



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Máster

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA AVENIDA DEL EBRO DE 2015 Y ANÁLISIS DE ROZAMIENTO DE LAS SUPERFICIES MEDIANTE DATOS LIDAR-PNOA Y CORINE LAND COVER

NUMERICAL SIMULATION OF THE EBRO FLOOD IN 2015 AND ESTIMATION OF SURFACE ROUGHNESS USING LIDAR-PNOA DATA AND CORINE LAND COVER

Autor/es

Alejandro Villarmín Martín

Director/es

Antonio Luis Montealegre Gracia

Facultad de Filosofía y Letras
2018/2019

Resumen

El río Ebro en su curso medio, especialmente aguas abajo de la confluencia del Aragón-Arga, presenta crecidas frecuentes, siendo una de las más destacables la ocurrida en invierno de 2015, debido a la extensión de la superficie inundada, a los daños producidos y a la repercusión social.

El presente trabajo tiene como objetivo simular este evento de avenida haciendo uso de un modelo digital de elevaciones de precisión y de unas superficies de rozamiento obtenidas mediante datos LiDAR (Light Detection and Ranging) del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA). Asimismo, se pretende comparar los resultados de la simulación con las superficies de rozamiento derivadas de Corine Land Cover (CLC). La validación de la extensión de la lámina de agua se ha realizado mediante una imagen satelital de Landsat 7, y el calado se ha comprobado con los datos de las estaciones de aforo.

Los resultados obtenidos muestran que la identificación de las superficies mediante el uso de datos LiDAR es más precisa que la propuesta por CLC. Sin embargo, al trabajar con una resolución espacial de 30 m para la simulación de la inundación, la lámina de agua obtenida considerando las superficies de CLC se ajusta mejor a la imagen satelital. Por otra parte, la validación espacial de los resultados demuestra su utilidad frente a la tradicional comparación entre los calados observados y los predichos por la simulación.

Palabras Clave: *Inundación, Iber, Teledetección, Landsat 7, LiDAR, Manning.*

Abstract

In the middle course of the river Ebro, especially downstream of the Aragon-Arga confluence, frequent floods with remarkable swamped surfaces take place. One of the most noteworthy floods happened in winter 2015, due to the extension of the flooded surface, the damage caused and the social impact. The aim of this study is to simulate this event using a digital elevation model and friction surfaces based on LiDAR data (Light Detection and Ranging) from the National Plan of Aerial Orthophotography (PNOA). In addition, it is intended to compare simulation results with friction surfaces derived from Corine Land Cover (CLC). The validation of the sheet of water was carried out by means of a Landsat 7 satellite image, and the river draft was checked with the data of the gauging stations.

The results obtained show that the identification of surfaces through the use of LiDAR data is more accurate than that proposed by CLC. However, when working with a spatial resolution of 30 m for flood simulation, the sheet of water obtained considering the CLC surfaces is better suited to the satellite image. The spatial validation of the results demonstrates its usefulness compared to the traditional contrast between the river draft observed and predicted by the simulation.

Key Words: *River flood, Iber, Remote Sensing, Landsat 7, LiDAR, Manning.*

Índice

1. INTRODUCCIÓN	1
2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	2
3. ÁREA DE ESTUDIO.....	2
4. MATERIALES Y MÉTODOS	5
4.1. Componentes de la simulación.....	6
4.1.1. Información topográfica	6
4.1.2. Datos de caudal	6
4.1.3. Datos de precipitación.....	7
4.1.4. Superficies de rozamiento	8
4.2. Proceso de simulación.....	11
4.2.1. Configuración del modelo geométrico y malla.....	11
4.2.2. Configuración del tiempo de cálculo de la simulación.....	12
4.3. Validación de la simulación	13
5. RESULTADOS	14
5.1. Superficie de rozamiento.....	14
5.2. Validación de las simulaciones	18
5.3. Comparación de las simulaciones de alta resolución.....	22
6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	23

Índice de figuras

Figura 1. Área de estudio.	3
Figura 2. A) Precipitaciones acumuladas en la Cuenca del Ebro los días 31, 01, y 02 de enero y febrero. B) Precipitaciones acumuladas en la Cuenca del Ebro los días 23, 24, 25 y 26 de febrero.	4
Figura 3. Esquema metodológico	5
Figura 4. Caudal del Ebro en la estación de aforo Ebro-Tudela (9284)	7
Figura 5. Caudales de las estaciones de aforo Huecha (9292) y Queiles (9175).	7
Figura 6. Hietograma elaborado a partir de los datos de precipitación registrados en la estación meteorológica de la Base Aérea de las Bárdenas Reales.	8
Figura 7. Fragmento de la malla realizada a partir de Iber.	12
Figura 8. Imagen de Landsat 7 utilizada.	13
Figura 9. Tipos de superficies según la clasificación de RF.....	16
Figura 10. Tipos de superficies según la clasificación de RF procesada.....	17
Figura 11. Tipos de superficies según la clasificación de CLC.	18
Figura 12. Resultado de la simulación realizada a partir de CLC.....	19
Figura 13. Resultado de la simulación realizada a partir de RF.....	19
Figura 14. Zonas donde la simulación realizada a partir de los datos CLC coincide con los datos recogidos por el satélite Landsat 7.	21
Figura 15. Zonas donde la simulación realizada a partir de los datos RF coincide con los datos recogidos por el satélite Landsat 7.	21
Figura 16. Simulaciones con mallas de alta resolución. A) Simulación RF. B) Simulación CLC.	22

Índice de tablas

Tabla 1. Características generales del MDE 5×5 m del PNOA.	6
Tabla 2. Métricas derivadas de la distribución de las alturas de los retornos láser, donde x_i es el valor de la observación (altura del retorno), N es el número total de observaciones, r_i es el retorno, y pl_i es el pulso.....	9
Tabla 3. Clases de CLC según el tipo de categoría informacional seleccionada.	11
Tabla 4. Clases y coeficientes de Manning.	12
Tabla 5. Características de las bandas de Landsat 7.....	14
Tabla 6. Variables seleccionadas y valor del estadístico CHI-cuadrado.....	15
Tabla 7. Matriz de confusión de la ratio de error "test".	15
Tabla 8. Matriz de confusión OOB.	15
Tabla 9. Resultados de errores e índice Kappa.	16
Tabla 10. Comparación de los resultados de las dos simulaciones.....	20

1. INTRODUCCIÓN

Las avenidas son un fenómeno natural que puede afectar a las sociedades instaladas próximas a las riberas (Arizpe *et al.*, 2008). Como consecuencia de estos sucesos cada año hay cuantiosas pérdidas de bienes y, en ocasiones, pérdidas humanas. Pese a que cada vez se tienen más en cuenta los peligros que pueden acarrear este tipo de situaciones, siguen siendo los riesgos naturales más destructivos. Según los datos del estudio “*Impacto económico y social de los riesgos geológicos en España*”, elaborado por el Instituto Geológico y Minero de España (2013), las inundaciones en España ocasionan más de la mitad de las pérdidas económicas originadas por desastres naturales, tando sus costes en 1.600 millones de euros.

