en la sección E2 con diferentes coeficientes de rozamiento de Manning en el cauce durante el evento de avenida del 2018.

Al analizar la variable caudal en las secciones, vuelve a observarse, como en el apartado 3.2.2, que el valor del coeficiente de rozamiento en el cauce apenas tiene influencia coincidiendo todos los resultados de las simulaciones. En el resto de secciones analizadas, se observa el mismo comportamiento, y más allá de los valores, que cambian, los resultados coinciden; por ello se va a pasar a analizar los niveles de agua.

En las Figuras 5.3 y 5.4 se muestra la evolución temporal del nivel de agua en los puntos de observación E31 y E33 respectivamente, que se encuentran sobre el río Ebro nada más pasar la desembocadura del río Gállego, y en los extremos (orillas derecha e izquierda).

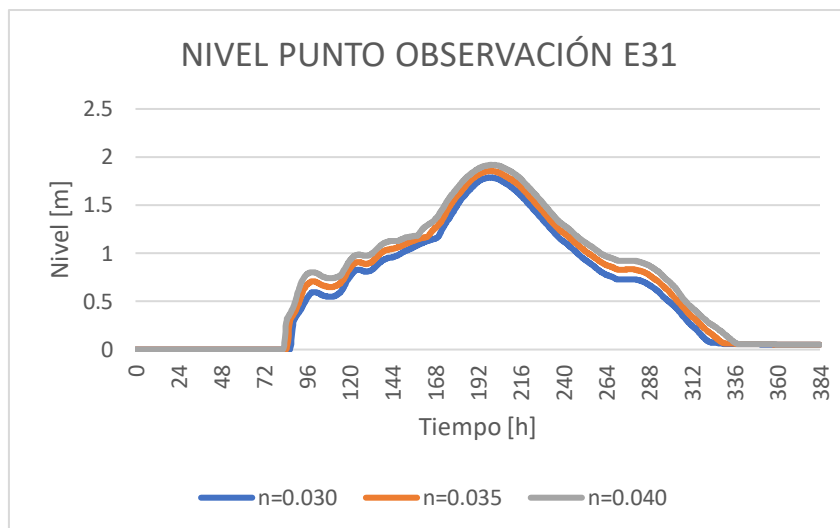


Figura 5.3. Evolución temporal del nivel de agua simulado en el punto de observación E31 con diferentes coeficientes de rozamiento de Manning en el cauce para el evento de avenida del 2018.

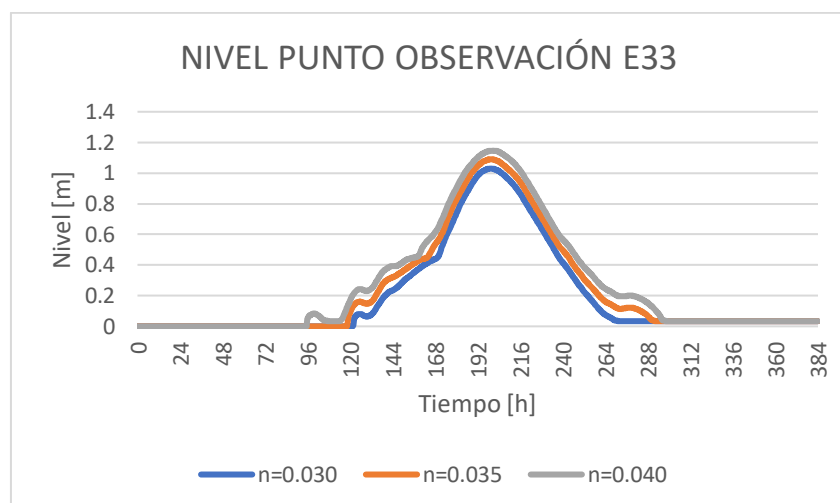


Figura 5.4. Evolución temporal del nivel de agua simulado en el punto de observación E33 con diferentes coeficientes de rozamiento de Manning en el cauce para el evento de avenida del 2018.

En las Figuras 5.3 y 5.4 se observa que el tiempo de llegada de la onda de avenida se ve más retrasado conforme menor es el coeficiente de rozamiento de Manning en el cauce, al mismo tiempo que la altura alcanzada en el pico también es menor. Este efecto es más acusado en la sonda E33 que está en la orilla más alejada de la desembocadura.

En las Figuras 5.5 y 5.6 se muestra la evolución temporal del nivel de agua en los puntos de observación E51 y E53 respectivamente, que se encuentran sobre el río Ebro y centrados con la desembocadura del río Gállego, también corresponden a los extremos (orillas derecha e izquierda).

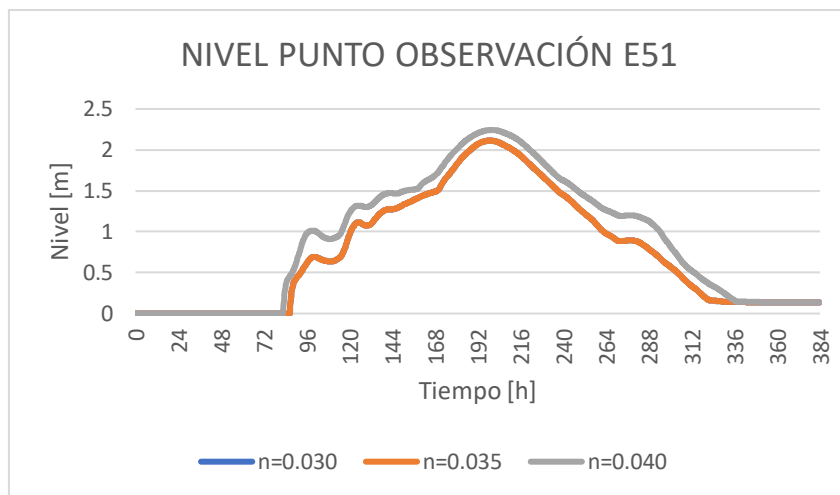


Figura 5.5. Evolución temporal del nivel de agua simulado en el punto de observación E51 con diferentes coeficientes de rozamiento de Manning en el cauce para el evento de avenida del 2018.

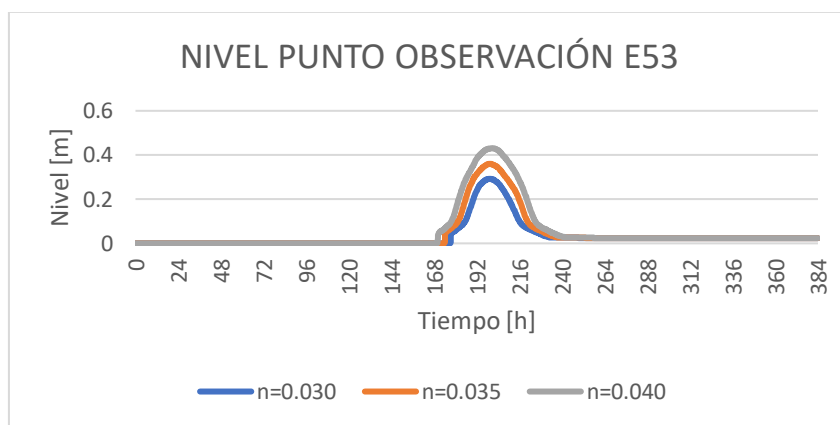


Figura 5.6. Evolución temporal del nivel de agua simulado en el punto de observación E53 con diferentes coeficientes de rozamiento de Manning en el cauce para el evento de avenida del 2018.

En estas Figuras (5.5 y 5.6) puede observarse el mismo comportamiento que en las anteriores: el tiempo de llegada de la onda se retrasa conforme menor es el coeficiente de rozamiento de Manning en el cauce, y al mismo tiempo la altura en el pico disminuye, acusándose más la diferencia en el extremo más alejado. En ambos casos se podría interpretar el resultado indicando que al disminuir el rozamiento el flujo de agua aumenta su velocidad lo que conlleva una disminución de la altura de agua. Además, podría indicarnos una de las pautas o propuestas a analizar para mitigar las consecuencias de una avenida en la desembocadura del río Gállego, que sería conseguir mayor velocidad en el cauce para laminar la altura y que no se produjera el desbordamiento.

En la Figura 5.7 se muestra la evolución temporal del nivel de agua en el punto de observación G23 respectivamente, que se encuentran sobre el río Gállego, en el punto extremo de su margen derecha. En este caso, se ve que los resultados de las simulaciones con diferentes coeficientes de rozamiento de Manning en el cauce no aportan diferencias al nivel de altura de agua.

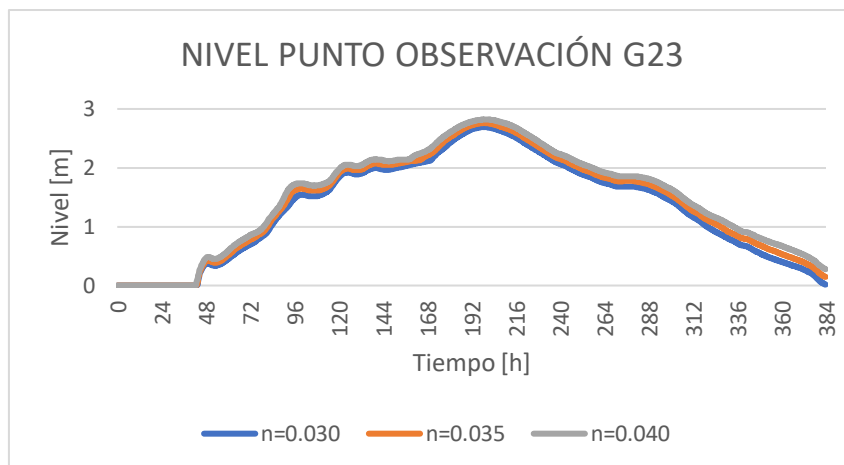


Figura 5.7. Evolución temporal del nivel de agua simulado en el punto de observación G23 con diferentes coeficientes de rozamiento de Manning en el cauce para el evento de avenida del 2018.

Por último, en la Figura 5.8 se muestra la evolución temporal del nivel de agua en el río Gállego en la localización de Zaragoza con los diferentes valores del coeficiente de rozamiento de Manning en el cauce, observando que todas las simulaciones coinciden. Esta sección se encuentra justo antes de la confluencia con el río Ebro y nos indica que es precisamente en la zona de la desembocadura del río Gállego en el río Ebro en la que habría que actuar para prevenir desbordamientos; y no antes.

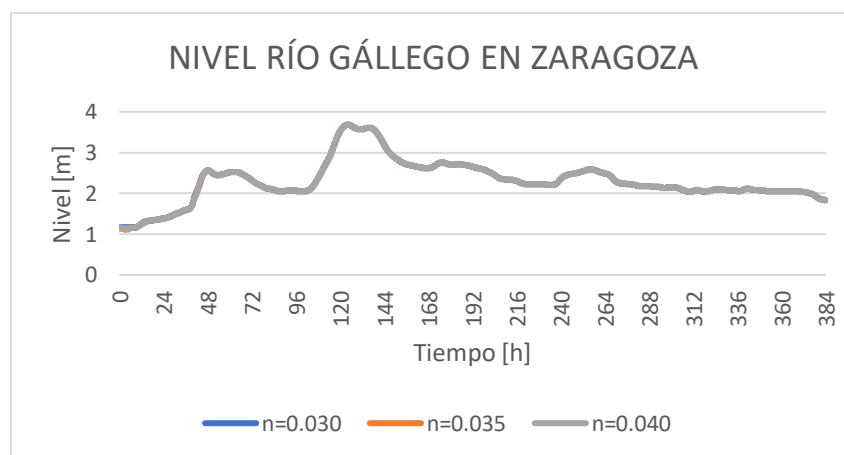


Figura 5.8. Evolución temporal del nivel de agua simulado en el río Gállego en la sonda situada en Zaragoza con diferentes coeficientes de rozamiento de Manning en el cauce para el evento de avenida del 2018.

Por otra parte, como ya se ha indicado en los casos anteriores, no es suficiente comparar la evolución temporal de caudales y alturas en determinados puntos del río Gállego y del río Ebro; sino que también resulta útil, comparar los mapas superficiales de altura de agua y velocidad de las tres simulaciones en la zona de la confluencia de ambos ríos tal y como se muestra de la Figuras 5.9 a la Figura 5.14. En cuanto a los tiempos en los que se muestran estas imágenes, corresponden a $t=120$ h que es cuando se alcanza el pico de caudal en el río Gállego, $t=192$ h que es cuando se alcanza el pico de caudal en el río Ebro y $t=384$ h que es el tiempo final de la simulación.

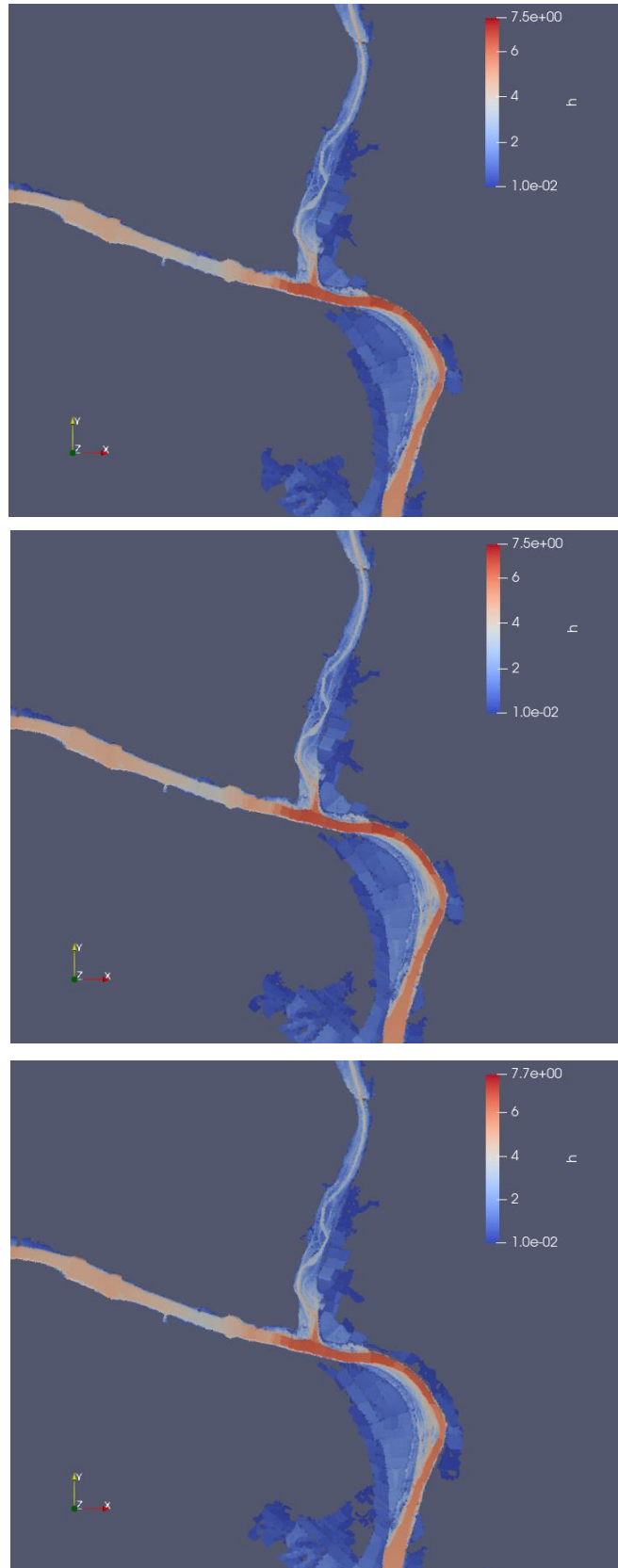


Figura 5.9. Mapas superficiales de altura de agua alrededor de la confluencia de los ríos Gállego y Ebro en $t=120h$ con un coeficiente de rozamiento $n=0.030$ (arriba), $n=0.035$ (centro) y $n=0.040$ (abajo).

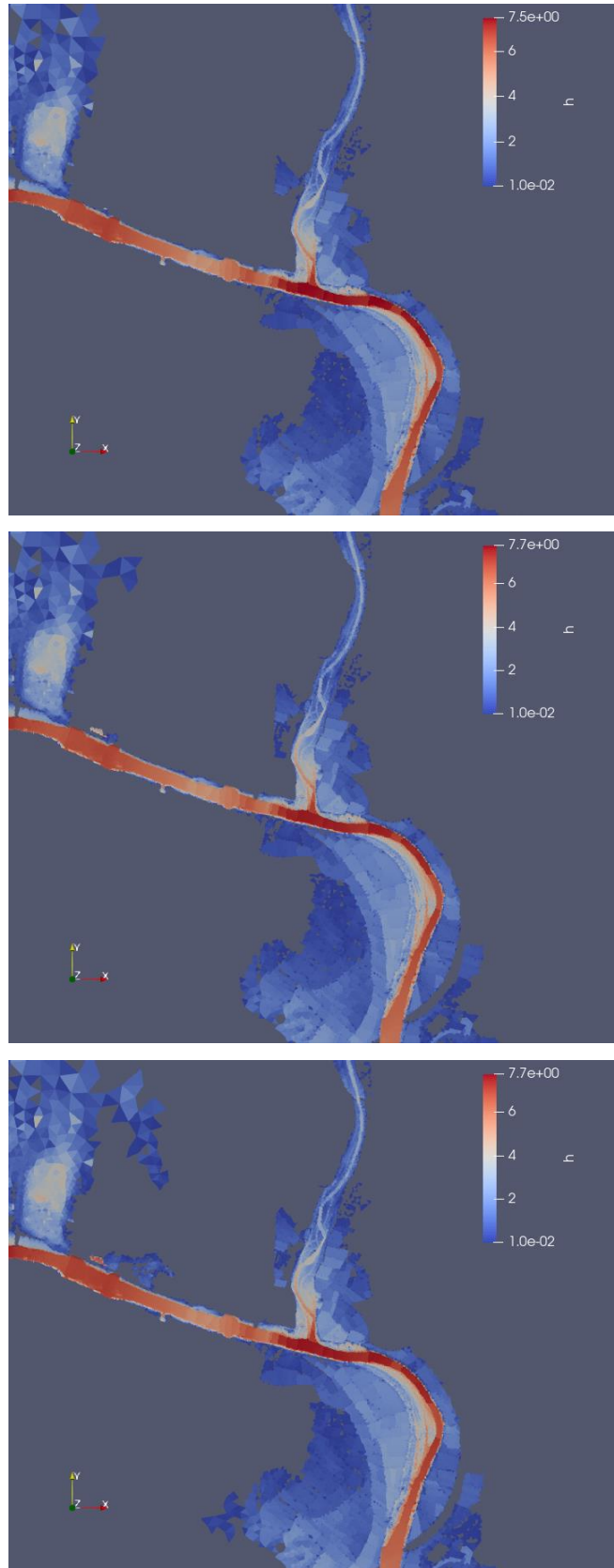


Figura 5.10. Mapas superficiales de altura de agua alrededor de la confluencia de los ríos Gállego y Ebro en $t=192h$ con un coeficiente de rozamiento $n=0.030$ (arriba), $n=0.035$ (centro) y $n=0.040$ (abajo).