Uno de los eventos más significativos de los últimos años fue la crecida del río Ebro ocurrida en el año 2015. Esta avenida fue fruto de la convergencia de varias inundaciones muy próximas entre sí, variando su impacto en las diferentes zonas afectadas a lo largo de su transcurso. El origen de esta crecida tuvo lugar en las abundantes precipitaciones de los primeros meses del año y en la fusión nival, produciendo una avenida catalogada con un periodo de retorno de 10 años. Parte de la importancia de este fenómeno reside en el impacto mediático y social que generó, debido a que sectores como el agrícola (19.000 ha afectadas) o el ganadero, (10.000 cabezas de ganado perdidas) sufrieron múltiples daños (Ollero *et al.*, 2015).

Los esfuerzos del ser humano por prevenir y predecir este tipo de fenómenos naturales han aumentado considerablemente conforme la tecnología ha avanzado. El desarrollo de los satélites, los sistemas de información geográfica (SIG) y los modelos numéricos de inundaciones, suponen un punto de inflexión en el afán de la humanidad por alcanzar el “riesgo cero”.

Los modelos numéricos de inundaciones son una técnica joven en constante evolución, con apenas 20 años de vida. Durante los últimos años han evolucionado considerablemente, pasando de los modelos unidimensionales, como el implementado en el software HECRAS, diseñado por el *Hydrologic Engineering Center* del *United Army Corps of Engineering*, hasta los más modernos sistemas bidimensionales como Iber, desarrollado conjuntamente por el Grupo de Ingeniería Ambiental y del Agua (GEAMA) de la Universidad de A Coruña y el Instituto Flumen de la Universidad Politécnica de Cataluña. El paso de los modelos unidimensionales a los modelos bidimensionales se debe, en parte, al considerable aumento de la potencia computacional de los equipos informáticos, que hasta la década de los 90 del siglo XX impidió implementar este tipo de modelos. Con esta nueva generación de modelos numéricos es posible trabajar con áreas de gran o pequeña escala, permitiendo obtener predicciones suficientemente acertadas de distintos fenómenos hidráulicos. Prueba de ellos son los numerosos estudios que han abordado distintas problemáticas, utilizando un modelo numérico de inundaciones, como es el caso De Gonzalo *et al.* (2011), Bladé *et al.* (2014), Echeverribar (2016), Boruel (2017), Olcina *et al.* (2017), entre otros.

Debido a la juventud de estos modelos, las técnicas utilizadas para obtener la información de algunos componentes de la simulación presentan ciertas carencias. Concretamente, los apartados con mayor margen de mejora son la identificación de superficies, necesaria para asignar índices de rozamiento, y la validación de los modelos.

En lo que a identificación de superficies se refiere, autores como Breiman (2001), Congalton, *et al.* (2002), Bork y Su (2007), Arroyo *et al.* (2010), Johansen *et al.* (2010), Magdaleno y Martínez (2014), y Cánovas *et al.* (2016) han aplicado metodologías en las que a partir de datos LiDAR (*Light Detection And Ranging*), que ofrecen información tridimensional de las superficies, se consigue identificar distintos tipos de vegetación de ribera. Estos datos presentan una mayor calidad, precisión y resolución espacial, que la que presentan datos de superficies como las que ofrece Corine Land Cover (CLC), sobre todo en el caso de caracterizar zonas extensas, siendo más eficientes que un método de digitalización manual. Esta última opción, pese a su ineficiencia, es la más utilizada para obtener información sobre las superficies en los estudios de modelos de inundación, como en el caso de Echeverribar (2016) o Boruel (2017), prescindiendo de la posibilidad de obtener in-

formación sobre las clases del suelo (CLC) o de realizar una clasificación automatizada basada en información espectral y/o estructural.

Por otra parte, la validación de los modelos también es una cuestión a revisar. Normalmente se realiza una comparación de los caudales o las cotas en las estaciones de aforo comprendidas en el área de estudio. Sin embargo, esta validación puede presentar algún problema, ya que el flujo puede invadir zonas externas al *bankfull* o sobrepasar los límites de la estación, impidiendo que esta información quede recogida, propiciando errores. También existe la cuestión de la dificultad de conseguir datos batimétricos del cauce, los cuales al no ser considerados en las simulaciones también pueden influir en los resultados. Una forma de complementar dicha validación es la implementación de imágenes (ortofotografías, imágenes satelitales, etc.) que permiten validar espacialmente el modelo, es decir, la extensión de la lámina de agua. El problema con este tipo de validación reside en la dificultad de encontrar imágenes que capten el fenómeno con el que trabajar, ya que las condiciones atmosféricas (habitualmente con alta nubosidad), la dimensión del evento o la fecha del mismo pueden impedir que exista una imagen adecuada o de calidad para este propósito.

2. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

La **hipótesis** que se plantea en este trabajo es que una simulación numérica de inundación, basada en la obtención de unas superficies de rozamiento mediante datos LiDAR ofrece unos resultados más precisos que los obtenidos mediante superficies derivadas de la información Corine Land Cover. Esta hipótesis descansa en el hecho de que los datos LiDAR-PNOA, a pesar de su baja densidad de puntos, ofrecen información tridimensional de precisión centimétrica, lo que permite caracterizar mejor las áreas de ribera, así como las zonas de inundación donde conviven diversos usos del suelo.

El **objetivo principal** es simular la avenida del río Ebro ocurrida entre el 25 de febrero y el 14 de marzo de 2015 mediante el software Iber y determinar la extensión de la lámina de agua.

Para dar cumplimiento al objetivo principal es necesaria la consecución de una serie de objetivos específicos:

- 1) Generar una capa de información que identifique el rozamiento que ejercen los usos del suelo principales mediante el cálculo de métricas derivadas de los retornos láser del LiDAR.
- 2) Comparar los resultados de la simulación de la avenida del Ebro obtenidos con las superficies de rozamiento del LiDAR y las derivadas de CLC.
- 3) Validar la extensión de la lámina de agua mediante una imagen satelital de Landsat 7, y comparar con los datos recogidos en las estaciones de aforo.
- 4) Analizar el efecto de la resolución espacial en los resultados de la simulación.

3. ÁREA DE ESTUDIO

El interés de la zona de estudio seleccionada reside en los acontecimientos sucedidos en los primeros meses del año 2015. Tal y como queda recogido en el “*Informe sobre las avenidas del primer trimestre de 2015 en la cuenca del Ebro*”, elaborado por la Confederación Hidrográfica del Ebro (CHE), dentro de la avenida de 2015 hubo tres episodios de crecida separados temporalmente. La primera de ellas tuvo lugar desde el 31 de enero al 13 de febrero, la segunda del 25 de febrero al 14 de marzo y, por último, la tercera ocurrió del 20 de marzo al 28 de marzo. El episodio con el que se ha trabajado ha sido el transcurrido entre el 25 de febrero y el 14 de marzo.

La zona de estudio seleccionada supone un área de 93 km², la cual está formada por la llanura de inundación del tramo del río Ebro, comprendido entre los municipios de Tudela y Novillas. Dentro del área de estudio existen dos afluentes del Ebro, el Queiles (próximo a Tudela) y el Huecha (próximo a las inmediaciones de Novillas), ambos de la margen derecha. Entre los municipios de Tudela y Novillas existen cuatro estaciones de aforo que proporcionan datos de caudal y calado, a

excepción de la estación de Novillas que solo dispone de datos de calado para las fechas de la crecida. De todas las zonas afectadas por la crecida se decidió estudiar este tramo del río Ebro debido a que es el único que cuenta con imágenes satelitales de buena calidad durante el momento de la crecida.

La zona se caracteriza por presentar un relieve donde predominan las terrazas fluviales cuaternarias en la zona de ribera, y los escarpes y las lomas en los extremos. Es en las extensas terrazas donde se encuentran las poblaciones comprendidas en el área de estudio (Tudela, Fontellas, Cabanillas, Fustiñana, Ribaforada, Buñuel y Novillas), además de los cultivos hortícolas, típicos en la zona, y los bosques de ribera, diseminados por todo el cauce del Ebro. Estas características de la zona de estudio favorecen que, tanto las poblaciones como las tierras de labor, sean muy vulnerables ante procesos de crecida. En este sentido, la CHE ha construido a lo largo de los años un conjunto de defensas o motas en los márgenes del río Ebro. En la Figura 1 quedan recogidas todas las motas situadas a lo largo del cauce comprendido en el área de estudio.

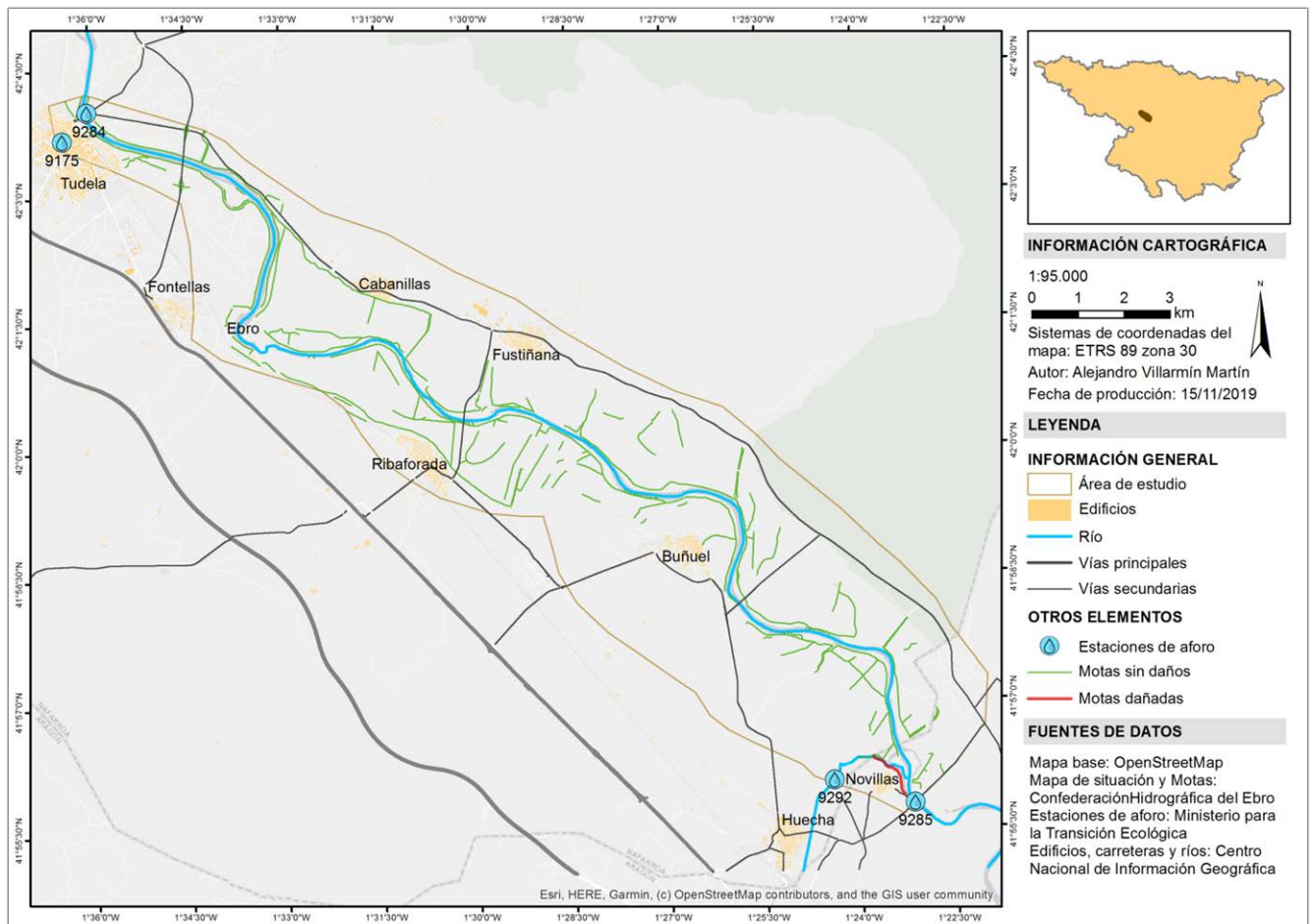


Figura 1. Área de estudio.

Al trabajar con la segunda fase de la crecida se tuvo en cuenta el estado de las defensas tras la primera crecida, así como los sucesos meteorológicos previos y durante el evento, tanto en la zona de estudio como en gran parte de la cuenca.

En lo que a defensas se refiere, estas sufrieron modificaciones a lo largo de la primera crecida. Concretamente, en las inmediaciones de Novillas, las motas de las márgenes derechas de los ríos Ebro y Huecha quedaron dañadas (ver Figura 1). No obstante, entre la primera y la segunda crecida fueron reparadas.

Respecto a las condiciones meteorológicas, los tres primeros meses del 2015 fueron especialmente lluviosos lo que, sumado a las reservas de agua almacenada en forma de nieve, contribuyeron a la sucesión de estos fenómenos de crecida y a que sus efectos fuesen más devastadores. Cabe resaltar que las acumulaciones de precipitaciones en toda la cuenca no fueron tan importantes como

las de la primera crecida, tal y como se puede apreciar en la Figura 2A y 2B. Sin embargo, el volumen de agua almacenada en esta segunda crecida fue considerable, a lo que hay que sumar la elevada humedad de los suelos en el momento del suceso, como resultado de las constates lluvias y la crecida previa.