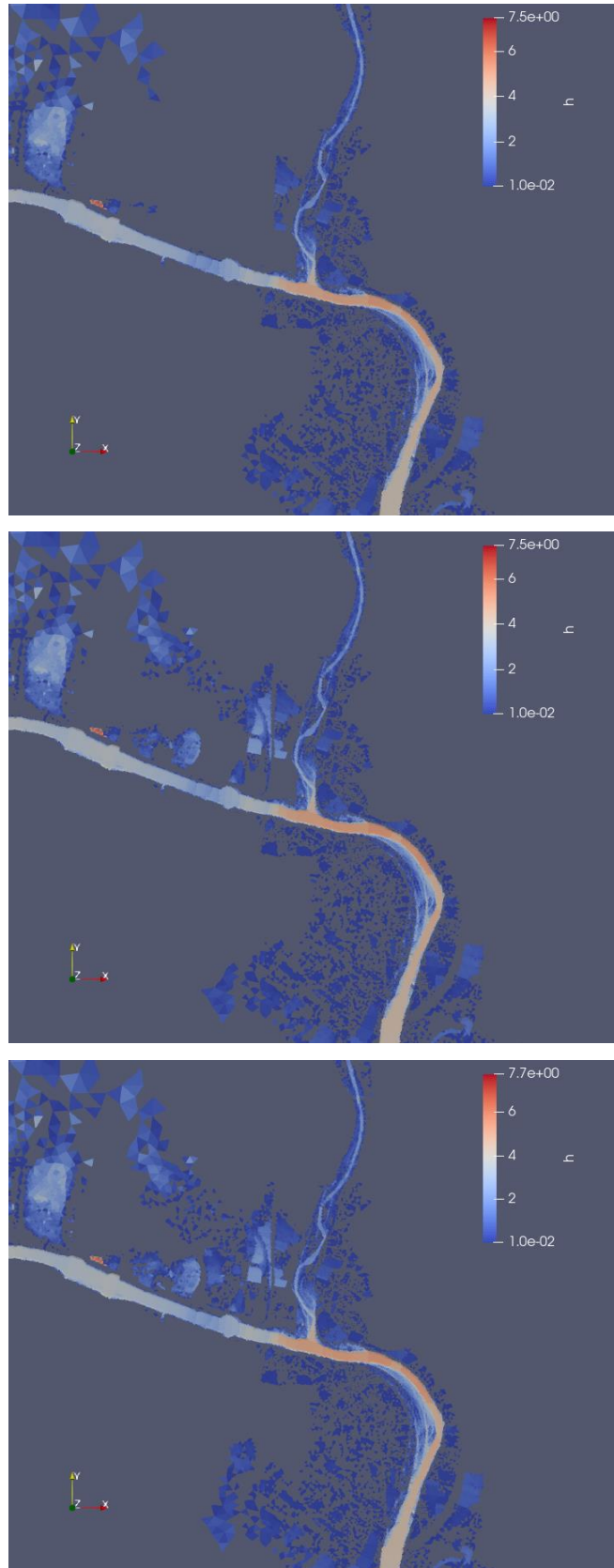


Figura 5.11. Mapas superficiales de altura de agua alrededor de la confluencia de los ríos Gállego y Ebro en $t=384$ h con un coeficiente de rozamiento $n=0.030$ (arriba), $n=0.035$ (centro) y $n=0.040$ (abajo).

En las imágenes se aprecia claramente como la avenida del río Gállego no tiene gran influencia sobre el río Ebro, aun siendo un volumen de agua mayor que en la reciente avenida de 2021; no sucede así a la inversa, como puede observarse en el mapa para $t=196$ h, aunque su propagación aguas arriba del Gállego resulta de carácter limitado. En el mapa de altura de agua para $t=384$ h se aprecia con mayor claridad como el valor del coeficiente de rozamiento de Manning influye en la superficie de la mancha de inundación. Esto ya se observaba también en los resultados de los niveles de agua en las sondas situadas en las márgenes del río Ebro y Gállego cercanas a la desembocadura.

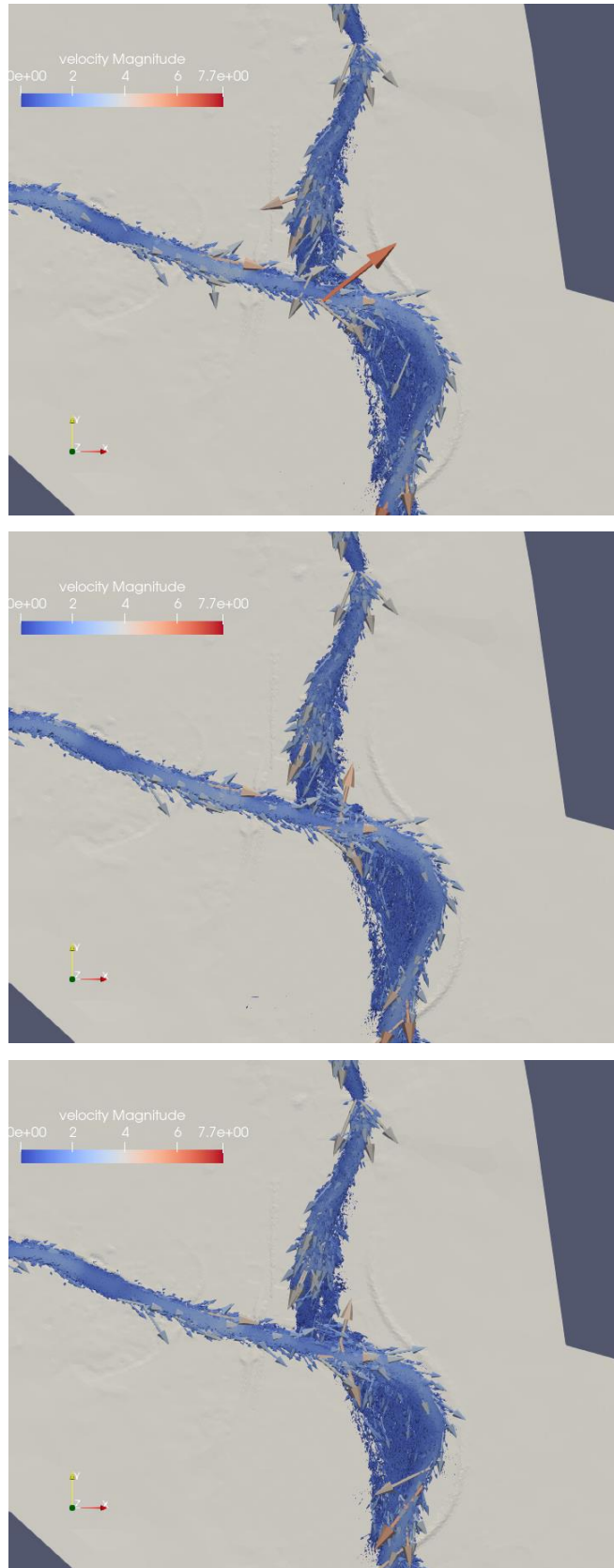


Figura 5.12. Mapas de velocidad del flujo alrededor de la confluencia de los ríos Gállego y Ebro en $t=120h$ con un coeficiente de rozamiento $n=0.030$ (arriba), $n=0.035$ (centro) y $n=0.040$ (abajo).

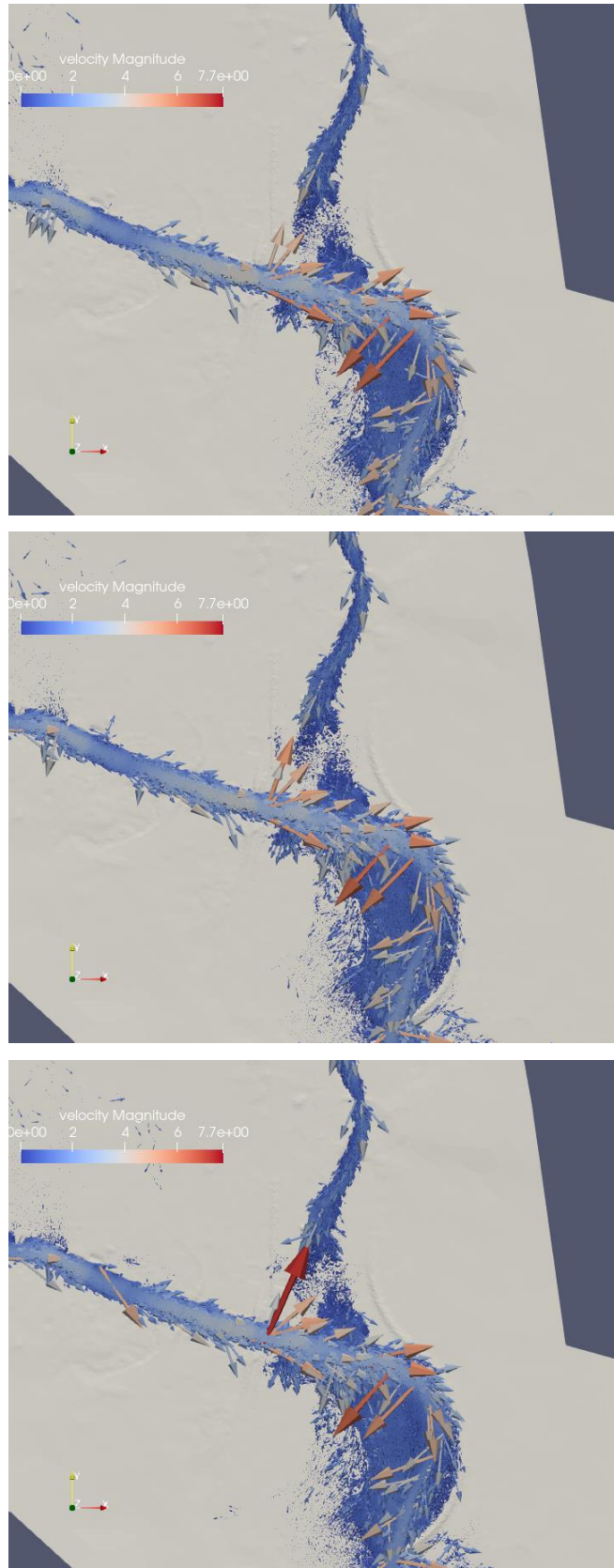


Figura 5.13. Mapas de velocidad del flujo alrededor de la confluencia de los ríos Gállego y Ebro en $t=192h$ con un coeficiente de rozamiento $n=0.030$ (arriba), $n=0.035$ (centro) y $n=0.040$ (abajo).

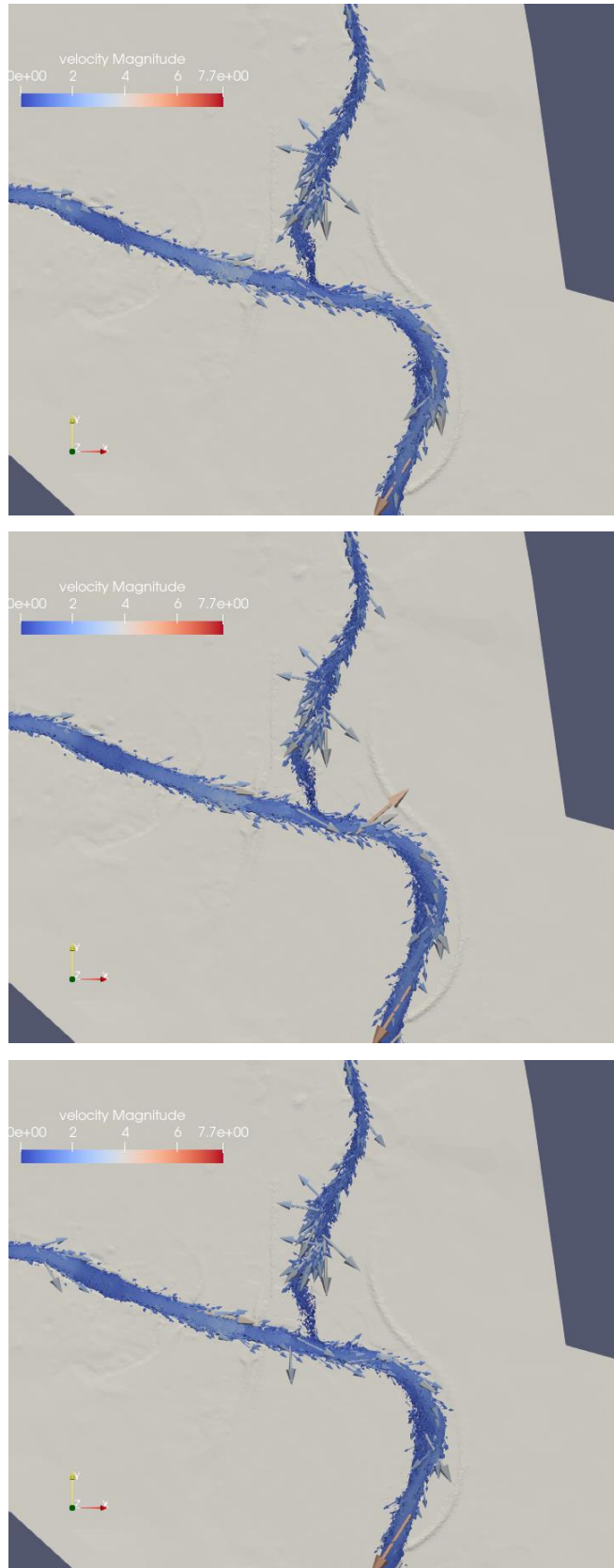


Figura 5.14. Mapas de velocidad del flujo alrededor de la confluencia de los ríos Gállego y Ebro en $t=384h$ con un coeficiente de rozamiento $n=0.030$ (arriba), $n=0.035$ (centro) y $n=0.040$ (abajo).

En los mapas de velocidades para $t=192$ h se puede apreciar nuevamente en la distribución de los vectores de los mapas de velocidades, que la avenida del río Ebro está propagándose aguas arriba del río Gállego. Según los valores de los coeficientes de rozamiento de Manning en el cauce también se observa que en las orillas del río Ebro aparece algún vector velocidad mayor cuanto mayor es el coeficiente de rozamiento, pero no son estos vectores los que hay que analizar, sino el promedio de la velocidad en el cauce, que hace que a mayor rozamiento la velocidad disminuya, y el nivel de agua aumente.

Capítulo 6. Conclusiones y trabajo futuro

A lo largo de este trabajo, se ha realizado, en primer lugar, un estudio geográfico de la zona de la desembocadura del río Gállego en el río Ebro, para elaborar un mapa de elevación del terreno, a partir de modelos digitales de terreno (MDT) disponibles; sobre el cual generar una malla de cálculo. A partir de esta malla de cálculo se han realizado simulaciones numéricas del comportamiento del flujo de agua en ambos ríos usando un código comercial de volúmenes finitos en 2D sobre tarjetas gráficas (Riverflow2D).

En segundo lugar, se ha calibrado este modelo con casos reales de avenidas pasadas (2018) para ponderar la influencia de la condición inicial de partida en los resultados numéricos, así como la influencia del valor del coeficiente de rozamiento en el mismo. Las conclusiones obtenidas en el primer análisis, es que iniciar una simulación sobre lecho húmedo es mejor que hacerlo sobre lecho seco; ya que el tiempo de llegada de la onda de avenida respecto a los valores observados se ajusta mejor, y además también se obtienen resultados de nivel de agua más cercanos a los observados. Respecto al segundo análisis, se ha podido concluir que el uso de un mapa de distribución espacial de coeficientes de rozamiento de Manning, según los usos del suelo, da resultados más similares a los observados que el uso de coeficientes de rozamiento de Manning constantes en todo el dominio; y que el valor del coeficiente de rozamiento en el cauce no influye a nivel general en el comportamiento del flujo de agua en el río; aunque según vemos en el siguiente análisis realizado en el modelo detallado de la desembocadura del río Gállego, este valor es muy relevante e influye en que se produzca más o menos desbordamiento en las orillas del río Ebro.

En tercer lugar, se ha analizado numéricamente el último evento de avenida extrema sucedida en el año 2021. Se ha verificado la validez de nuestro modelo y se ha observado que la influencia que ejerce el río Gállego sobre el río Ebro es mínima cuando la avenida del primero lleva poco volumen de agua; pero sin embargo, las avenidas del río Ebro sí que se propagan aguas arriba del río Gállego, aunque esta influencia es de carácter limitado, pues no llega a extenderse hasta la localidad de Zuera. Analizándolo desde el punto de vista del objetivo de este trabajo, este resultado es muy relevante; ya que podríamos concluir que son las avenidas del río Ebro las que provocan mayores daños en la desembocadura del río Gállego; y no tanto, las avenidas del río Gállego. Por otro lado, el retraso de la llegada de la onda de avenida de 2021 en el río Gállego podría mejorarse llevando a cabo un estudio más exhaustivo de los coeficientes de rozamiento en la zona; ya que hemos visto que es el factor que más influye en esta variable y quizás necesitaría una calibración con más eventos de avenida.