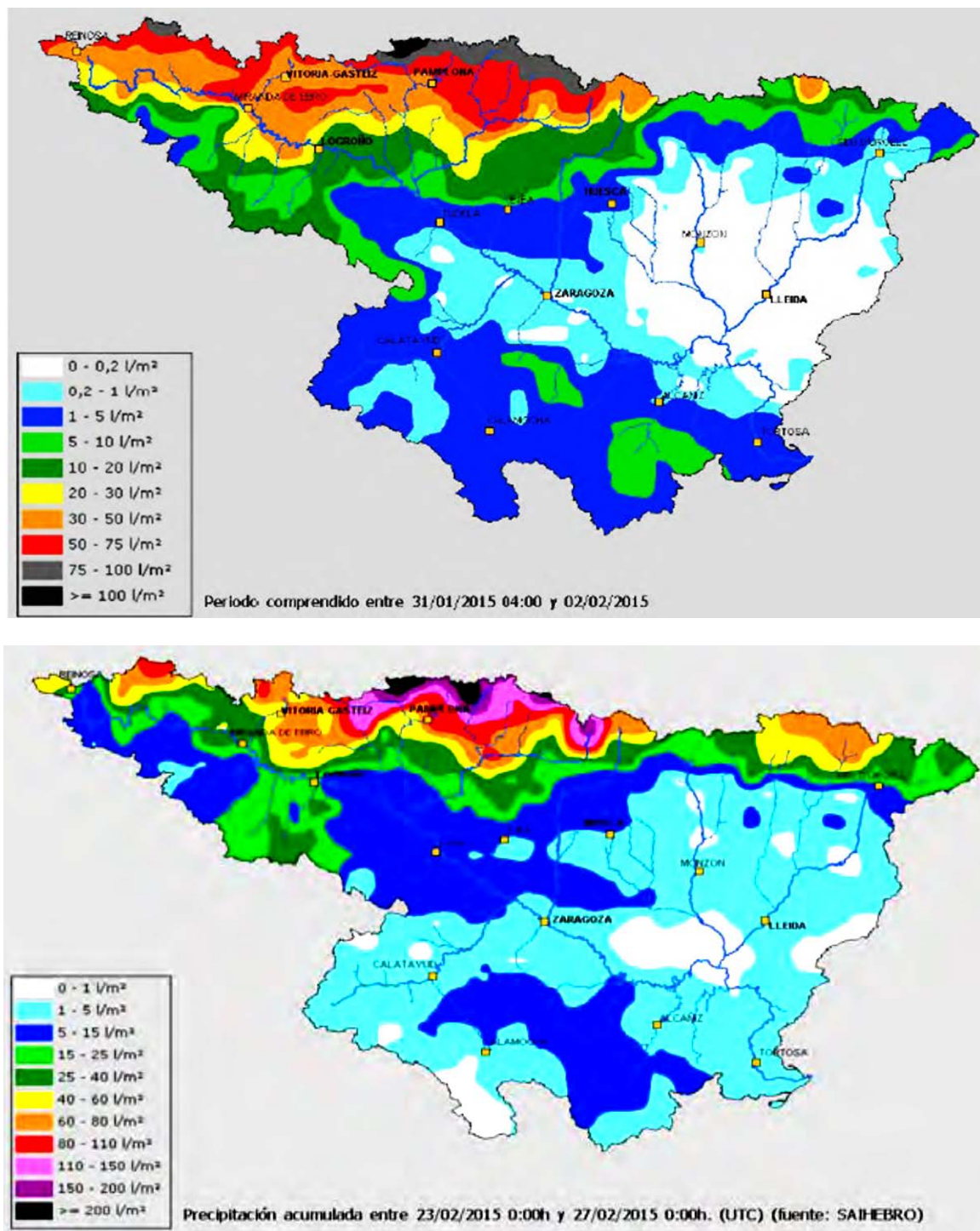


Figura 2. A) Precipitaciones acumuladas en la Cuenca del Ebro los días 31, 01, y 02 de enero y febrero. B) Precipitaciones acumuladas en la Cuenca del Ebro los días 23, 24, 25 y 26 de febrero. Tomada del “Informe sobre las avenidas del primer trimestre de 2015 en la cuenca del Ebro” de la CHE (2015).

Durante la segunda crecida hubo abundantes precipitaciones, repartidas de forma irregular espacial y temporalmente. Durante los días 23 y 24 de febrero se produjeron persistentes chubascos con intensidad moderada al noroeste de la cuenca, con temperaturas bajas, lo que evitó la fusión de la nieve por encima de los 700 msnm. Por el contrario, en la zona de estudio las precipitaciones fueron muy débiles, con acumulaciones de entre 1 y 5 l/m². Durante los días 25 y 26 de febrero las

precipitaciones se vieron incrementadas en la zona norte de la cuenca, a excepción del área de estudio donde las precipitaciones descendieron por debajo de 1 l/m², siendo estas fechas las últimas donde se registran meteoros en esta zona. Cabe destacar que, debido al aumento de las temperaturas, la cota de nieve esos días se situó por encima de los 1.000 msnm en la mayor parte de la cuenca. Finalmente, el día 27 cesaron las precipitaciones en la mayor parte de la cuenca, experimentándose al mismo tiempo un nuevo descenso de las temperaturas, lo cual permitió que la isoterma de 0°C regresase de nuevo a menos de 1.000 msnm, tal como recoge el “Informe sobre las avenidas del primer trimestre de 2015 en la cuenca del Ebro” de la CHE (2015).

La situación descrita propició crecidas en la mayoría de los afluentes de la margen izquierda del Ebro y de una parte importante de los situados en la margen derecha. El aumento del caudal en estos afluentes provocó a su vez una crecida en el Ebro que se extendió desde su nacimiento hasta su desembocadura. Pese a que gran parte de las crecidas de los afluentes se consideraron ordinarias, la del Ebro ha sido catalogada como extraordinaria, presentando el tramo del área de estudio los caudales máximos registrados, los cuales superaron los 2.500 m³/s a lo largo de los días 27 y 28 de febrero.

En resumen, se podría afirmar que tres fueron los factores que magnificaron la crecida y contribuyeron a que fuese un evento extraordinario: i) la alta humedad de los suelos, como consecuencia de las constantes precipitaciones, que en última instancia provocó la saturación de los mismos; ii) las importantes acumulaciones de nieve ubicadas en la cuenca alta del Ebro, que sumado al aumento de las temperaturas produjo un incremento de los caudales; y iii) las constantes precipitaciones sobre la cuenca, que sumado a los dos factores anteriores desencadenaron la crecida y explican los elevados caudales observados en el área de estudio durante el transcurso del evento.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

En este apartado se describe la metodología seguida para la consecución del objetivo principal, así como de los objetivos secundarios señalados que se recogen en la Figura 3.