Por último, se ha procedido al estudio en detalle de la confluencia del río Ebro con el río Gállego en su desembocadura, reduciendo el dominio de estudio y analizando en detalle las variables del flujo en esta zona: alturas de agua y vectores velocidad del flujo. En este caso, es evidente la influencia de los valores del coeficiente de rozamiento en el cauce del río Ebro que influyen en la desembocadura del río Gállego provocando que cuanto mayor sea este coeficiente, menor es la velocidad promedio del flujo de agua en esa zona,

produciendo una altura de agua mayor y consecuentemente, un desbordamiento mayor. Los resultados mostrados en la sección 3.2 nos hacen ver la importancia de la simulación numérica en el estudio de las medidas de mitigación de este tipo de eventos, que permite, en el caso de tener bien ajustado el modelo de simulación, predecir qué zonas se van a inundar o no, y qué tipo de medidas se pueden proponer para evitarlas. El aumento/disminución de los valores de los coeficientes de rozamiento puede hacer que el río se desborde o no en zonas concretas; con lo cual, podemos buscar qué tipo/s de elemento/s estructural/es o natural/es podríamos colocar para remediar este efecto.

Este trabajo ha servido para determinar los primeros puntos débiles y las causas de deterioro y localización concreta de la zona afectada en la desembocadura del río Gállego, ante eventos de avenida; y establecer un primer modelo de simulación de la zona, calibrado y usable para simulaciones futuras; aunque no se descarta realizar una batería de simulaciones de eventos pasados para calibrar mejor el coeficiente de rozamiento del río Gállego. Posteriormente, antes de acometer; medidas estructurales o medidas naturales, para mitigar este problema, se considera que sería conveniente realizar un estudio numérico para conocer las medidas óptimas a implementar y así ahorrar costes de inversión.

Bibliografía

- [1] Yuval Noah Harari, 'Sapiens: De Animales a Dioses'. Barcelona, Editorial Debate, 2015.
- [2] Jean Kerisel, 'The Nile and Its Masters: Past, Present, Future: Source of Hope and Anger'. Taylor & Francis, 2001.
- [3] Jordi López-Pujol, 'El proyecto de las Tres Gargantas de China: su historia y sus consecuencias'. Estudios de Asia y África. ISSN 0185-0164, 2008.
- [4] World Meteorological Organization, 'WMO Atlas of Mortality and Economic Losses from Weather, Climate and Water Extremes (1970–2019) ', 2021.
- [5] Instituto Geológico y Minero de España. Consorcio de Compensación de Seguros. 'ESTADÍSTICA RIESGOS EXTRAORDINARIOS. Serie 1971-2020', 2021.
- [6] Pablo Poyo Casado, 'Análisis mediante simulación numérica de la influencia del río Ebro en las inundaciones del río Gállego', Trabajo Fin de Grado, Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de Zaragoza, 2021.
- [7] Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 'Guía metodológica para el desarrollo del sistema nacional de cartografía de zonas inundables', 2011.
- [8] Sistema de Información de Ocupación del Suelo en España, 'Estructura y consulta de la base de datos SIOSE', Versión 3, 2018.
- [9] Frank M. White, 'Mecánica de fluidos', McGraw-Hill, 1979.
- [10] P. Brufau y P. García-Navarro, 'Conceptos básicos de hidrodinámica de superficie', Copy Center (Zaragoza), 2001.
- [11] G. Arcement and V. Schneider, 'Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains'. no. 2339. U.S. Geological Survey. Water-supply paper, 1984.
- [12] V. Te Chow, 'Open-channel hydraulics', McGraw-Hill Civil Engineering Series, McGraw-Hill, 1959.
- [13] P. Brufau, M.E. Vázquez-Cendón, P. García-Navarro, 'A numerical model for the flooding and drying of irregular domains', International Journal for Numerical Methods in Fluids, 39(3):247-275, 2002.
- [14] J. Murillo y P. García-Navarro, 'Weak solutions for partial differential equations with source terms: Application to the shallow water equations', Journal of Computational Physics, 229:11 4327-4368.

Anexos

A. Preparación del modelo

Además del software de simulación utilizado para la modelización del área de estudio, en este trabajo se han utilizado dos herramientas adicionales para la preparación de las simulaciones y el posterior análisis de resultados: QGIS y Paraview.

QGIS es un procesador de información geográfica genérico, que alberga la herramienta de cálculo numérico RiverFlow2D. Esta herramienta facilita mucho la labor de la gestión de la introducción de datos en RiverFlow2D; ya que permite trabajar con formatos ráster y vectoriales, así como generar mallas y las bases de datos de las que precisamos.

Paraview es una aplicación de código abierto cuyo propósito principal es interpretar los resultados obtenidos. Con las diferentes funciones y filtros que posee, permite la observación de la evolución del flujo y las características del mismo a través de la representación espacial de sus variables (calados, velocidades, etc.).

A.1. QGIS

Tal y como se indica en su propia página¹, QGIS es “*un Sistema de Información Geográfica libre y de Código Abierto*”. El sistema está compuesto por un conjunto de aplicaciones que permiten la creación de datos, mapas y modelos georeferenciados.

En el presente trabajo se partía de un Modelo Digital de Terreno (MDT), cuya información topográfica alimenta una malla de cálculo preliminar realizada con anterioridad [6]. Sobre dicha malla, se ha trabajado en su refinamiento y perfeccionamiento para conseguir datos más precisos. Los MDT con la información topográfica de la zona seleccionada pueden descargarse de forma libre de la página web del IGN². La delimitación del dominio de estudio queda establecida por la malla preliminar realizada, mientras que la discretización espacial de las celdas se modifica para ajustar mejor los resultados.

A continuación se detallará el proceso de refinamiento seguido para obtener un modelo adecuado para realizar las simulaciones.

A.1.1. Refinamiento de la malla

La malla preliminar realizada en un proyecto anterior carece de un refinamiento adecuado en zonas sensibles como motas cerca del cauce. Se ha mejorado y optimizado para encontrar un equilibrio entre un bajo número de celdas y una precisión suficiente en la discretización. Para todo ello, se ha recurrido a dos

¹ <https://www.qgis.org/es/site>

² <http://www.ign.es/web/ign/portal>

herramientas que QGIS facilita para este objetivo: las denominadas *DensityLines* y *MeshDensityPolygon*.

Las *DensityLines* permiten la generación de celdas más pequeñas en las zonas de estudio en la que nos interesa, esto es, el curso de agua que sigue el río y sus alrededores. El valor de la *DensityLine* indica la magnitud en metros con la que van a contar las celdas que esta genere; por tanto, un valor de 10 indica que estamos generando celdas de 10 metros. En la imagen siguiente puede apreciarse el juego que debe realizarse a la hora de introducir el valor adecuado de las *DensityLines*: interesa tener una gran precisión en la zona que sigue el curso de agua del río, pero fuera del mismo no nos interesa, al generar una gran cantidad de nodos fuera de nuestra área de estudio. Es por ello que las *DensityLines* de las zonas de los meandros tienen valores que oscilan entre 30 y 50; mientras que en el curso del río se encontrarán con un valor de 10-15.

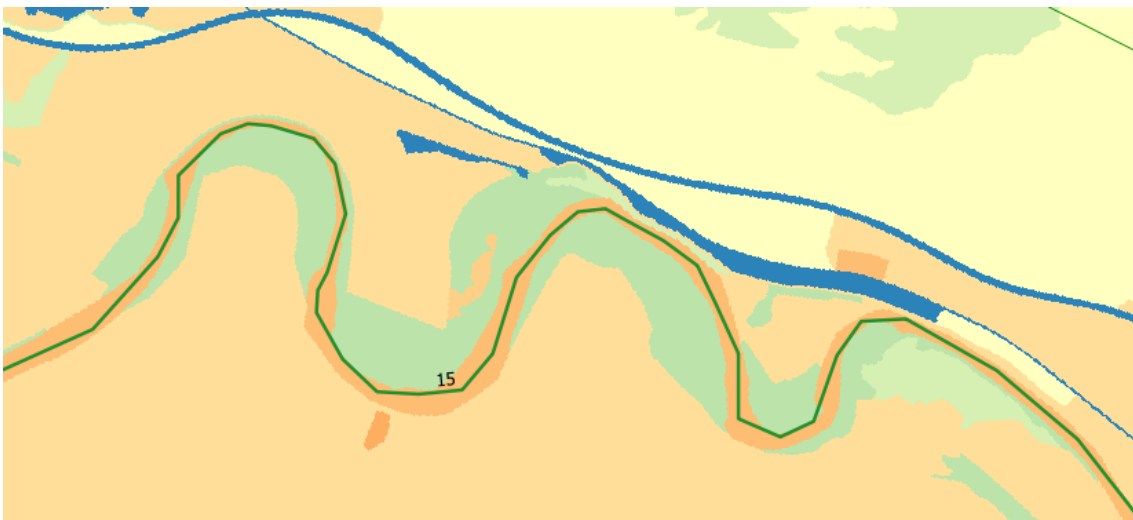


Figura A.1.1.1. *DensityLines* colocadas únicamente sobre el curso del río.

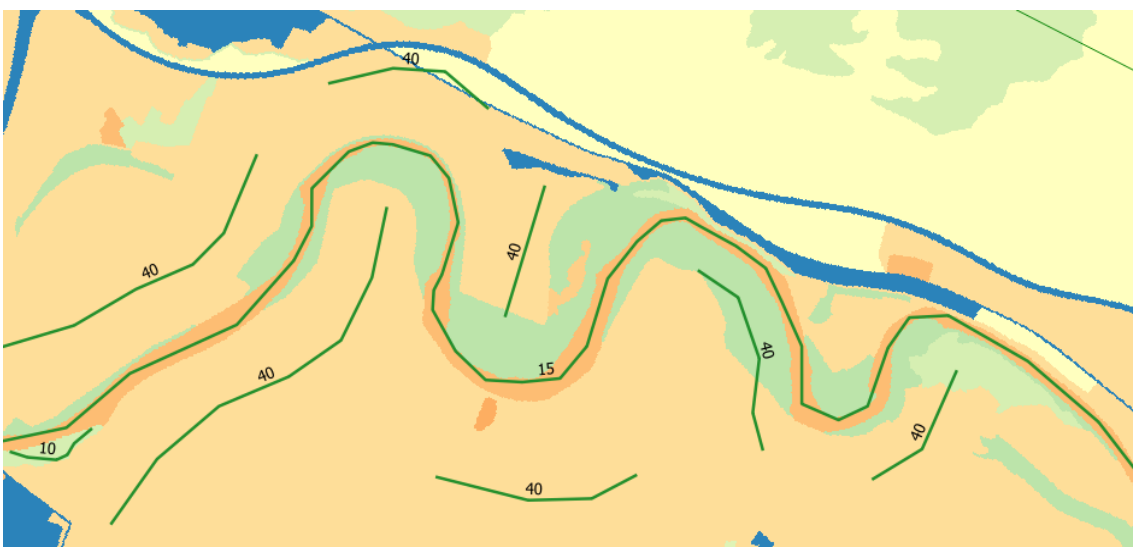


Figura A.1.1.2. *DensityLines* colocadas en el curso y alrededores del río.

Las *DensityLines*, sin embargo, deben colocarse de manera que al generar la malla no queden triángulos equiláteros con ángulos muy agudos, ya que el programa tiene problemas para calcular las áreas que forman parte de este triángulo, disparando el costo computacional y los tiempos de simulación.

En las Figuras A.1.1.1 y A.1.1.2 puede observarse que las *DensityLines* tienen marcado el valor que tienen sobre su contorno, se trata este de un pequeño truco que no aparece en el manual de QGIS. Para ello, sobre el panel de capas que se encuentra normalmente desplegado en la parte izquierda, se hace *click* derecho en la capa de la componente a la que se le quiera añadir el nombre (ver Figura A.1.1.3). Se pulsa en Propiedades, y dentro de la ventana que se ha abierto, se va a la sección Etiquetas. Dentro de la misma, en la pestaña de la parte superior se selecciona la opción de *Single Labels* y en la pestaña Valor que se encuentra justo debajo se selecciona *Cell Size*. Si se acepta esta nueva configuración el valor asignado a cada *DensityLine* será visible.

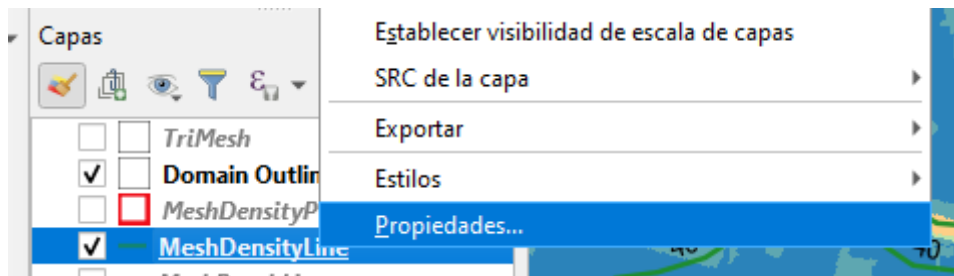


Figura A.1.1.3. Opción de QGIS para abrir propiedades de una capa.

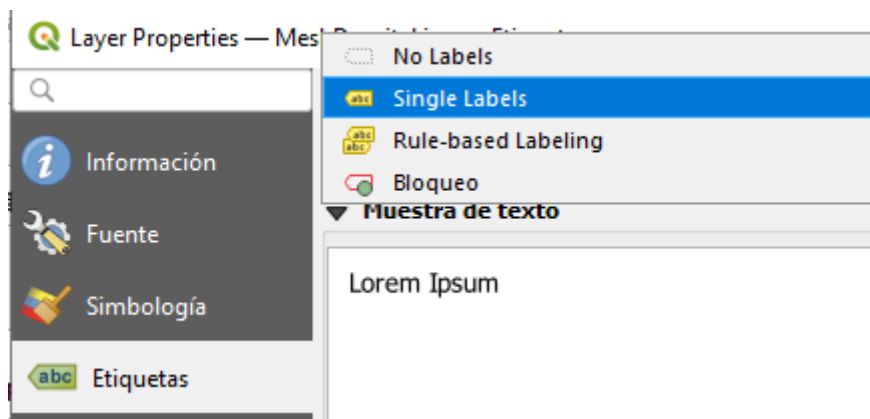


Figura A.1.1.4. Subpartado de Etiquetas dentro de la ventana de Propiedades.

En las dos siguientes figuras podrá apreciarse en un meandro del río el efecto de refinamiento que generan las *DensityLines*. En la Figura A.1.1.5 sólo se ha introducido una *DensityLine* tomando en cuenta sólo el curso del río, como puede apreciarse en la anterior Figura A.1.1.1, mientras que en la Figura A.1.1.6 se han introducido las *DensityLines* como puede apreciarse en la Figura A.1.1.2.

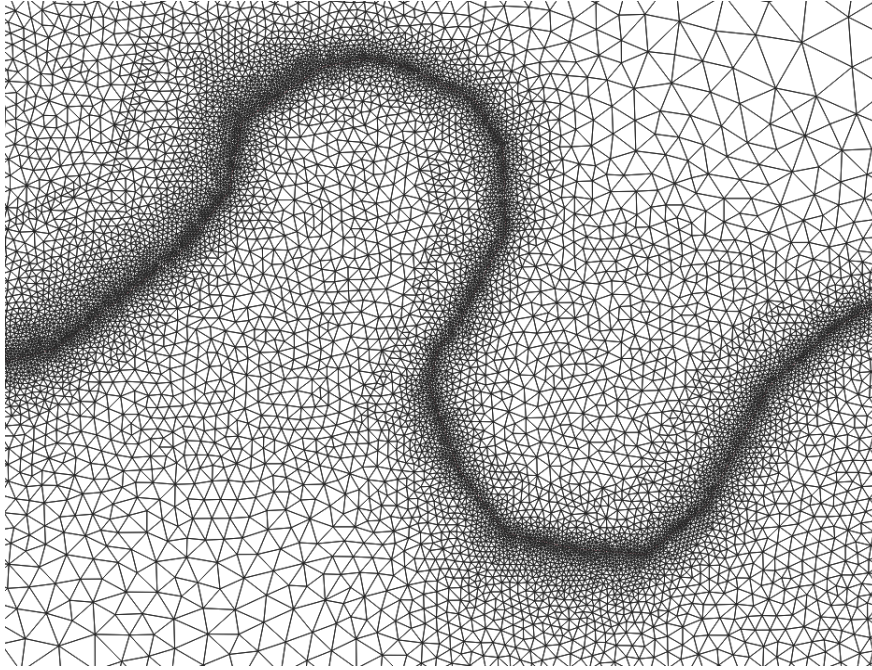


Figura A.1.1.5. Malla resultante con *DensityLines* únicamente en el curso del río.

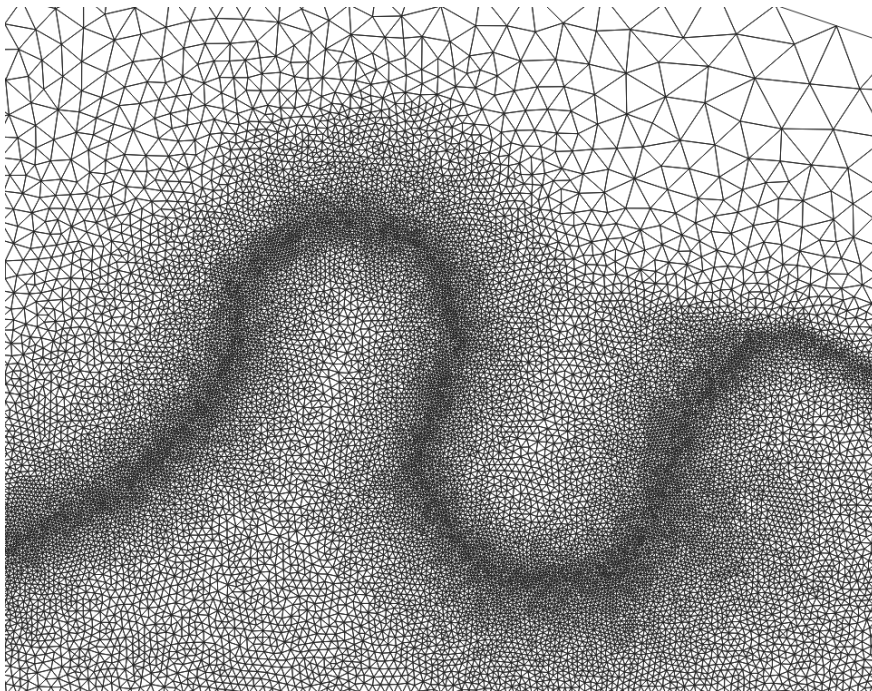


Figura A.1.1.6. Malla resultante con *DensityLines* en el curso y alrededores del río.

Debe de tenerse cuidado a la hora de asignar valores elevados a las *DensityLines*, pues se podría terminar generando una malla con un número excesivo de nodos, lo que elevaría mucho el coste computacional del cálculo y por tanto el tiempo de la simulación. Para nuestro estudio se ha considerado que, como máximo, debe haber 1 000 000 de celdas. En las simulaciones se ha empleado una malla con 821 338 nodos con el dominio extendido, mientras que en el dominio reducido se ha usado una de 556 326 nodos.

A la hora de generar el dominio reducido se detectó un curioso problema. Como ya se ha comentado, no se puede generar una malla si hay *DensityLines* fuera del dominio delimitado por la *DomainOutline*. No obstante, al borrar *DensityLines* QGIS sigue considerando la existencia de las mismas.

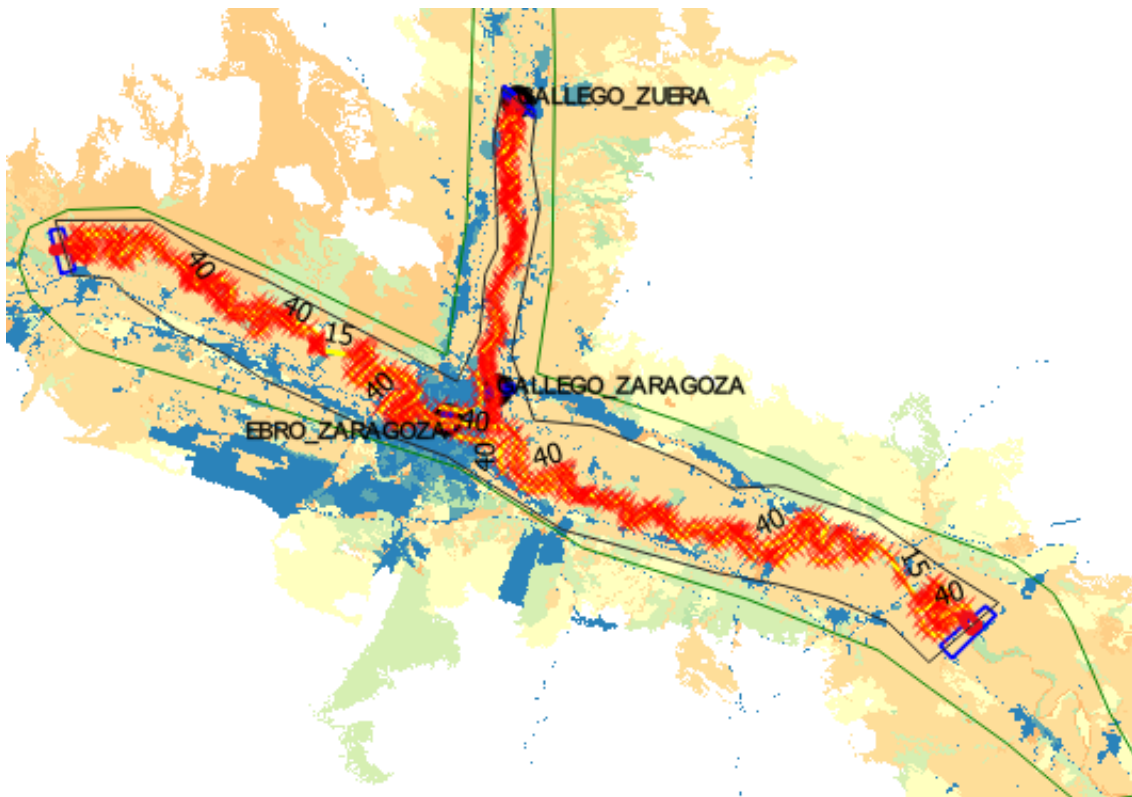


Figura A.1.1.7. Selección de todas las *DensityLines* del dominio reducido.

Para borrar estas *DensityLines* residuales hay que recurrir a una pequeña argucia. Si se selecciona manualmente las *DensityLines* que se quieren mantener y se va a la opción “Abrir atributos de capa” (*click* derecho en la capa de *DensityLine*) se abrirá una ventana con todas las *DensityLines* activas que hemos seleccionado. Si se selecciona la opción de “Invertir selección” (ver figura A.1.1.7) quedarán seleccionadas las *DensityLines* residuales, que se procederán a suprimir.

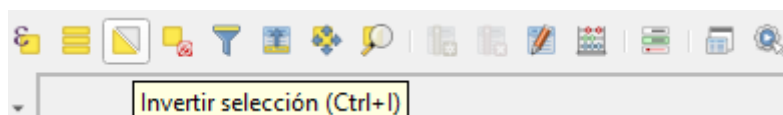


Figura A.1.1.8. Opción de QGIS para invertir selección.

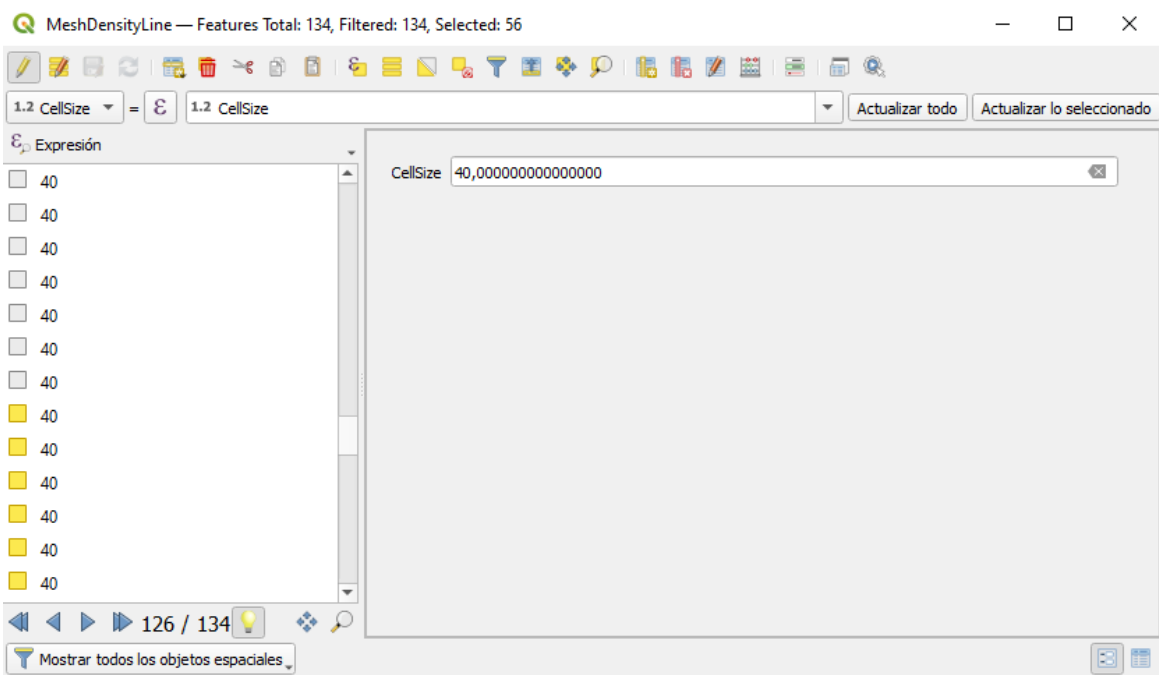


Figura A.1.1.9. Ventana de selección de las DensityLines de nuestro modelo.

Como puede verse en la parte superior de la Figura A.1.1.9, quedaban 56 *DensityLines* residuales de nuestro dominio inicial que no nos eran necesarias. De no haberlas eliminado, se habría generado un error que nos habría impedido la correcta generación de la malla.

El *MeshDensityPolygon* tiene la labor de suplir una de las limitaciones de las *DensityLines*, y es que estas últimas no pueden colocarse fuera del *DomainOutline* sin que QGIS dé lugar a una ventana de error. Esto resulta problemático a la hora de realizar la malla cercana a nuestras condiciones de contorno, ya que aquí se desea que nuestro cauce tenga la misma precisión que en el resto del dominio. Por ello, se introducen estos polígonos para conseguir la precisión deseada. Su valor, al igual que en las *DensityLines*, da información sobre el tamaño en metros que van a tener los lados de los triángulos de malla que se van a formar.

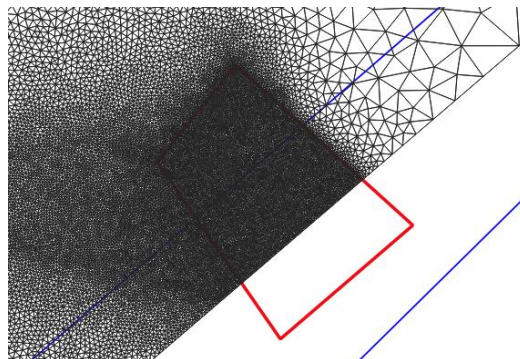


Figura A.1.1.10. *MeshDensityPolygon* (en rojo) colocando en el área de una de nuestras condiciones de contorno.

Hecho esto, se está en disposición de generar la nueva malla. Para ello, se selecciona la opción de Generar la malla TriMesh en la barra de herramientas de acceso rápido de la parte superior de nuestra pantalla. Las capas de *DomainOutline*, *MeshDensityLine* y *MeshDensityPolygon* deberán estar activas si se desea que sean tenidas en cuenta a la hora de generar la nueva malla.

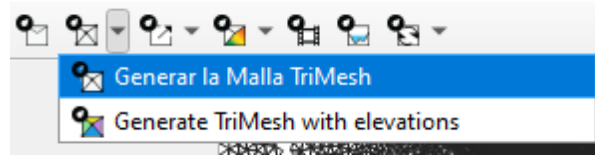


Figura A.1.1.11. Opción de QGIS de Generar la Malla TriMesh

A.1.2. Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno proporcionan la información de las variables en los contornos del dominio donde el esquema numérico no tiene información suficiente para calcular. En la práctica, establecen las condiciones en las que el flujo entra y sale del dominio para representar los eventos de avenida. En las Figuras A.1.2.1 y A.1.2.2 se pueden apreciar para el dominio extendido y reducido, si se observa en los rectángulos azules de los extremos de nuestro dominio.

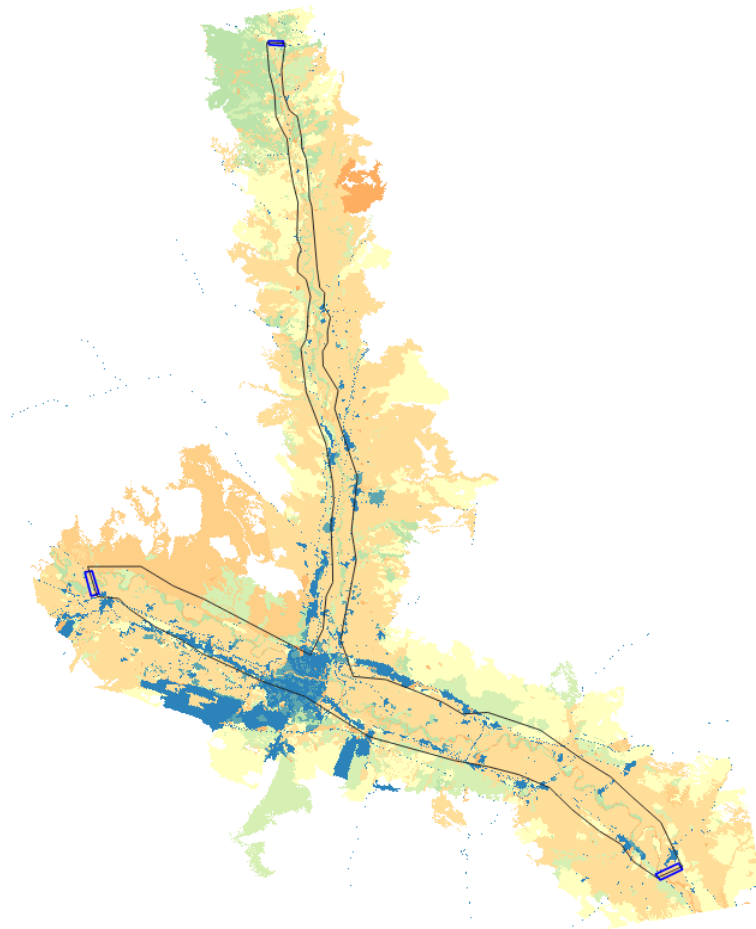


Figura A.1.2.1. Localización de las condiciones de contorno en nuestro dominio inicial.



Figura A.1.2.2. Localización de las condiciones de contorno en nuestro dominio reducido.

Establecidas las geometrías, se debe seleccionar qué condición de contorno es la adecuada. QGIS va a dar una serie de opciones entre las cuales se puede elegir (ver Figura A.1.2.3).

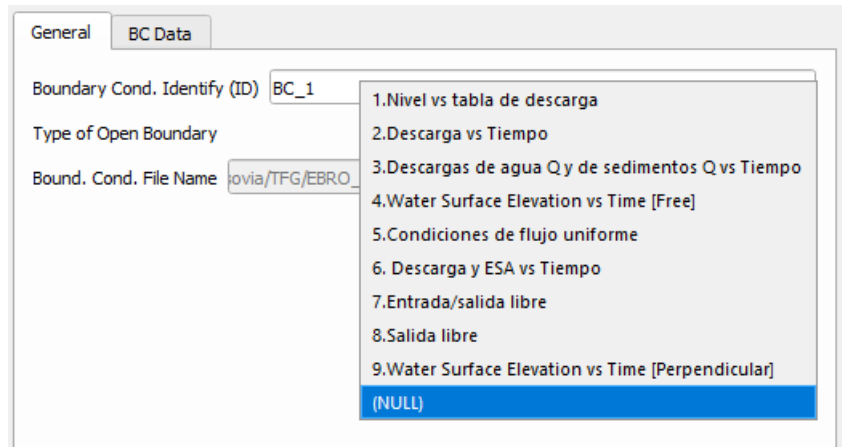


Figura A.1.2.3. Opción de QGIS para seleccionar condiciones de contorno.

Se seleccionan para las entradas de caudal la condición correspondiente a “2. Descarga vs Tiempo”. Esta opción va a permitir introducir los hidrogramas de caudal de un período de tiempo acotado para realizar los estudios pertinentes (evolución temporal del caudal). Con respecto a la introducción de los datos, se hacen a través de unos ficheros que el usuario fija a su discreción. La particularidad que hay en la introducción de los mismos es que, a pesar de que Riverflow2D trabaja con unidades del Sistema Internacional, en el caso del tiempo hace una excepción, y en lugar de emplear la unidad correspondiente, que serían los segundos, emplea horas. Esto obliga a realizar un pequeño ajuste de los datos a introducir, ya que generalmente se extraen de hidrogramas que

tienen datos de caudal cada 15 minutos. Para la condición de contorno de salida de caudal seleccionaremos la opción “8. Salida libre”. En los casos a simular se tendrán dos condiciones de contorno de entrada, una para cada río, que coincidirán con las estaciones de aforo en las que tenemos registros, y una condición de contorno de salida.

A.1.3. Coeficiente de rozamiento de Manning y capa ráster asociada

El coeficiente de rugosidad de Manning (denotado con la letra n) es un índice que determina la resistencia del flujo en un canal provocado por la fricción con el fondo. Este valor es importante ya que determinará la influencia del rozamiento en las simulaciones que se realicen.

En las primeras simulaciones se ha optado por emplear un coeficiente de rozamiento de Manning constante para toda el área de estudio, como se había establecido en el proyecto preliminar [6]. Sin embargo, esta hipótesis no es lo suficientemente precisa ni tiene en cuenta las singularidades de cada zona del terreno. En función de uso y naturaleza, cada fracción del suelo tiene un rozamiento distinto, que conduce a coeficientes diferentes de Manning y que se determina a partir de diversos cálculos. El valor final, según los usos del suelo del SIOSE, puede consultarse en la Guía metodológica para el desarrollo del sistema nacional de cartografía de zonas inundables [7].

Sin embargo, la distribución espacial del coeficiente de rozamiento de Manning no está disponible directamente para descargar, sino que requiere de un procesamiento de la información disponible para la construcción de un ráster con una distribución de coeficientes de Manning. A la hora de importar la información para trabajar en QGIS se tiene una capa con los valores de la clasificación CODIIGE de cubiertas del suelo en formato ráster. Estos valores deben de transformarse de forma que a cada valor, que corresponde a un uso de suelo, se le asigne su coeficiente de rozamiento de Manning adecuado. Para ello, se empleará una herramienta que QGIS tiene en su repertorio: la calculadora ráster. Esta nos permite realizar cálculos sobre la base de valores de píxeles de un ráster escribiendo los resultados en una nueva capa.

Para abrir la calculadora ráster, vamos a la sección Ráster, y en el desplegable seleccionamos Calculadora ráster.

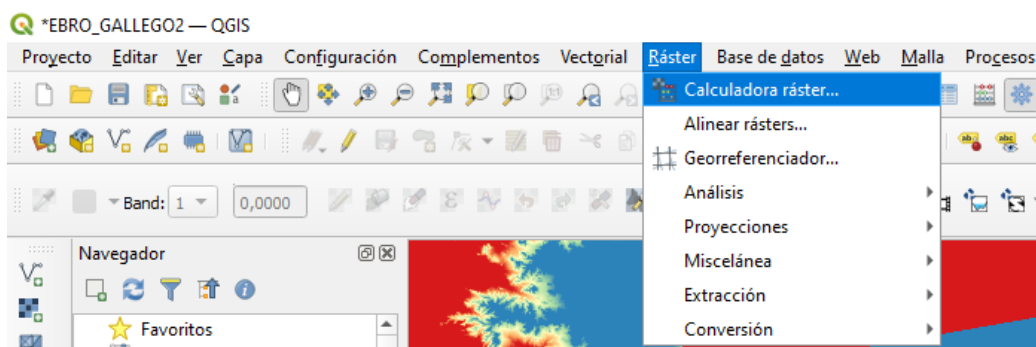


Figura A.1.3.1. Opción de QGIS para abrir la calculadora ráster.