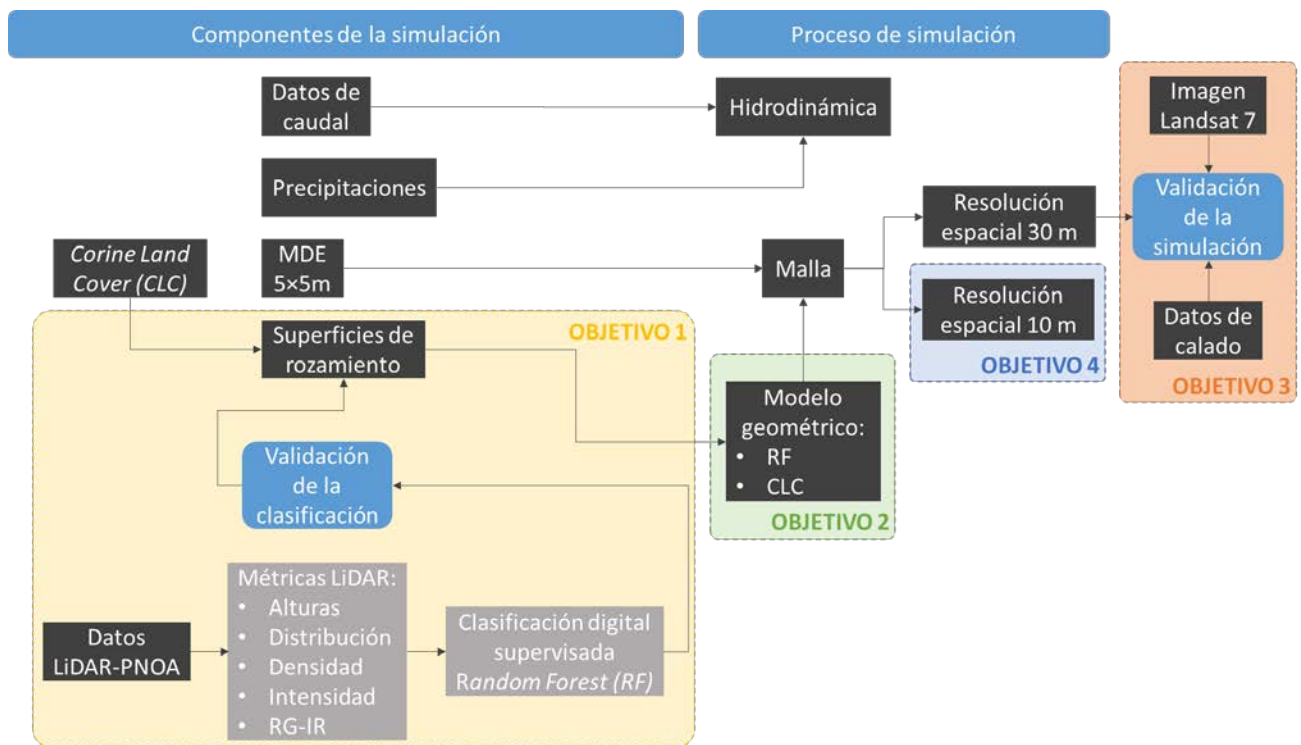


Figura 3. Esquema metodológico.

4.1. Componentes de la simulación

La primera de las fases fue la obtención de los datos y variables necesarias para llevar a cabo la simulación con el software Iber. La simulación necesita de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) para caracterizar las alturas y generar una malla de la superficie en la que transcurrirá el proceso. También requiere los datos de caudal o calado para simular la carga del río durante el periodo simulado, y finalmente precisa de una superficie de rozamiento según el tipo de uso de suelo existente en la zona de estudio. Opcionalmente también se pueden añadir datos de precipitación, en el caso de que hubiese habido precipitaciones durante el transcurso del episodio. La correcta elección de esta información es crucial, debido a que son la base de la simulación.

4.1.1. Información topográfica

Se ha empleado el MDE del PNOA descargado desde el Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG), el cual presenta una resolución espacial de 5 m. Como se puede observar en la Tabla 1, este MDE se ha generado a partir de los datos LiDAR-PNOA de baja densidad de puntos correspondientes al vuelo llevado a cabo en el año 2012. Su precisión altimétrica y planimétrica es superior a 50 cm.

Tabla 1. Características generales del MDE 5×5 m del PNOA. Fuente: PNOA (2019).

Paso de malla	Precisión planimétrica	Exactitud altimétrica	Precisión planimétrica de la nube de puntos	Precisión altimétrica de la nube de puntos	Densidad de la nube de puntos LiDAR (año 2012)
5 m	≤0,5 m	RMSE ≤ (0,25 – 0,5) m	≤ 0,3 m	RMSE ≤ (0,2 – 0,4) m	0,5 puntos/m ²

Aunque el MDE se podría haber generado a partir de los datos LiDAR-PNOA originales con objeto de aumentar la resolución espacial del modelo e incluir las motas existentes en la zona, así como eliminar barreras que interfiriesen en el correcto funcionamiento de la simulación (puentes u otro tipo de infraestructuras transversales), se verificó con la información proporcionada por la CHE sobre la posición de las motas, que éstas quedaban incluidas en el MDE de 5 m y tampoco existían infraestructuras que interrumpiesen el cauce, por lo que finalmente se procedió a trabajar con el MDE del PNOA.

Cabe resaltar que no se pudo hacer uso de los datos de batimetría del cauce al no estar disponibles al público, lo que puede considerarse un hándicap a la hora de llevar a cabo la simulación.

4.1.2. Datos de caudal

El flujo o volumen de caudal con el que se ha trabajado corresponde a las cuatro estaciones de aforo situadas en el tramo del río Ebro comprendido entre los municipios de Tudela y Novillas. Más concretamente, la estación del río Ebro a su paso por Tudela (9284), la estación de la desembocadura del río Queiles (9175), la estación de la desembocadura del río Huecha (9292) y la estación del río Ebro a su paso por Novillas (9285). Dichas estaciones recogen datos constantemente, tanto del caudal como del calado del río, a excepción de la estación 9285 ubicada en Novillas, que solo registra datos de calado. Todos estos datos relacionados con el flujo fueron facilitados por la CHE bajo petición expresa, debido a que los datos no están disponibles al público.

Debido al interés de este trabajo en validar el resultado de la simulación (extensión de la lámina de agua) con una imagen satelital, los flujos seleccionados son los comprendidos entre las 00:00 h del día 25 de abril y las 10:45 h del día 02 de marzo, momento en el que el satélite Landsat 7 tomó una imagen de la zona.

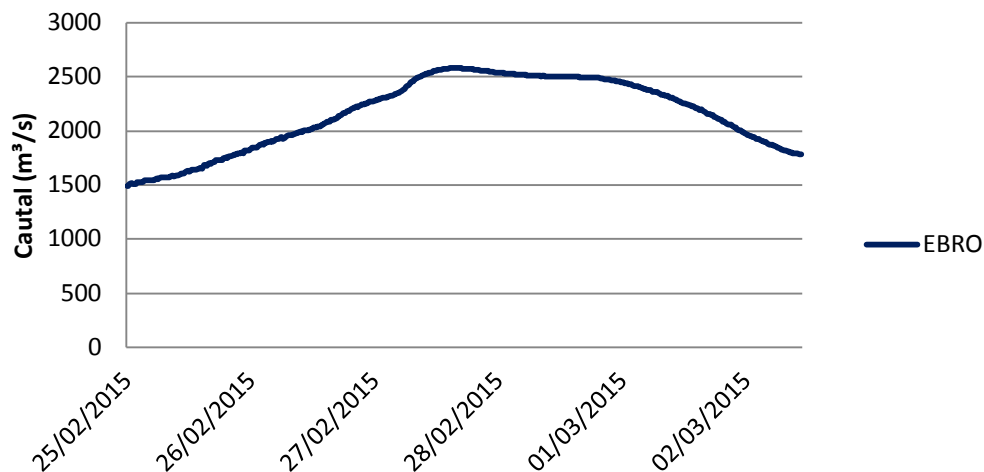


Figura 4. Caudal del Ebro en la estación de aforo Ebro-Tudela (9284). Fuente: Confederación Hidrográfica del Ebro.