Se abrirá a continuación una nueva ventana con varios apartados para seleccionar cómo será el ráster nuevo a calcular.

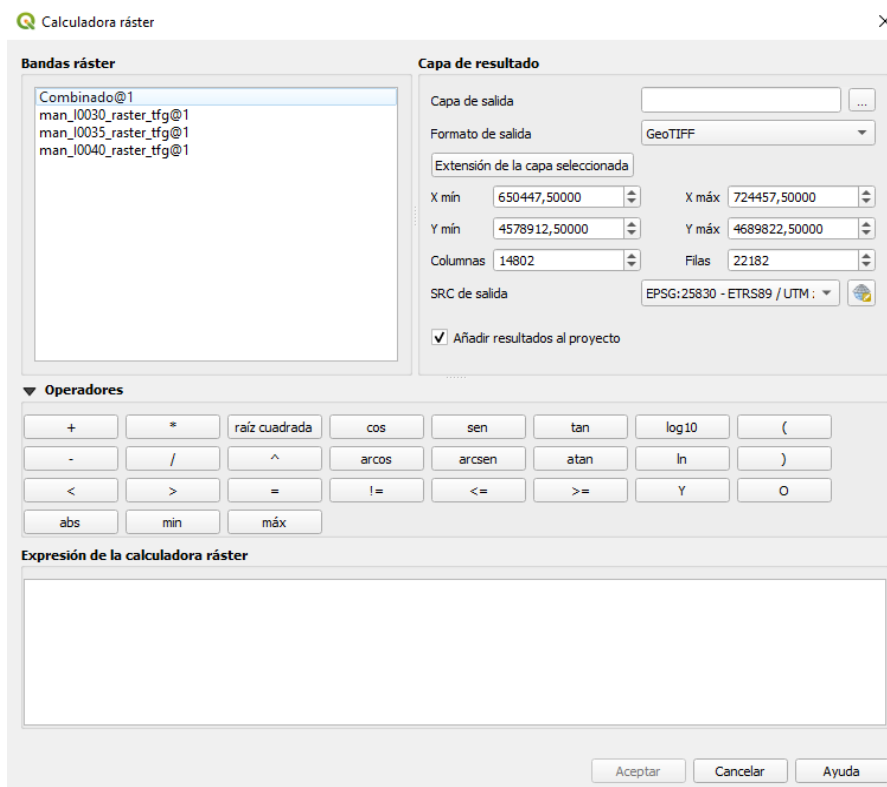


Figura A.1.3.2. Ventana de opciones de la calculadora ráster.

Podemos observar varias secciones:

1. Bandas ráster. En este recuadro se muestran los nombres de todos los rásteres disponibles que usar como base para operar.
2. Capa de resultado. Permite definir la capa y el formato de salida, la extensión de la capa de salida...
3. Operadores. Una ayuda de QGIS con los operadores más comunes, en caso de que el usuario desconozca la sintaxis/nomenclatura que hay que emplear en la expresión de la calculadora ráster.
4. Expresión de la calculadora ráster. La expresión que empleará la calculadora para hacer el cálculo.

Para ilustrar el funcionamiento de la calculadora, se hará con un sencillo ejemplo. Por ejemplo, supongamos que queremos multiplicar por un factor los valores de un ráster. Haremos doble *click* en el ráster que deseemos en la lista de «Bandas ráster» (por ejemplo, «Combinado@1» y se añadirá al cuadro de expresión de la calculadora ráster «Combinado@1». Si luego se hace *click* en el operador de multiplicar (o se añade un asterisco manualmente) se añadirá * a la expresión de cálculo, y si posteriormente escribimos el factor que se quiera, quedará la siguiente expresión.

$$"Combinado@1" * 2$$

Si se le da a aceptar, se generará un nuevo ráster en el que todos los valores del mismo se habrán multiplicado por 2. Pero podemos añadir más variables a nuestra expresión. Supongamos ahora que queremos sumar a nuestro ráster el valor de “man_i0030_raster_tfg@1” multiplicado por 5. La expresión que nos quedaría sería la siguiente:

$$"Combinado@1" * 2 + 5 * "man_i0030_raster_tfg@1"$$

Existen, además, operadores condicionales que se pueden usar entre paréntesis de modo que, si sólo se quieren modificar los valores que son iguales a uno que especifiquemos, se hace. Por ejemplo, si consideramos la siguiente expresión:

$$("Combinado@1" = 511) * "Combinado@1" * 2 + ("Combinado@1" \neq 511) * "Combinado@1"$$

Se tiene en el primer sumando una condición que establece que si el ráster es igual al valor establecido, se multiplique el mismo por 2, y, si no es así, que se deje como está. De esta última expresión se puede deducir la fórmula a emplear para este caso. Se introducirán en la fórmula todos los valores posibles de usos del suelo con su respectivo valor de rozamiento de Manning asociado y el ráster que saldrá como resultado será una superficie con miles de polígonos distintos que, en efecto, tendrán los valores de Manning que nos interesan.

4.1 TABLA TC_SIOSE_CODIIGE CON LA CLASIFICACIÓN CODIIGE DE CUBIERTAS DEL SUELO

CODIIGE	DESCRIPCIÓN
111	Casco
112	Ensanche
113	Discontinuo
114	Zona verde urbana
121	Instalación agrícola y/o ganadera
122	Instalación forestal
123	Extracción minera
130	Industrial
140	Servicio dotacional
150	Asentamiento agrícola y huerta
161	Red viaria o ferroviaria
162	Puerto
163	Aeropuerto
171	Infraestructura de suministro
172	Infraestructura de residuos
210	Cultivo herbáceo
220	Invernadero
231	Frutal cítrico
232	Frutal no cítrico
233	Viñedo
234	Olivar
235	Otros cultivos leñosos
236	Combinación de cultivos leñosos
240	Prado
250	Combinación de cultivos
260	Combinación de cultivos con vegetación
311	Bosque de frondosas
313	Bosque mixto
312	Bosque de coníferas
320	Pastizal o herbazal
330	Matorral
340	Combinación de vegetación
351	Playa, duna o arenal
352	Roquedo
353	Temporalmente desarbolado por incendios
354	Suelo desnudo
411	Zona húmeda y pantanosa
412	Turbera
413	Marisma
414	Salina
514	Lámina de agua artificial
511	Curso de agua
512	Lago o laguna
513	Embalse
515	Mar
516	Glaciar y/o nieve perpetua

Figura A.1.3.3. Tabla con la clasificación CODIIGE de cubiertas del suelo.

Veámoslo con un ejemplo sencillo. Si se acude a la *Guía metodológica para el desarrollo del sistema nacional de cartografía de zonas inundables* se verá que el valor del coeficiente de rozamiento de Manning asignado al uso del suelo determinado como “Casco” es de 0.01. Si se desea que a partir de nuestro ráster inicial en el que “Casco” tiene un valor asignado de 111 se nos genere uno nuevo en el cual su nuevo valor sea 0.01 se usará el siguiente sumando:

$$("Combinado@1" = 111) * 0.01$$

Si se repite el mismo proceso de redacción de cada uno de los sumandos de cada uno de los datos expuestos en la tabla de la Figura A.1.3.3 obtendremos la expresión final de cálculo de nuestro ráster de trabajo. La operación de generación del mismo lleva un tiempo que viene determinado por el tamaño y la cantidad de datos contenidos en la capa ráster. En nuestro caso particular, se precisó de aproximadamente 30 minutos para su obtención.



Figura A.1.3.4. Capa con ráster de Manning generada. A la izquierda, leyenda con sus valores correspondientes por color.

En la figura A.1.3.4 puede apreciarse el resultado de que la generación del nuevo ráster se ha realizado de manera adecuada. Todos los valores oscilan entre 0.025 y 0.1, y no hay ningún valor nulo, ya que si no, se mostraría de color rojo intenso. En el caso de la imagen se ve la ciudad de Zaragoza, que al tratarse en su mayoría de zona de “Casco” (valor $n=0.01$) o de “Zona verde urbana” (valor $n=0.09$), se muestra en tonos azules.

En la Figura A.1.3.5 se adjunta una tabla detallada con los valores n para cada uso del suelo que se han empleado en la calculadora ráster para obtener el ráster de Manning que se ha empleado en nuestras simulaciones.

Descripción	Valor n	Descripción	Valor n
Casco (111)	0.100	Prado (240)	0.035
Ensanche (112)	0.100	Combinación de cultivos (250)	0.040
Discontinuo (113)	0.090	Combinación de cultivos con vegetación (260)	0.050
Zona verde urbana (114)	0.090	Bosque de frondosas (311)	0.070
Instalación agrícola y/o ganadera (121)	0.100	Bosque mixto (313)	0.070
Instalación forestal (122)	0.090	Bosque de coníferas (312)	0.070
Extracción minera (123)	0.040	Pastizal o herbazal (320)	0.070
Industrial (130)	0.100	Matorral (330)	0.035
Servicio dotacional (140)	0.035	Combinado de vegetación (340)	0.0625
Asentamiento agrícola y huerta (150)	0.040	Playa, duna o arenal (351)	0.0625
Red viaria o ferroviaria (161)	0.100	Roquedo (352)	0.025
Puerto (162)	0.100	Temporalmente desarbolado por incendios (353)	0.030
Aeropuerto (163)	0.100	Suelo desnudo (354)	0.040
Infraestructura de suministro (171)	0.040	Zona húmeda y pantanosa (411)	0.030
Infraestructura de residuos (172)	0.040	Turbera (412)	0.040
Cultivo herbáceo (210)	0.040	Marisma (413)	0.040
Invernadero (220)	0.040	Salina (414)	0.040
Frutal cítrico (231)	0.060	Lámina de agua artificial (514)	0.025
Frutal no cítrico (232)	0.060	Curso de agua (511)	0.040
Viñedo (233)	0.050	Lago o laguna (512)	0.025
Olivar (234)	0.060	Embalse (513)	0.025
Otros cultivos leñosos (235)	0.060	Mar (515)	0.025
Combinación de cultivos leñosos (236)	0.055	Glaciar y/o nieve perpetua (516)	0.025

Figura A.1.3.5. Tabla con usos del suelo y su correspondiente valor n.

A.1.4. Puntos de observación y secciones de caudal

Los puntos de observación (*ObservationPoints*) y las secciones de caudal (*CrossSections*) son las herramientas necesarias para registrar principalmente los valores de nivel y de caudal de los puntos del río que se consideren de interés. Para evitar alargar los tiempos de cálculo de la simulación, es preciso que sólo se pongan los puntos de observación y las secciones de caudal que sean vitales para nuestro estudio. En nuestro caso, para el dominio inicial hemos puesto tres puntos de observación correspondientes a las estaciones A089 del río Gállego en Zaragoza, A209 del río Gállego en Zuera y A011 del río Ebro en Zaragoza; con las correspondientes secciones de caudal (ver Figura A.1.4.1). En el dominio reducido, sin embargo, interesaba hacer un análisis detallado de la

confluencia, lo que ha llevado a colocar una gran cantidad de las mismas, como puede apreciarse en la Figura A.1.4.2.

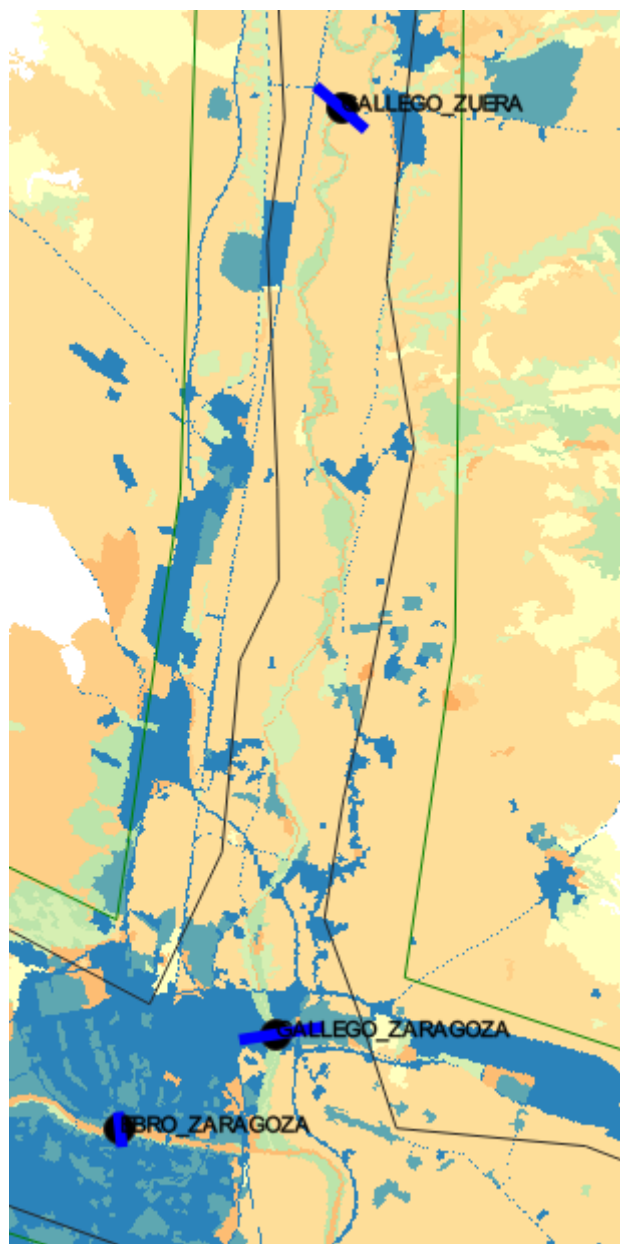


Figura A.1.4.1. Sondas y secciones de nuestro dominio de calibración.

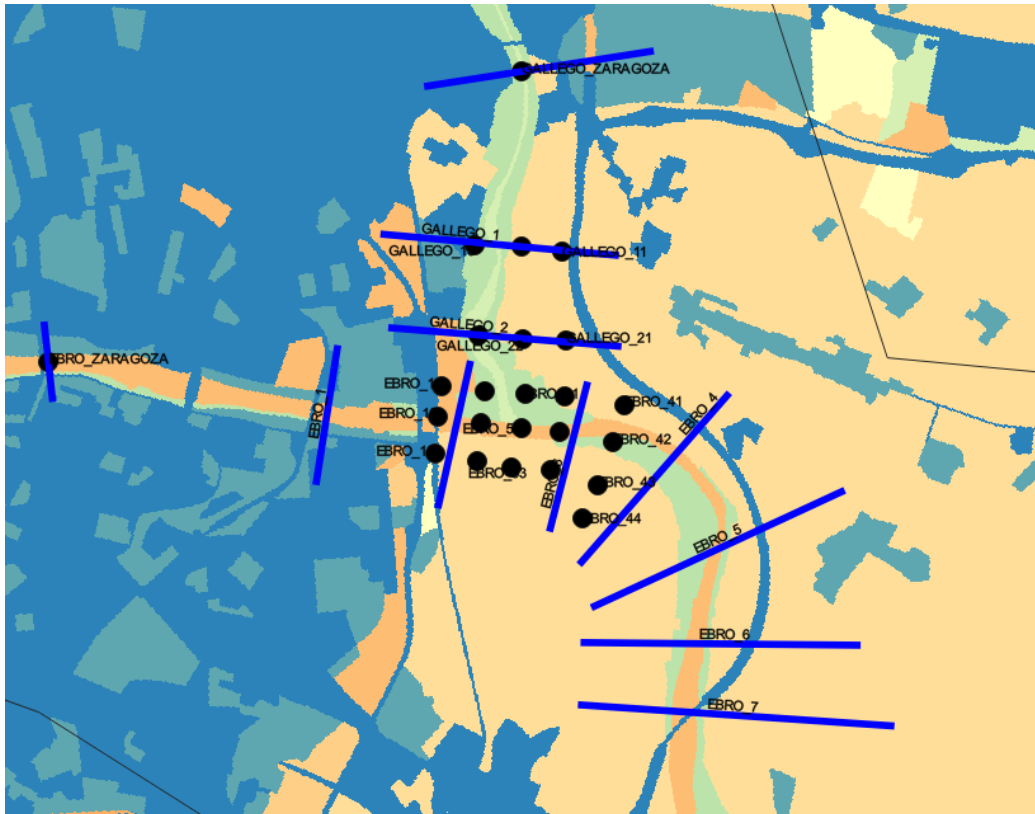


Figura A.1.4.2. Sondas y secciones de nuestro dominio de análisis detallado de la confluencia.

Las coordenadas de los *ObservationPoints* pueden introducirse a mano. Esto es especialmente útil dado que en la página del SAIH Ebro se pueden encontrar las coordenadas X e Y exactas donde están situadas las estaciones de aforo. Para hacerlo, simplemente se debe acudir a la herramienta de selección de vértices (seleccionando previamente la capa y haciendo *click* en el icono con un lapicero de Conmutar Edición), y hacer *click* derecho en la sonda cuya ubicación se quiere modificar. Entonces se abrirá en la esquina inferior derecha el editor de vértices, donde se podrán introducir las coordenadas deseadas.

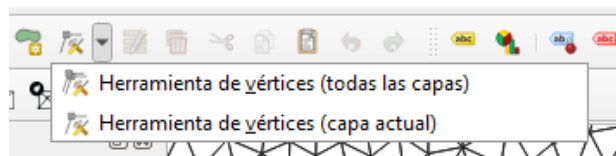


Figura A.1.4.3. Opción de QGIS de herramienta de vértices

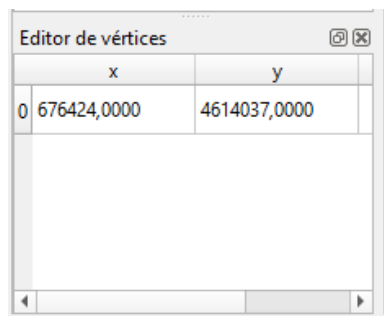


Figura A.1.4.4. Opción de QGIS del editor de vértices

Las secciones de caudal (*CrossSections*) son líneas que están definidas entre dos puntos, entre los cuales se traza una sección imaginaria que mide el caudal que la atraviesa en todo momento. A la hora de situar las *CrossSections* hay que tener cuidado con su orientación, puesto que si se colocan los puntos en el orden que no es adecuado los datos de caudal que registrará estarán con signo negativo. Si bien esto no es un gran problema, pues lo único que nos interesa es la magnitud del valor de caudal, conviene colocarlas con la orientación adecuada para ahorrar tiempos a la hora de tratar los datos obtenidos al final de la simulación. En la Figura A.1.4.5 puede apreciarse la orientación por defecto que tienen estas *CrossSections*: el vector normal de las mismas debe estar dirigido en la dirección que uno cree que va a tener el flujo que la va a atravesar.

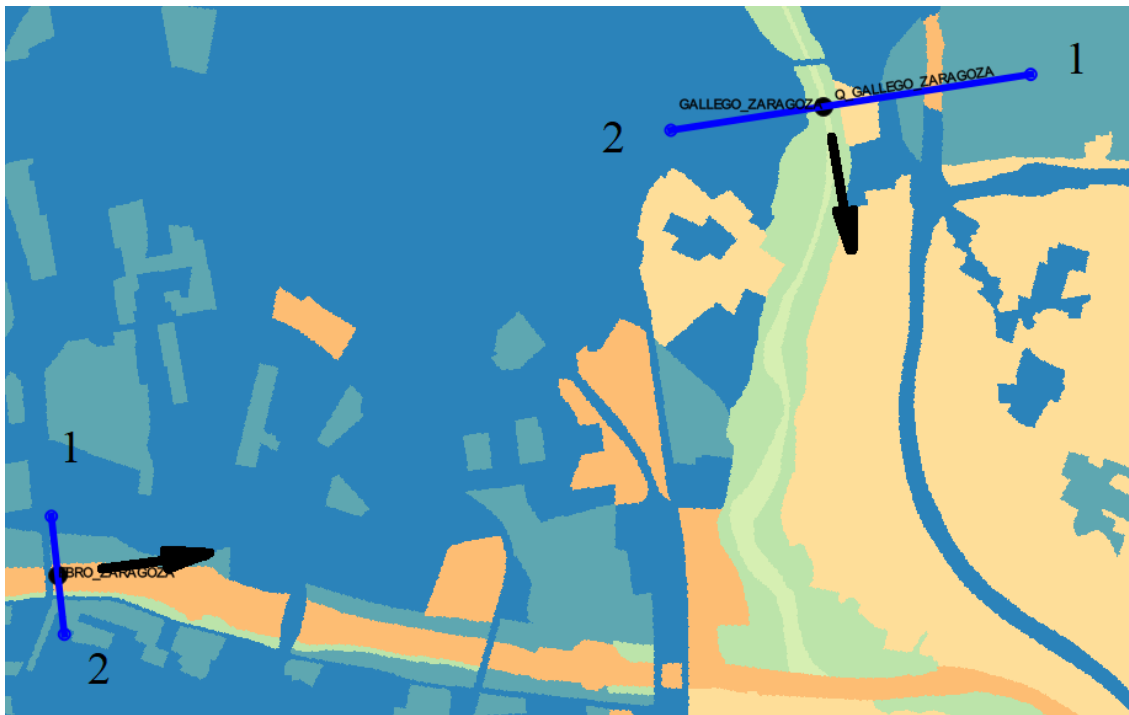


Figura A.1.4.5. *CrossSections*, con su numeración interna e indicando el vector normal de las mismas

La inserción de nuevas *DensityLines*, *ObservationPoints* y *CrossSections* se hace empleando la herramienta de creación de nuevas geometrías, situada justo a la izquierda de herramienta de selección de vértices. Después, pulsaremos manualmente con el ratón donde queramos ubicar los puntos de nuestras geometrías, y pulsamos la tecla *Esc* para terminar de trazar las mismas.

A.1.5. RiverFlow2D: Parámetros de simulación

Aunque no es obligatorio, es recomendable lanzar RiverFlow2D desde el propio QGIS. Para ello, se selecciona la opción Exportar a RiverFlow2D en la barra de herramientas de acceso rápido de la parte superior de nuestra pantalla. Es muy importante tener activadas todas las capas de interés antes de iniciar la exportación, ya que las capas que no estén activas no serán tomadas en consideración y por tanto ignoradas.

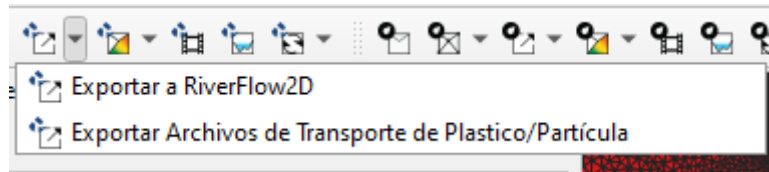


Figura A.1.5.1. Opción de QGIS de Exportar a RiverFlow2D.

Hecho esto se abrirá una ventana en la que se puede introducir el nombre con el que se guardará nuestro proyecto y los ficheros asociados al mismo, así como seleccionar el ráster de terreno que vamos a emplear, y también el ráster de Manning, de así desearlo. Se pulsa en aceptar y tras esperar, se abrirá RiverFlow2D.



Figura A.1.5.2. Ventana de QGIS previa a la exportación de datos a RiverFlow2D.

Antes de lanzar cualquier simulación en RiverFlow2D, se deben establecer los parámetros de simulación. En teoría, sin necesidad de QGIS podrían definirse todos para lanzar la simulación, pero su uso facilita mucho nuestra labor. En todo caso, algunos parámetros deben establecerse obligatoriamente desde RiverFlow2D. Se presenta una lista de los más relevantes que hemos empleado:

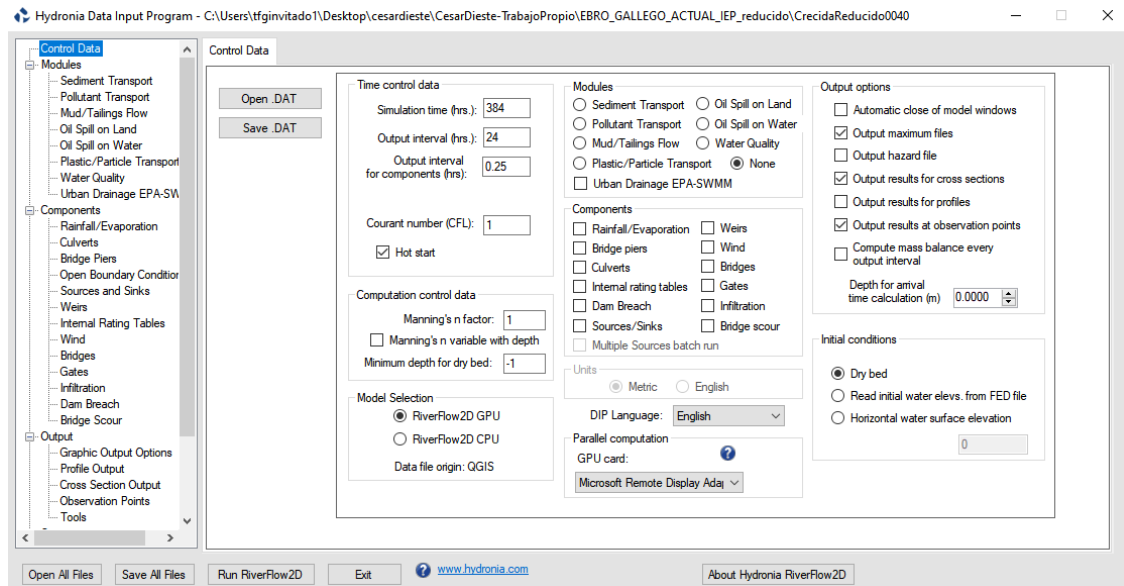


Figura A.1.5.3. Ventana de Riverflow2D con los parámetros relevantes de simulación.

Tiempo de simulación (*Simulation time*). Indica el periodo total de tiempo que nuestra simulación va a tener. Este tiempo de simulación se divide en varios pasos de tiempo Δt : en cada uno de estos pasos de tiempo se calculan los valores de las variables de la ecuación C.6.

Tiempo de volcado de datos (*Output Interval*). Indica cada cuanto tiempo se desea guardar la información de las variables de flujo en cada celda a lo largo de toda nuestra simulación. Los archivos con extensión *.vtk son los que se encargan de almacenar esta información. El número de archivos *.vtk generados está determinado por el tiempo total de la simulación y el tiempo de volcado de datos que establezcamos. Así, para una simulación con 480 horas y de tiempo de simulación y un tiempo de volcado de datos de 24 horas generará 20 archivos *.vtk.

Tiempo de volcado de medidas (*Output interval for components*). Indica cada cuanto tiempo se desea tomar medidas en las secciones de caudal y puntos de observación. Estos datos se guardan respecto al tiempo en diversos ficheros.

Arranque con estado inicial (*Hot start*). Debe marcarse si se desea iniciar la simulación con un estado inicial. En el apartado A.1.6 se detallarán las implicaciones de marcar esta casilla.

Selección del modelo. Indica si los cálculos se hacen sobre GPU o sobre CPU. En el presente caso se va a seleccionar siempre la primera opción, al reducir los tiempos de simulación de manera considerable.

Condición inicial (*Initial condition*). La condición de partida de nuestra simulación. Se seleccionará siempre partir de seco, que es la opción *Dry Bed*.

Opciones de salida (*Output options*). En esta sección se detallan los tipos de ficheros de salida que se desean generar al acabar la simulación.

Es importante verificar antes de lanzar las simulaciones que la introducción de datos que se ha hecho es correcta, ya que si no se perderán valiosas horas. Primero, en la pestaña *Components* se hace *click* en la sección de *Open Boundary Conditions*. Se abrirá la ventana referida en la Figura A.1.5.4, donde se verificará que, en efecto, RiverFlow2D ha detectado bien los datos de los hidrogramas que vamos a introducir por nuestras condiciones de contorno. En caso de que no fuera así, se podrán editar desde aquí de manera manual.

The screenshot shows the 'Open Boundary Conditions' window. At the top, there is a tab labeled 'Open .OBBCP / .OBC'. Below it is a table with three rows:

Group	BC Type	File
1	Discharge vs Time (BCType 6)	Q_IN.dat
2	Free Outflow (BCType 11)	(No File)
3	Discharge vs Time (BCType 6)	Q_EBRO.txt

Below this table, there are two main sections. On the left, 'Cells in Boundary Group 3: Discharge vs Time (BCType 6)' contains a small table:

#	Cell
1	1
2	1
3	1
4	1

On the right, the 'Q_EBRO.txt' data is displayed in a table:

#	Time (hr)	Discharge (m3/s)
1	0	431.866
2	0.25	432.068
3	0.5	432.25
4	0.75	432.429
5	1	432.607
6	1.25	432.779
7	1.5	432.945
8	1.75	433.103
9	2	433.258
10	2.25	433.389
11	2.5	433.525

To the right of the data table are three buttons: 'Plot', 'Load', and 'Save'.

Figura A.1.5.4. Ventana de RiverFlow2D con datos de las condiciones de contorno.

Después, en la pestaña *Output* se seleccionará *Graphic Output Options*. Se observará la ventana referida en la Figura A.1.5.5, donde debe asegurarse de que esté marcada la casilla de *Create graphic output files*. Esto es fundamental para la creación de los archivos *.vtk necesarios para su posterior análisis y extracción de datos en *Paraview*.

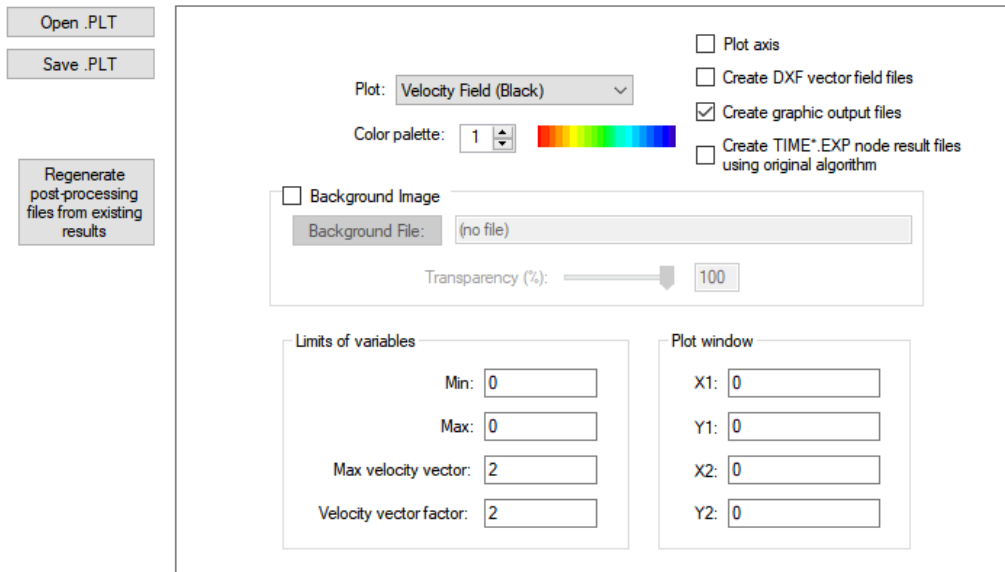


Figura A.1.5.5. Ventana de RiverFlow2D con diversas opciones de generación de ficheros gráficos.

A.1.6. Archivos de introducción y extracción de datos. Carpeta *shape*

Antes de lanzar las simulaciones es preciso analizar y editar algunos ficheros para introducir los datos que deseamos en RiverFlow2D. Por otra parte, se deben conocer cuáles son los ficheros clave que se van generando durante la simulación para saber de dónde extraer los datos. A continuación, se detalla una lista con los más importantes.

stateX.out. Fichero que guarda un estado concreto de la simulación, a modo de fotografía, con los valores asignados a los nodos de nuestra área de estudio en todo momento. El número de archivos stateX.out generados viene determinado por el valor del Tiempo de volcado de datos que hayamos seleccionado en nuestra simulación.

2binitialized.HOTSTART. Un fichero de máxima importancia si se desea una simulación con arranque de condiciones iniciales de flujo estacionario. En la primera columna del mismo se indicará el tiempo en segundos en que se desea que la simulación tome en cuenta este estado y en la segunda el archivo stateX.out que se desea introducir como estado de arranque inicial de la simulación.

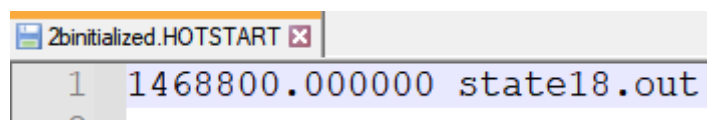


Figura A.1.6.1. Estructura del archivo 2binitialized.HOTSTART.

Q_IN.dat y Q_EBRO.txt. Dos ficheros en los que se introducen los hidrogramas de datos que van entrar como caudal por nuestras condiciones de contorno que se han definido. El archivo Q_IN.dat se reserva para la condición de contorno en el río Gállego y el archivo Q_EBRO.txt se reserva para la condición de contorno en el río Ebro. Ambos archivos tienen la misma estructura, la primera fila del mismo delimita la extensión de filas de datos a leer que va a tener, y en las siguientes filas se colocan los datos en dos columnas; en la primera se almacena el tiempo en horas, y en la segunda, el caudal correspondiente en metros/segundo para cada tiempo estipulado.

Line	Time (hours)	Flow Rate (m/s)
1		1633
2	0	10.535
3	0.25	10.91
4	0.5	10.535
5	0.75	10.535
6	1	10.535
7	1.25	10.535
8	1.5	10.535
9	1.75	10.91

Figura A.1.6.2. Estructura del archivo Q_IN.dat

***.OUTI.** Donde en * estará el nombre del punto de observación correspondiente. Los archivos *.OUTI guardan los valores de diversos parámetros en el intervalo de tiempo establecido como Tiempo de volcado de datos. Por lo general, el valor que extraeremos de los puntos de observación será el nivel (*Depth*) de agua detectado en el punto de observación.

```

=====
                RiverFlow2D
                Build Jul  2 2021
=====
TWO-DIMENSIONAL FINITE VOLUME RIVER DYNAMICS MODEL
(C) COPYRIGHT 2009-2020 Hydronia, LLC.
ALL RIGHTS RESERVED
RUN DATE: 15/Jan/2022
=====

RESULTS FOR CELL: 259153 OBSERVATION POINT ID: EBRO_ZARAGOZA
LOCATED AT COORDINATE: ( 676424.00), ( 4614037.00)

  TIME      U      V  VELOCITY  DEPTH  WSEL  BEDEL_ORI  BEDEL  DELTA_BED  FROUDE  QSX  QSY  QS
(hours)    (m/s)  (m/s)  (m/s)    (m)    (m)    (m)        (m)    (m)        (m)    (m2/s) (m2/s) (m2/s)
0.25000    1.372  -0.217  1.389    2.495  192.655  190.160  0.000  0.000  0.281  0.000  0.000  0.000
0.50000    1.375  -0.217  1.392    2.516  192.676  190.160  0.000  0.000  0.280  0.000  0.000  0.000

```

Figura A.1.6.3. Estructura del archivo *.OUTI

***.XSECS.** Donde en * estará el nombre que se haya asignado a nuestra simulación. El archivo *.XSECS guarda los valores del caudal en todas las secciones de caudal que se hayan colocado en el intervalo de tiempo establecido como Tiempo de volcado de datos.


```

1
2
3 =====
4 =====
5 RiverFlow2D
6 Build Jul  2 2021
7 =====
8 TWO-DIMENSIONAL FINITE VOLUME RIVER DYNAMICS MODEL
9 (C) COPYRIGHT 2009-2020 Hydronia, LLC.
10 ALL RIGHTS RESERVED
11 RUN DATE: 15/Jan/2022
12 =====
13
14 Hydrograph for cross sections in m^3/s, time in hours
15
16 Time          Q-Q_GALLEGO_ZUERA      Q-Q_EBRO_ZARAGOZA      Q-Q_GALLEGO_ZARAGOZA      (
17
18 0.000000      1.054e+001  4.182e+002  9.563e+000  4.312e+002
19 0.250000      8.797e+000  3.707e+002  6.810e+000  3.952e+002
20 0.500000      8.581e+000  3.744e+002  8.278e+000  4.016e+002
21 0.750000      8.543e+000  3.739e+002  8.398e+000  4.053e+002
22 1.000000      8.658e+000  3.723e+002  7.837e+000  4.070e+002

```

Figura A.1.6.4. Estructura del archivo *.XSECS.