Todos estos datos quedan recogidos en la Figura 4, donde es posible apreciar como el caudal que transportaba el Ebro durante estas fechas es considerablemente superior al de sus afluentes en la zona, llegando a superar los 2500 m³/s durante el día 27, mientras que sus afluentes no superaron los 10 m³/s de caudal en ningún momento del evento (Figura 5). Debido al bajo caudal de estos se decidió descartar su inclusión en la simulación, dejando únicamente el flujo del Ebro, tomado desde la estación de aforo de Tudela.

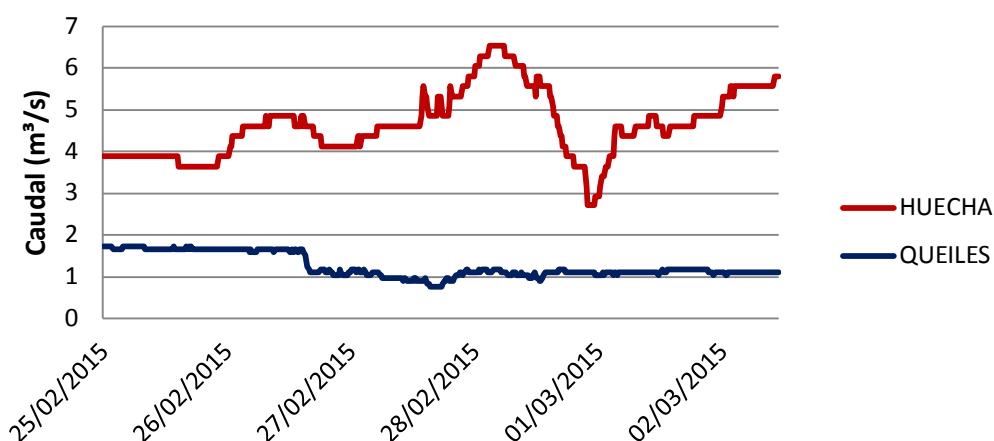


Figura 5. Caudales de las estaciones de aforo Huecha (9292) y Queiles (9175). Fuente: Confederación Hidrográfica del Ebro.

En el software Iber, el flujo se definió como crítico/subcrítico en la zona inicial y subcrítico en la zona de salida, de este modo las paredes del modelo geométrico susceptibles de contener agua durante la inundación se pudieron caracterizar como vertederos.

4.1.3. Datos de precipitación

Durante la crecida que tuvo lugar desde el 25 de febrero hasta el 10 de marzo, se produjeron precipitaciones sobre la zona de estudio. Es por ello que se han obtenido de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMet) los datos de precipitaciones de las estaciones próximas al área de estudio, concretamente de la Base Aérea de Bardenas Reales (C.F. de Navarra), cuyos datos servirán para representar las condiciones climáticas durante el evento. Como se puede observar en la Figura 6, durante los 3 primeros días de la crecida simulada hubo precipitaciones en la zona de estudio, mientras que durante el resto del evento no se registraron precipitaciones. Pese a ser unas precipitaciones escasas se decidió introducirlas en el modelo de simulación, ya que su efecto en un área tan extensa puede ser importante.

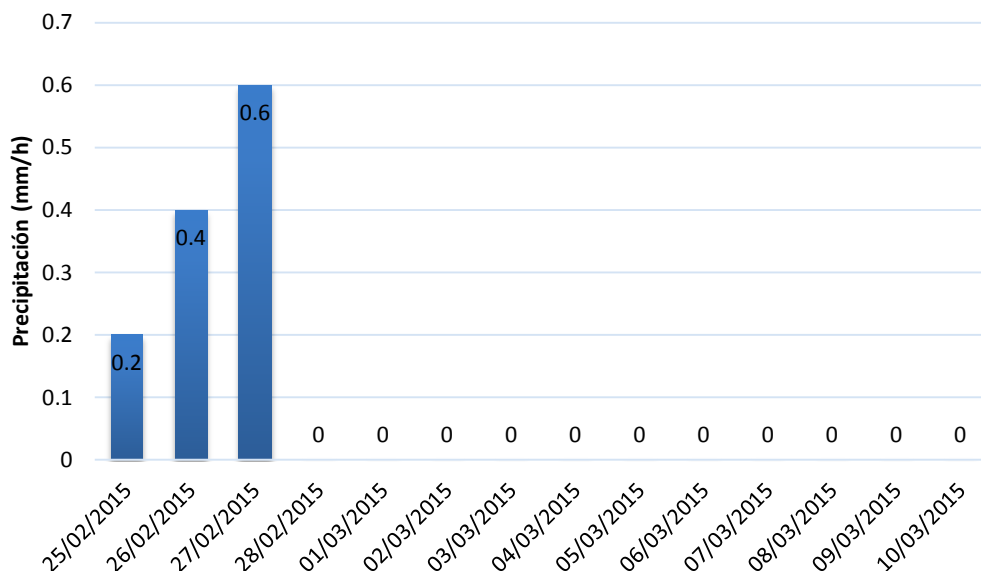


Figura 6. Hietograma elaborado a partir de los datos de precipitación registrados en la estación meteorológica de la Base Aérea de las Bárdenas Reales. Fuente: AEMeT.

4.1.4. Superficies de rozamiento

En la simulación de la inundación es necesario incluir la influencia de la rugosidad de las superficies o usos del suelo presentes en la zona de estudio, dado que, por ejemplo, no ejerce la misma fricción ante el flujo de agua un campo de cultivo que un bosque de ribera.

A la hora de identificar los distintos tipos de superficies, autores como Echeverribar (2016) o Boruel (2017) recurren a la digitalización manual sobre ortofotografías. Este tipo de metodología presenta el inconveniente de ser muy costosa para reunir la información, más si como en el caso del área de estudio del presente trabajo, la zona es notablemente extensa. Por otra parte, es cierto que la información obtenida será más detallada que la obtenida mediante CLC. Sin embargo, existe otra opción, la cual se ha aplicado en estudios relacionados con la caracterización de la vegetación de ribera, como por ejemplo los trabajos de Cánovas *et al.* (2016) y Bork y Su (2007), que han empleado información procedente de teledetección óptica y activa para llevar a cabo clasificaciones digitales para identificar tipos de superficies.

4.1.4.1. Superficies a partir de datos LiDAR

En este trabajo se ha hecho uso de los datos LiDAR del PNOA para identificar las superficies más importantes susceptibles de interferir en el comportamiento del agua. Estos datos corresponden a la primera cobertura o vuelo realizado entre febrero y abril de 2012. Los datos fueron registrados con un sensor LEICA ALS60, el cual puede registrar hasta cuatro retornos por pulso y proporciona nubes de puntos con una densidad nominal de 0,5 puntos por m². Los datos están clasificados de acuerdo con el formato LAS y cuentan con información de elevación, intensidad y color RGB e infrarrojo próximo (NIR) obtenido de las ortofotografías del vuelo PNOA de 2012.