* **_gpu_X.vtk**. Donde en * estará el nombre que se haya asignado a nuestro proyecto, y donde pone X una cifra. Fichero gráfico que puede ser abierto en Paraview para realizar, entre otras cosas, imágenes de la mancha de inundación en distintos períodos de tiempo de la simulación y mapas de velocidades. El número de archivos *_gpu_X.vtk. generados viene determinado por el valor del Tiempo de volcado de datos que hayamos seleccionado en nuestra simulación.

* **.qgz**. Donde en * estará el nombre que se haya asignado a nuestro proyecto. Archivo en el que se guarda nuestro proyecto de QGIS, importante tenerlo localizado en todo momento para hacer los cambios que corresponda.

Por otra parte, tenemos la carpeta *shape*. La carpeta *shape* está asociada a nuestro proyecto *.qgz y en ella se guarda toda la información referente a las capas, exceptuando las capas ráster, que van al margen. Esto significa que si se transfiere la carpeta *shape* de un proyecto local a otro, los datos referentes a todas las capas del proyecto que se tengan -exceptuando los rásteres- quedarán sustituidos sin necesidad de tener que hacerlo manualmente en QGIS. En la carpeta *shape* se pueden encontrar diversos archivos, con diversas extensiones, como *DomainOutline.cpg*, *DomainOutline.dbf.*, *DomainOutline.prj*... Aunque el autor del presente texto desconoce qué clase de datos se guardan en cada extensión, puede asegurar que en el conjunto de datos titulado *DomainOutline.** se guardan los datos referentes a la línea que fija los límites del área de mallado de nuestro proyecto.

Boundary Conditions.cpg	08/09/2021 18:32	Archivo CPG	1 KB
Boundary Conditions.dbf	12/01/2022 19:35	Archivo DBF	2 KB
Boundary Conditions.prj	08/09/2021 18:32	Archivo PRJ	1 KB
Boundary Conditions.shp	12/01/2022 19:35	Archivo SHP	1 KB
Boundary Conditions.shx	12/01/2022 19:35	Archivo SHX	1 KB
CrossSections.cpg	08/09/2021 18:32	Archivo CPG	1 KB
CrossSections.dbf	20/01/2022 20:49	Archivo DBF	4 KB
CrossSections.prj	08/09/2021 18:32	Archivo PRJ	1 KB
CrossSections.shp	20/01/2022 20:49	Archivo SHP	2 KB
CrossSections.shx	20/01/2022 20:49	Archivo SHX	1 KB
Domain Outline.cpg	08/09/2021 18:32	Archivo CPG	1 KB
Domain Outline.dbf	12/01/2022 19:29	Archivo DBF	1 KB
Domain Outline.prj	08/09/2021 18:32	Archivo PRJ	1 KB
Domain Outline.shp	12/01/2022 19:29	Archivo SHP	1 KB
Domain Outline.shx	12/01/2022 19:29	Archivo SHX	1 KB

Figura A.1.6.5. Estructura de la carpeta *shape*.

A.2. Paraview

Como se indica en su propia página³, Paraview es «una aplicación de visualización y análisis de datos multiplataforma de código abierto. Los usuarios de Paraview pueden crear rápidamente visualizaciones para analizar sus datos utilizando técnicas cualitativas y cuantitativas. La exploración de datos se puede realizar de forma interactiva en 3D o mediante programación utilizando las capacidades de procesamiento por lotes de Paraview». Los archivos *_gpu_X.vtk que hemos generado en nuestras simulaciones son los que emplearemos para trabajar con esta aplicación.

Se ha empleado una función de Paraview, los llamados filtros (*Filters*) que nos han permitido obtener las imágenes de manchas de inundación, así como los mapas de velocidades. Lo primero que debe de hacerse es abrir el archivo que deseamos analizar. Para ello, se pulsa en *File* en el extremo superior izquierdo de la pantalla, y en la pestaña desplegable, en *Open*.

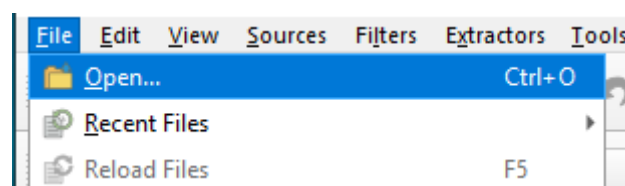


Figura A.2.1. Opción de Paraview para abrir el archivo a analizar.

Se nos abrirá una ventana con un navegador para hallar el archivo que queremos abrir. Tras localizar su ubicación, se pulsa sobre OK y se abrirá el archivo en la sección *Pipeline Browser*, en el extremo izquierdo de la pantalla.

³ <https://www.paraview.org/>

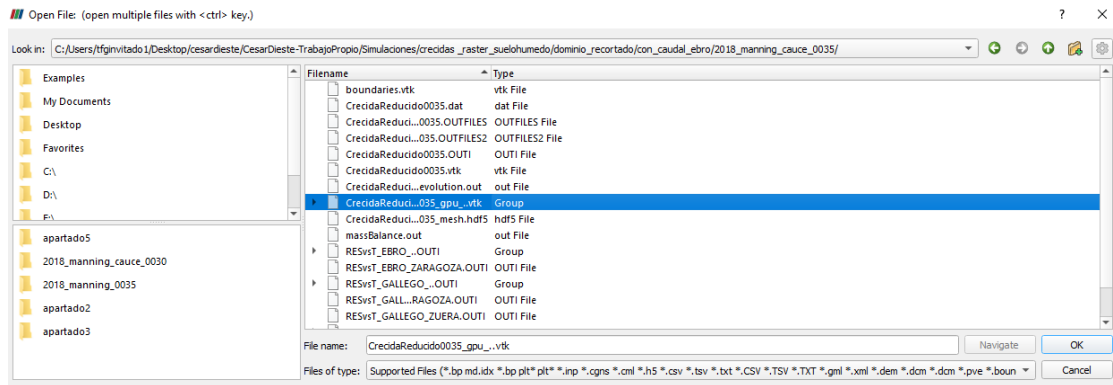


Figura A.2.2. Opción de Paraview para buscar el archivo deseada.

Dentro de *Pipeline Browser*, se seleccionará nuestro proyecto con un *click* y se pulsará sobre la pastilla *Apply*. Así, ya estamos listos para trabajar y aplicar los filtros correspondientes para obtener la información deseada.

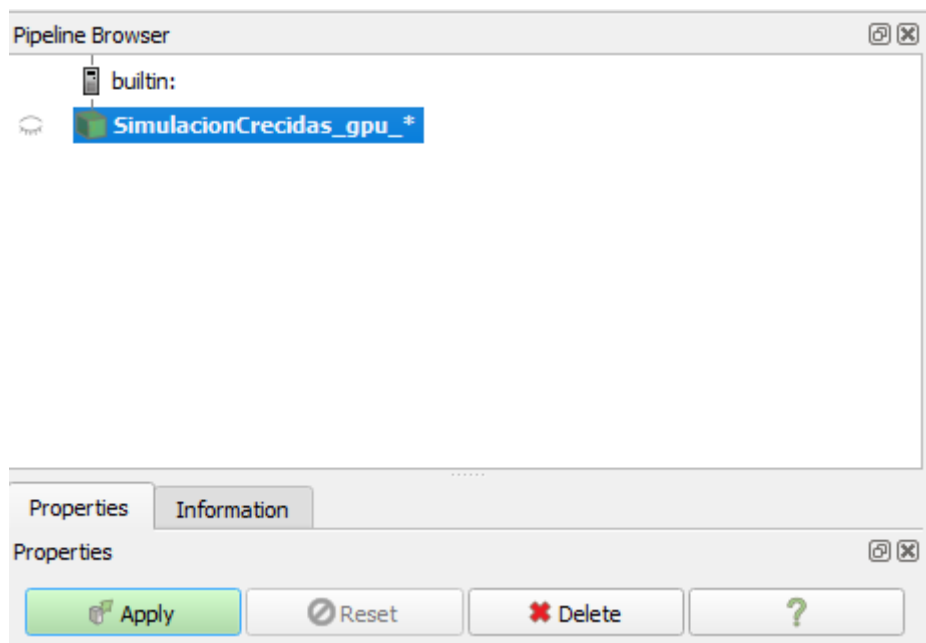


Figura A.2.3. Sección en Paraview *Pipeline Browser*.

A.2.1. Filtro *Threshold*. Obtención de imágenes de manchas de inundación

El filtro *Threshold* (Umbral, en español) permite representar en pantalla los valores de una magnitud concreta acotados entre una serie de valores. Con nuestro proyecto ya seleccionado, pulsamos en *Filters*. Se nos abrirá una pestaña; en nuestro caso, al haberlo empleado con anterioridad, aparecerá en la sección de *Recent*; no obstante, si no fuera el caso, los filtros que se van a emplear pueden localizarse en la sección *Common*.

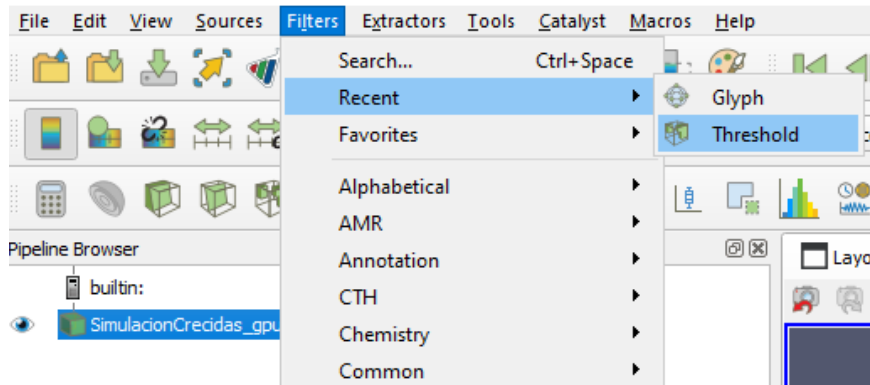


Figura A.2.1.1. Opción de Paraview para selección de filtros.

Si se pulsa sobre *Threshold* se verá que nuestro *Pipeline Browser* se ha actualizado, ya que se ha añadido nuestro filtro al proyecto. Lo seleccionamos y pulsamos en la pastilla *Apply*.

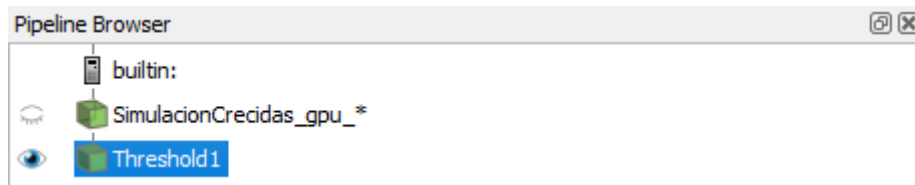


Figura A.2.1.2. Sección en Paraview del filtro a mostrar.

Puede observarse la presencia de un ojo a la izquierda del filtro, el ojo indica qué capas están activas para visualizarse en todo momento. Pueden tenerse varias capas activadas y jugar con las posibilidades que ello nos ofrece.

Más abajo se puede encontrar la sección de *Properties*. Aquí se puede seleccionar el escalar representado, y lo más importante, los valores en los que queremos que se mueva. Se establece el mínimo en 0.01 (no nos interesan las zonas en las que no hay lámina de agua) y el máximo por lo general 7, dado que no hay grandes zonas del dominio de nuestra simulación en las que se alcancen alturas tan elevadas. Tras hacerlo, se pulsa en *Apply* para actualizar y guardar nuestros cambios.

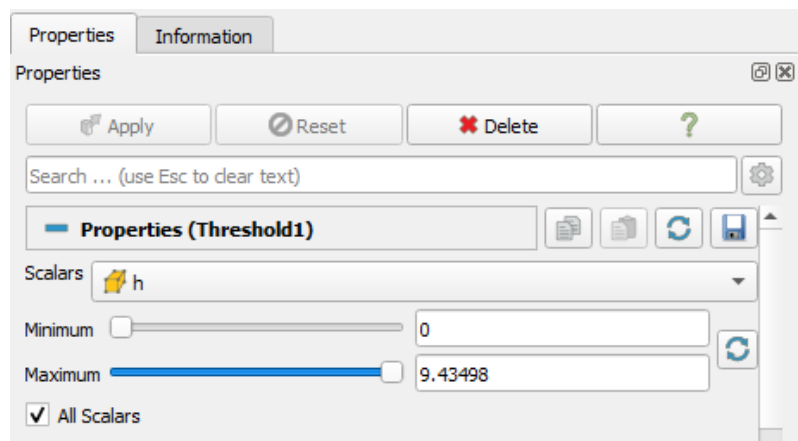


Figura A.2.1.3. Ventana *Properties* del filtro seleccionado.

En el extremo superior central de la pantalla se encontrará la sección *Time* con una pestaña desplegable. Se tendrá para seleccionar tantos instantes de tiempo como *.vtk se hayan generado en nuestra simulación. Si interesa, por ejemplo, analizar la confluencia del río Ebro con el río Gállego cuando los caudales y niveles son máximos, en función de la simulación se tendrá el pico de caudal en un instante de tiempo. Se debe acudir a los datos que se habrán extraído previamente de la misma para tenerlo localizado y saber cuál es el archivo *.vtk adecuado que se debe de mostrar en pantalla. Una vez seleccionado, nuestra pantalla se actualizará, mostrando el instante de tiempo seleccionado.

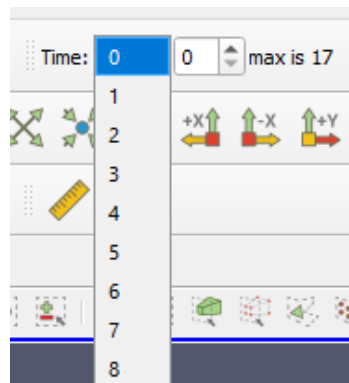


Figura A.2.1.4. Pestaña *Time* para seleccionar el instante de tiempo mostrado en pantalla.

En el extremo derecho de la pantalla se puede encontrar la sección de *Color Map Editor*. En ella se puede cambiar el color de nuestra leyenda al que se desee (por defecto se usa la escala de colores del arcoíris). Lo más interesante es colocar la opción *Update on 'Apply'* dentro de la subsección *Automatic Rescale Range Mode*. Así, la información que muestra la leyenda se actualizará automáticamente cada vez que se varíen los valores mínimo y máximo que se fijen en nuestro filtro *Threshold*.

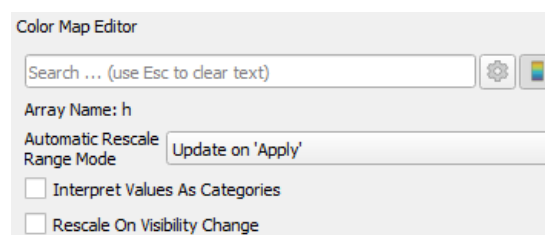


Figura A.2.1.5. Ventana *Color Map Editor* de edición de la leyenda.

Por último, queda la ventana de *Layout*, en el centro de nuestra pantalla, que muestra toda la información útil de los datos de nuestro dominio. Para extraer información del área de estudio que interesa analizar, primero se pulsará en *Change Interaction Mode*, para cambiar del modo 3D que está puesto por defecto al 2D. Posteriormente, se pulsará en la opción de *Zoom to Box* y con el ratón se trazará el cuadrado de nuestro dominio que se quiera mostrar en pantalla. Por último, la opción de *Capture Screenshot* (ver Figura A.2.1.6) será la empleada para obtener las imágenes que se mostrarán como resultado de nuestro estudio.

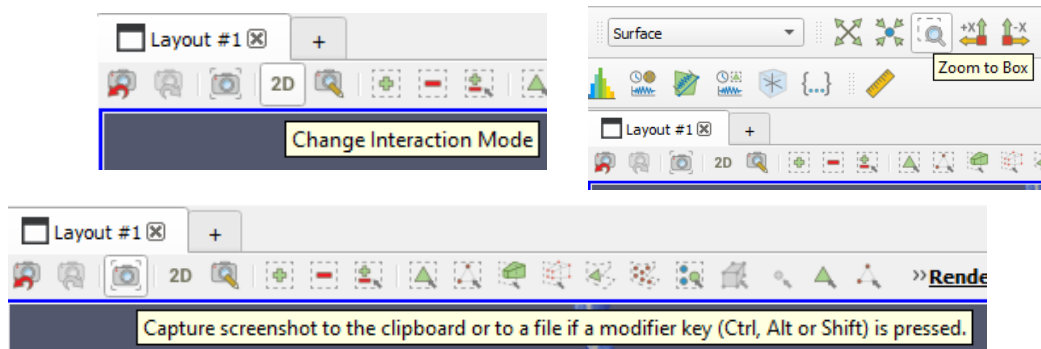


Figura A.2.1.6. Diversas opciones de Paraview de gestión de la información mostrada en pantalla.

Si se han seguido bien las indicaciones, el resultado mostrado debería ser el mostrado en la Figura A.2.1.7. Observar que la leyenda con valores puede arrastrarse manualmente con ratón para colocarla en el lugar de la imagen que más convenga.

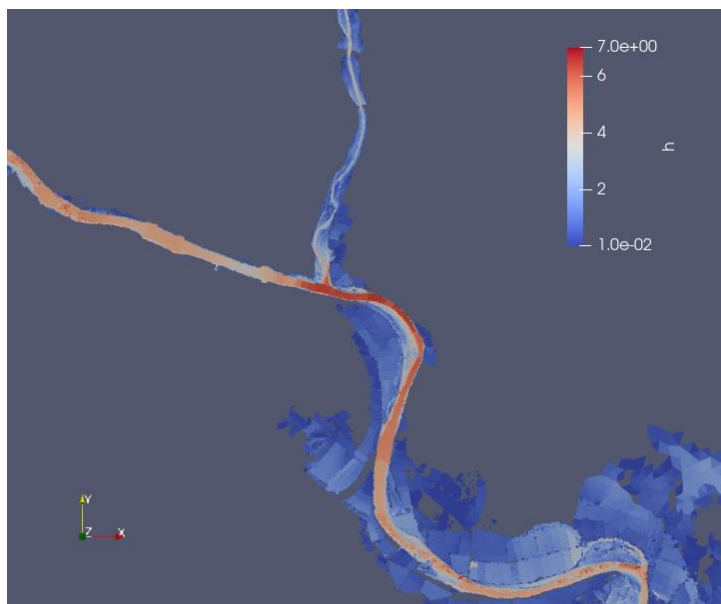


Figura A.2.1.7. Imagen de mancha de inundación obtenida en la confluencia del río Ebro con el río Gállego cuando se alcanza el caudal pico.