Tras descargar los datos desde la página web del CNIG, se seleccionaron las clases correspondientes con el suelo, vegetación, edificios y agua. Posteriormente se generó un MDE a partir de los puntos de suelo con una resolución espacial de 1 m. Este modelo es necesario para poder normalizar las alturas de los retornos láser. Mediante el comando *Gridmetrics* del software Fusion (McGaughey, 2018), se generaron una serie de métricas estadísticas que proporcionan información sobre la altura y la distribución de los retornos, así como de la densidad de retornos en una superficie determinada. También se decidió extraer métricas relativas a la intensidad registrada en cada retorno. Aunque se trata de una información difícil calibrar y de normalizar ante la influencia de diversos factores que pueden afectar a la energía que registra el sensor LiDAR, se observó que para la zona de estudio no se apreciaban errores radiométricos (Maltamo *et al.*, 2014). Hay que tener en

cuenta que puede ser una información muy valiosa para la identificación de tipos de cubiertas de suelo, ya que el sensor emite pulsos en la longitud de onda del infrarrojo próximo (1064 nm). Por otra parte, también se extrajo el valor de las bandas Rojo, Verde e Infrarrojo próximo. El comando *Gridmetrics* y el comando *CSV2Grid* de FUSION (McGaughey, 2018) permiten obtener cada métrica en un ráster independiente con un tamaño de pixel de 10×10 m. Se decidió esta resolución espacial dado que una mayor resolución supondría un altísimo coste computacional en la fase posterior de simulación dentro del software Iber. En la siguiente Tabla 2 se recogen las métricas LiDAR obtenidas en formato ráster para llevar a cabo un proceso de clasificación digital.

Tabla 2. Métricas derivadas de la distribución de las alturas de los retornos láser, donde x_i es el valor de la observación (altura del retorno, valor de intensidad o valor RG-IR), N es el número total de observaciones, r_i es el retorno, y pl_i es el pulso (Montealegre, 2017).

Métrica	Descripción
Percentiles 5, 25, 50, 75, y 95 (P_{05} , P_{25} , P_{50} , P_{75} , P_{95})	<p>Los diferentes valores de percentiles fueron calculados utilizando la siguiente metodología:</p> $(N - 1)P$ $= I + d \begin{cases} I \text{ es la parte entera de } (N - 1)P \\ d \text{ es la parte decimal de } (N - 1)P \end{cases}$ <p>Donde N es el número de observaciones y P es el percentil dividido por 100.</p> <p>Si $d = 0$ entonces $Percentil = x_{i+1}$</p> <p>Si $d > 0$ entonces $Percentil = x_{i+1} + d(x_{i+2} - x_{i+1})$</p> <p>Donde x_i es el valor de la observación teniendo en cuenta que las observaciones están ordenadas de manera ascendente.</p>
Rango	$x_i \text{ máxima} - x_i \text{ mínima}$
Promedio (μ)	$\frac{\sum_{i=1}^N x_i}{N}$
Moda	Valor x_i más frecuente en la parcela
Desviación típica (σ)	$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^2}{N}}$
Coefficiente de variación	$\frac{\sigma}{\mu} 100$
Desviación absoluta media	$\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)}{N}$
Asimetría	$\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^3}{(N - 1)\sigma^3}$
Curtosis	$\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \mu)^4}{(N - 1)\sigma^4}$
Porcentaje de primeros retornos por encima de un umbral de altura determinado, de la altura media o de la moda (estimación de la fracción de cabida cubierta)	$\frac{\sum_{i=1}^N r_{i \text{ primeros}} > \text{umbral}}{\sum_{i=1}^N r_{i \text{ primeros}}} 100$

Métrica	Descripción
Porcentaje de retornos total por encima de un umbral de altura determinado, de la altura media o de la moda	$\frac{\sum_{i=1}^N r_i > umbral}{N} 100$
Porcentaje de retornos total por encima de un umbral de altura determinado, de la altura media o de la moda, sobre el total de primeros retornos	$\frac{\sum_{i=1}^N r_i > umbral}{\sum_{i=1}^N r_i \text{ primeros}} 100$

Tras obtener todas las métricas se procedió a determinar cuales se utilizarían finalmente. Para ello se seleccionaron 400 puntos de entrenamiento sobre la zona de estudio, es decir, 100 puntos para cada categoría informacional definida (suelo urbano, cultivos, zonas con vegetación arbustiva y zonas con vegetación arbórea) y 120 puntos de control (30 puntos para cada categoría informacional). Para cada uno de estos puntos se extrajeron los valores correspondientes de las distintas métricas formando una muestra, de modo que fue posible la comprobación de la normalidad de las diferentes categorías mediante el test de Shapiro-Wilk, el cual fue aplicado mediante el software SPSS 20. Los resultados de la prueba de normalidad determinaron que las distribuciones de las muestras no eran normales en ninguna de las métricas. Por consiguiente, para determinar qué métricas eran las que muestran diferencias significativas entre categorías informacionales, se realizó la prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis (Cánovas-García *et al.*, 2016).

Posteriormente, y con la selección de métricas ya realizada, se llevó a cabo un proceso de clasificación digital basado en la utilización de árboles de decisión, también conocido como *Random Forest* (RF), (Del Toro, 2015). Se trata de una técnica de clasificación ideal para trabajar con una gran cantidad de datos y variables, ya que para elaborar cada árbol selecciona submuestras (Medina y Ñique, 2017).

Este método se ha implementado mediante el software “*RStudio*” utilizando el paquete “*Random-Forest*” (Liaw y Wiener, 2002). También han sido utilizados los paquetes “*rgdal*” y “*raster*”, los cuales permiten leer los archivos vectoriales con las localizaciones de los píxeles de entrenamiento (en el caso de “*rgdal*”) y cargar los archivos en formato ráster (en el caso de “*raster*”). El resultado de la clasificación fue validado mediante la tasa de error OOB (“*Out Of the Bag*”), la tasa de error “*test*”, el coeficiente “*Kappa de Cohen*” y las matrices de confusión.

Debido a que Iber no puede identificar vectores de tamaño reducido es esencial procesar la información resultante. Para ello se aplicó en primer lugar un filtro de paso bajo, mediante el comando ArcMap *Filter*, con el objetivo de suavizar los datos al reducir la variación local y quitar el ruido (eliminar arbustos en zonas urbanas, árboles aislados en cultivos, etc.). En segundo lugar, se aplicó el comando *Eliminate* para eliminar los polígonos que seguían existiendo con un área menor a 1.000 m². Para finalizar el proceso, se añadió el cauce del río, obteniendo una capa con las cinco categorías informacionales con las que se ha trabajado.

4.1.4.2. Superficies a partir de Corine Land Cover

El objetivo es obtener una capa de información vectorial con diferentes superficies obtenida por medio de CLC. Esta fuente de información sobre ocupación del suelo está disponible en el CNIG para diferentes fechas. La versión utilizada ha sido la del año 2012, debido a que de esta forma los datos espaciales deberían corresponderse o asemejarse a los obtenidos en la clasificación digital con RF y así poder comparar los resultados. Las clases de CLC que existen en la zona quedan recogidas en la Tabla 3, al igual que las clases en las que se han reconvertido.

Tabla 3. Clases de CLC según el tipo de categoría informacional seleccionada.