A.2.2. Filtro *Glyph*. Obtención de imágenes de mapas de velocidades

El procedimiento para insertar y extraer la información del filtro *Glyph* (Glifo, en español) es exactamente el mismo que el de tipo *Threshold*. Únicamente se detallarán las consideraciones particulares del mismo.

Si se observa la sección de *Properties* veremos que nuestro filtro *Glyph* se ha cargado con unos parámetros genéricos que, sin embargo, no son los adecuados para mostrar la información que buscamos. Se deben de dejar tal y como se muestra en la figura A.2.2.1 para obtener la información que se desea y trazar el mapa de velocidades. Una vez dejado así, se pulsa en *Apply*.

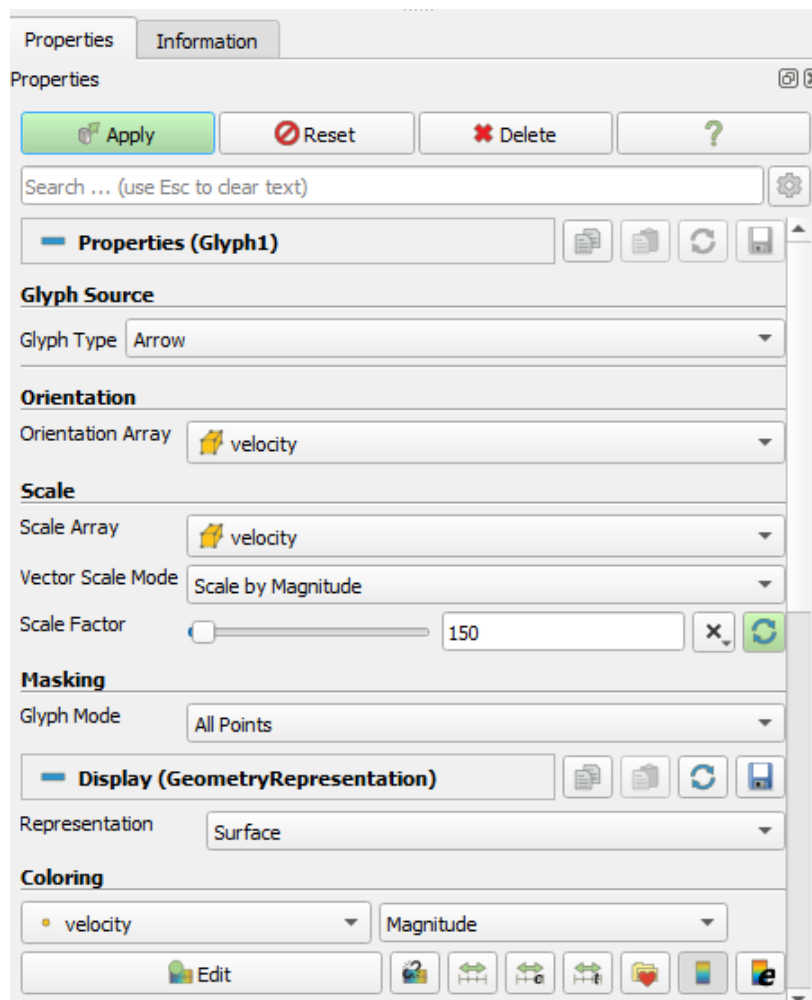


Figura A.2.2.1. Ventana *Properties* con los parámetros que deben introducirse.

Hecho esto, debería mostrarse en pantalla una imagen similar a la obtenida en la Figura A.2.2.2. En el caso del mapa de velocidades, se pone un fondo sólido sobre el dominio mostrado para poder apreciar los resultados con mayor claridad.

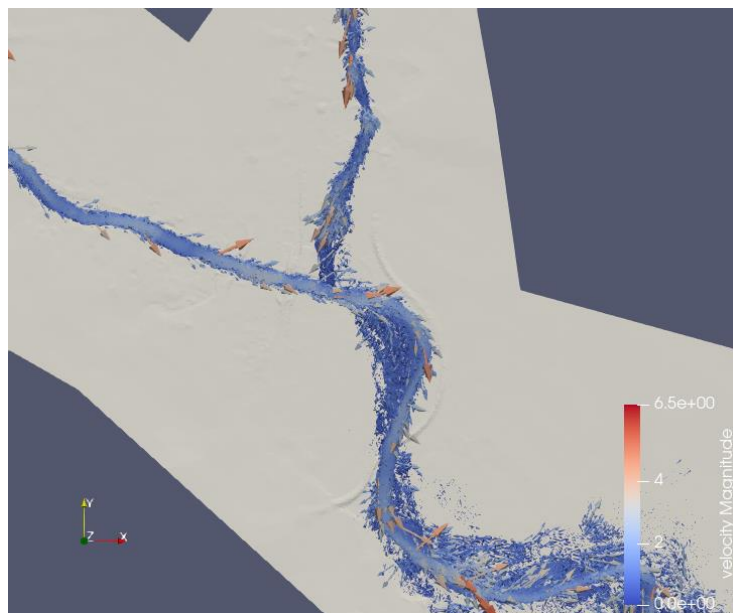


Figura A.2.2.2. Imagen de mapa de velocidades obtenida en la confluencia del río Ebro con el río Gállego cuando se alcanza el caudal pico.

B. Ecuaciones del modelo de aguas poco profundas

El modelo de aguas poco profundas basa su hipótesis en que la relación d/L sea pequeña; siendo d nuestra escala vertical del río y L nuestra escala horizontal. El criterio unificado que se sigue es que cuando la relación $d/L \ll 1$, entonces se puede hablar con propiedad de aguas poco profundas. Es esta la condición de la geometría con la que se trabajará dentro de nuestra área de estudio en los ríos Ebro y Gállego.

A partir de las ecuaciones de Navier-Stokes [9] pueden deducirse las ecuaciones de este modelo, que permitirán modelizar el comportamiento del fluido deseado operando en el marco de ciertas hipótesis simplificadas. Una de estas hipótesis es que la velocidad vertical V va a ser despreciable frente a la longitudinal U , es decir, $V \ll U$. Se centra ahora nuestro análisis en los términos de la velocidad vertical de la ecuación de la cantidad de movimiento.

$$\frac{\partial \rho w}{\partial t} + \frac{\partial \rho u w}{\partial x} + \frac{\partial \rho v w}{\partial y} + \frac{\partial \rho w^2}{\partial z} = -\rho g - \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \quad (\text{B.1})$$

En el lado izquierdo se tiene la derivada total, un término que representa el cambio de la velocidad con respecto al tiempo e incluye un término de convectivo. En el lado derecho se tiene un término que representa las fuerzas que interactúan (como la gravitatoria) con el fluido, el gradiente de presión y el término de fuerzas viscosas. Los términos con órdenes de magnitud inferiores se pueden simplificar: estos son los correspondientes al término temporal y al de fuerzas convectivas y viscosas. La simplificación de la ecuación B.1 queda como sigue:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = -\rho g \quad (\text{B.2})$$

Quedando pues una distribución hidrostática de presiones, propiedad central y aproximación que se emplea en la hipótesis de aguas poco profundas.

No obstante, no puede uno detenerse aquí. Debe de procederse a la caracterización del flujo, eligiendo una ley física que represente al mismo, buscando un modelo que concuerde con dicha ley y obteniendo de él las ecuaciones que lo describan.

Para llevar a cabo dicha caracterización se procede a trabajar con la ecuación de conservación de la masa y la ecuación de conservación de movimiento en x y en y ; quedando un sistema con tres ecuaciones:

$$\nabla v = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{B.3})$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial \rho uw}{\partial z} = fv - g \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \quad (\text{B.4})$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial \rho vw}{\partial z} = fu - g \frac{\partial h}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \quad (\text{B.5})$$

En la ecuación B.3 aparecen las velocidades de las 3 dimensiones a calcular. La componente x y la componente y de la velocidad pueden determinarse mediante las ecuaciones B.4 y B.5, respectivamente. La componente z se desprecia, pudiendo entonces promediar en el plano vertical. h se despeja al aplicar las condiciones de contorno de la superficie libre a la ecuación B.3.

Se ha realizado el análisis para 3D, pero en el estudio trabajaremos con 2D. Las conclusiones que se pueden extraer de nuestro estudio añadiendo una dimensión más no cambian, sin embargo, añaden una complejidad innecesaria, con su correspondiente costo computacional. Se procede ahora a deducir las ecuaciones válidas para nuestro modelo de aguas poco profundas en 2D [10].

El paso de 3D a 2D se consigue convirtiendo la profundidad h en una variable dependiente. Nuestro problema pasa ahora a ser uno de carácter bidimensional en el que se tendrá ahora un grosor variable h con condiciones de contorno en el perímetro del mismo.

En este nuevo plano bidimensional, cada punto tiene una velocidad promedio \bar{u} y \bar{v} , que en verdad se obtiene de la distribución de velocidad a lo largo de la coordenada z . Basándonos en la figura B.1 nos centraremos en el intervalo que va desde el fondo con cota z_b y el nivel de la superficie libre con cota H .

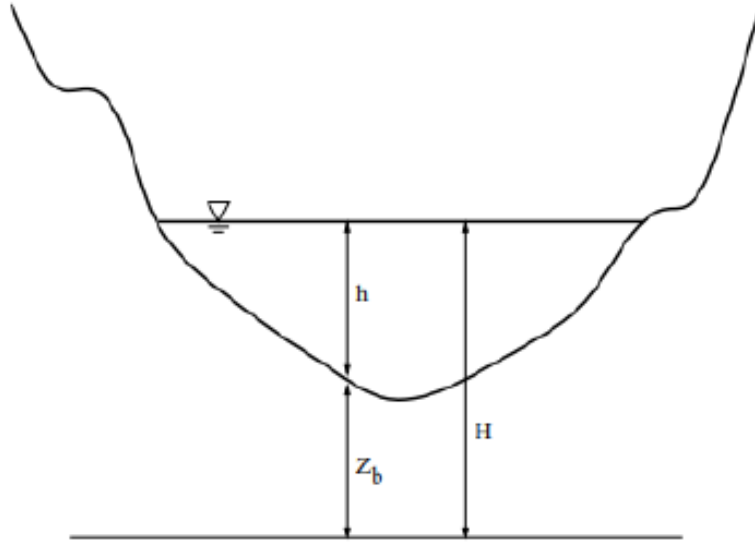


Figura B.1. Perfil del cauce.

Así pues, las velocidades \bar{u} y \bar{v} se expresan como:

$$\bar{u} = \frac{1}{h} \int_{z_b}^H u dz \quad (\text{B.6})$$

$$\bar{v} = \frac{1}{h} \int_{z_b}^H v dz \quad (\text{B.7})$$

En este punto se vuelve a recurrir a la ecuación de conservación de la masa y la ecuación de conservación de movimiento en x y en y ; quedando de nuevo un sistema con tres ecuaciones:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} = 0 \quad (\text{B.8})$$

$$\frac{\partial hu}{\partial t} + \frac{\partial hu^2}{\partial x} + \frac{\partial huv}{\partial y} + gh \frac{\partial h}{\partial x} = gh(S_{0x} - S_{fx}) \quad (\text{B.9})$$

$$\frac{\partial hv}{\partial t} + \frac{\partial huv}{\partial x} + \frac{\partial hv^2}{\partial y} + gh \frac{\partial h}{\partial y} = gh(S_{0y} - S_{fy}) \quad (\text{B.10})$$

En el lado izquierdo, aparecen las variaciones de caudal y los términos convectivos, que muestran el flujo de las variables de calado y caudales en las distintas direcciones. En el lado derecho, los términos fuente, expresados como la pendiente en la dirección x e y .

$$S_{0x} = \frac{\partial z_b}{\partial x} \quad (\text{B.11})$$

$$S_{0y} = \frac{\partial z_b}{\partial y} \quad (\text{B.12})$$

Se detallan a continuación los términos de fricción del agua con el fondo del cauce, que se escriben como la pendiente de la línea de energía en cada dirección.

$$S_{fx} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{gh^7/3} \quad (\text{B.13})$$

$$S_{fy} = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{gh^7/3} \quad (\text{B.14})$$

El término n que aparece es el llamado coeficiente de rugosidad de Manning, determinado por el número de Reynolds del flujo, la rugosidad del contorno y la forma geométrica de la cuenca. Este coeficiente n se determina a partir de medidas experimentales o a partir de unos valores que aparecen en tablas [11,12].

El sistema de ecuaciones obtenido en A.8, A.9 y A.10 puede reescribirse en su forma conservativa, quedando así más parecido a una ley de conservación de la masa y la cantidad de movimiento.

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla(\mathbf{F}, \mathbf{G}) = \mathbf{S}(\mathbf{U}) \quad (\text{B.15})$$

siendo;

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} h \\ hu \\ hv \end{pmatrix}, \mathbf{F} = \begin{pmatrix} hu \\ hu^2 + g \frac{h^2}{2} \\ huv \end{pmatrix}, \mathbf{G} = \begin{pmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 + g \frac{h^2}{2} \end{pmatrix}, \mathbf{S} = \begin{pmatrix} 0 \\ gh(S_{0x} - S_{fx}) \\ gh(S_{0y} - S_{fy}) \end{pmatrix} \quad (\text{B.16})$$

donde \mathbf{U} representa el vector de variables conservadas, \mathbf{F} y \mathbf{G} son los flujos de las variables conservadas a través de los lados de un volumen de control que contienen el flujo convectivo y las variables de presión hidrostática. El término \mathbf{S} se refiere a las fuentes y sumideros de la cantidad de movimiento a lo largo de las direcciones que provienen de las pérdidas de fricción y de las variaciones del fondo del cauce.

C. Método de cálculo del programa RiverFlow2D

RiverFlow2D es el *software* que se ha empleado en el presente trabajo como programa de cálculo del sistema de ecuaciones planteado en su forma conservativa visto en la ecuación B.15.

RiverFlow2D se basa en la utilización de un método numérico explícito de primer orden para formular y solucionar nuestro sistema de ecuaciones matemáticas. El dominio se divide en celdas triangulares que se acoplan mejor a la geometría, en las cuales se emplea un paso temporal (Δt) que hace que la solución vaya desde el instante inicial hasta el instante final, y en cada celda se obtendrá el valor de las variables conservadas en cada paso de tiempo.

El método de los volúmenes finitos [12] es el que se va a emplear para obtener las variables h , hu y hv (término \mathbf{U} de la ecuación B.16) en el centro de la celda. Para ello se integra la ecuación A.15 sobre un volumen fijo Ω .

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} U \, d\Omega + \int_{\Omega} (\nabla \cdot \mathbf{E}) \, d\Omega = \int_{\Omega} S \, d\Omega \quad (\text{C.1})$$

La aplicación del Teorema de Gauss a la integral de flujo nos permite reescribirla (ecuación C.2).

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} U \, d\Omega + \oint_{\partial\Omega} (\mathbf{E} \cdot \mathbf{n}) \, ds = \int_{\Omega} S \, d\Omega \quad (\text{C.2})$$

$\partial\Omega$ es la superficie que rodea al volumen Ω y \mathbf{n} es la normal unitaria hacia el exterior. Discretizando la ecuación C.2 se llega a la ecuación C.3.

$$A_i \frac{U_i^{n+1} - U_i^n}{\Delta t} + \sum_{k=1}^{NE} (\mathbf{E} \cdot \mathbf{n} - \bar{S})_k^* l_k = 0 \quad (\text{C.3})$$

Siendo A_i el área de la celda i , NE el número de celdas vecinas de la celda i , l_k es la longitud de la pared k y n es el estado temporal actual. Si se emplean matrices Jacobianas como la mostrada en la ecuación C.4

$$J = \frac{\partial(\mathbf{E} \cdot \mathbf{n})}{\partial U} \quad (\text{C.4})$$

se puede resolver la ecuación B.3, obteniéndose como resultado la expresión C.5.

$$U_i^{n+1} = U_i^n - \frac{\Delta t}{A_i} \sum_{k=1}^{NE} \sum_{m=1}^3 [(\tilde{\lambda} \tilde{\gamma} \tilde{e})_k^m l_k]^n \quad (\text{C.5})$$

$\tilde{\gamma}$ es la contribución del flujo y del término fuente, $\tilde{\lambda}$ es el valor propio de la matriz Jacobiana y $\tilde{\epsilon}$ es el vector propio de la susodicha matriz. Debido al carácter explícito del método empleado es necesaria una condición de estabilidad para el paso de tiempo Δt . Esto se restringe con la condición de CFL, con lo que el paso de tiempo pasa a escribirse como se detalla en la ecuación C.6

$$\Delta t = CFL \min_{k,m} \frac{\delta x_k}{\tilde{\lambda}_k^m} \quad (C.6)$$

siendo

$$\delta x_k = \min(x_i, x_j) \quad (C.7)$$

y tomando como x_i

$$x_i = \frac{A_i}{\max_{k=1,NE} l_k} \quad (C.8)$$

CFL es el número de Courant-Friedrichs-Lewy y está relacionado con la estabilidad del método numérico [14]. Su valor está comprendido entre 0 y 1.

De la ecuación B.6 puede deducirse que la elección del tamaño de celda es muy importante: áreas grandes de celda tendrán como resultado pasos de tiempo igualmente grandes, lo que agilizarán el cálculo, a costa de perder precisión en las variables de estudio que nos interesan, ya que al ser celdas de gran tamaño, el valor calculado será constante en toda la celda y por tanto en el área de estudio. Se extrae la conclusión de que se debe encontrar un balance entre rapidez de los cálculos y precisión de los resultados.