Categoría informacional	Clase según CLC	
Suelo urbano	111	Tejido urbano continuo
	112	Tejido urbano discontinuo
	121	Zonas industriales/comerciales
	132	Escombreras y vertederos
	133	Zonas en construcción
Cultivos	211	Tierras de labor en secano
	212	Terrenos regados permanentemente
	222	Frutales
Zonas con vegetación arbórea	311	Bosque de frondosas
	312	Bosques de coníferas
Zonas con vegetación arbustiva	323	Vegetación esclerófila
	333	Espacios con vegetación escasa
Cauce	511	Cursos de agua

4.2. Proceso de simulación

En esta fase el objetivo es conseguir los mejores resultados posibles con el menor tiempo de procesamiento. Para ello se toman los datos previamente seleccionados y se ajustan su resolución, el periodo simulado y la extensión de la zona, para posteriormente, tratarlos con el software Iber. El balance entre un modelo muy detallado y la ligereza del mismo es crítico ya que, si los datos con los que se trabajan son demasiado pesados, podrán ralentizar o colapsar la simulación, mientras que, si carecen de suficiente detalle, los resultados pueden omitir mucha información.

4.2.1. Configuración del modelo geométrico y malla

El modelo geométrico se compone de las superficies relativas a los usos del suelo del área de estudio en formato vectorial (polígonos), las cuales son utilizadas por el software Iber para construir una malla continua y compuesta por una red de triángulos con nodos y aristas que toman el valor de rugosidad y el valor de altura del MDE. La malla puede ser tanto estructurada (si los elementos que la componen son regulares) como no estructurada (si no siguen un orden preestablecido). En este proyecto se ha trabajado con una malla no estructurada, en la que la superficie del cauce presenta un tamaño de malla de 10 m, mientras que el resto de superficies poseen un tamaño de 30 m, la cual se puede apreciar en la Figura 7. Esta resolución permite comparar los resultados directamente con la imagen Landsat 7, al mismo tiempo que facilita el cálculo del modelo de simulación, dado que una resolución mayor sería computacionalmente muy intensiva. Además, se ha realizado otra malla estructurada con una resolución de 10 m para todos los elementos de la misma. Dicha malla se ha generado sobre la zona inicial, la cual arrojará unos resultados que permitirán observar las variaciones producidas por ambos índices de rozamiento, pero a una escala más reducida.

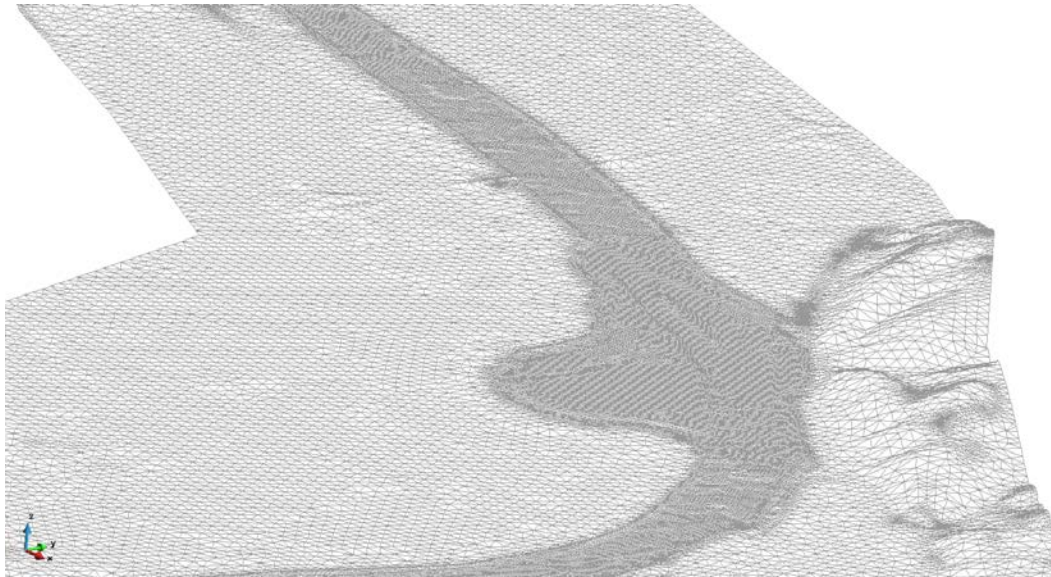


Figura 7. Fragmento de la malla realizada a partir de Iber.

Dado que uno de los objetivos específicos es simular y comparar los resultados que se obtienen con una superficie de rozamiento obtenida con LiDAR y con una superficie de rozamiento derivada de CLC, se han configurado dos modelos geométricos distintos.

Como ya se ha comentado, en ambos modelos de superficies se han identificado cinco tipos de cubiertas: suelo urbano, cultivos, zonas con vegetación arbórea, zonas con vegetación arbustiva y cauces. Estas clases y los valores de rugosidad que se les asignan fueron tomados de Echeverribar (2016), debido a que su estudio se centra en la misma avenida del Ebro, pero abarcando la zona comprendida entre Castejón y Zaragoza y trabajando con un modelo de mayor precisión. La rugosidad del cauce y la llanura de inundación dependerán de diversos factores, como la vegetación, el tipo de suelo o la pendiente. Este queda definido por un valor obtenido mediante el conocido como coeficiente de Manning. Las clases y el coeficiente de Manning utilizado quedan recogidos en la Tabla 4.

Tabla 4. Clases y coeficientes de Manning.

Tipo de superficie	Coficiente de Manning
Suelo urbano	0,05
Cultivos	0,028
Zonas con vegetación arbórea	0,06
Zonas con vegetación arbustiva	0,045
Cauces	0,035

Tras este proceso se obtiene como resultado final una simplificación tridimensional del terreno, formado por pequeñas superficies discretas con valores asignados de tamaño, rugosidad y altura.

4.2.2. Configuración del tiempo de cálculo de la simulación

Se estipuló que el tiempo de cálculo fuese de 470.700 s para las simulaciones que se compararán con la imagen de satélite, lo que equivale a una simulación que dio comienzo el día 25 de febrero a las 00:00 h y finalizó el día 2 de marzo a las 10:45 h. De esta forma se simula el evento desde su inicio hasta el momento donde es tomada la imagen del satélite Landsat 7. Otro aspecto a mencionar es el resultado que se buscó en el post proceso. Debido a que una de las formas de validar y

comparar los resultados con los calados en la estación de aforo de Novillas, el resultado que se buscó fue únicamente el calado, obteniendo al mismo tiempo la extensión de la zona inundada.

Por otra parte, para la simulación de alta resolución se estipuló un tiempo de cálculo de 4000 s, tomando el mismo punto de partida, en lo que a entrada de caudal se refiere.

4.3. Validación de la simulación

Esta fase se considera crucial y novedosa, por cuanto se podrá determinar la efectividad del modelo de simulación. Se ha planteado una doble validación, por un lado, contrastar la superficie inundada con la que se muestra en la imagen satelital de Landsat 7, y por otro cuantificar la diferencia entre el valor del calado de la simulación y el valor real de la estación de aforo de Novillas. Ésta última práctica es habitual en los estudios de simulación de avenidas, como se puede apreciar en el realizado por Echeverribar (2016), sin embargo, esta puede llevar a errores debido al posible colapso de la estación ante un fenómeno extremo. Por ende, se decidió trabajar también con datos espaciales obtenidos de imágenes satelitales, lo cual es poco frecuente en este tipo de trabajos.

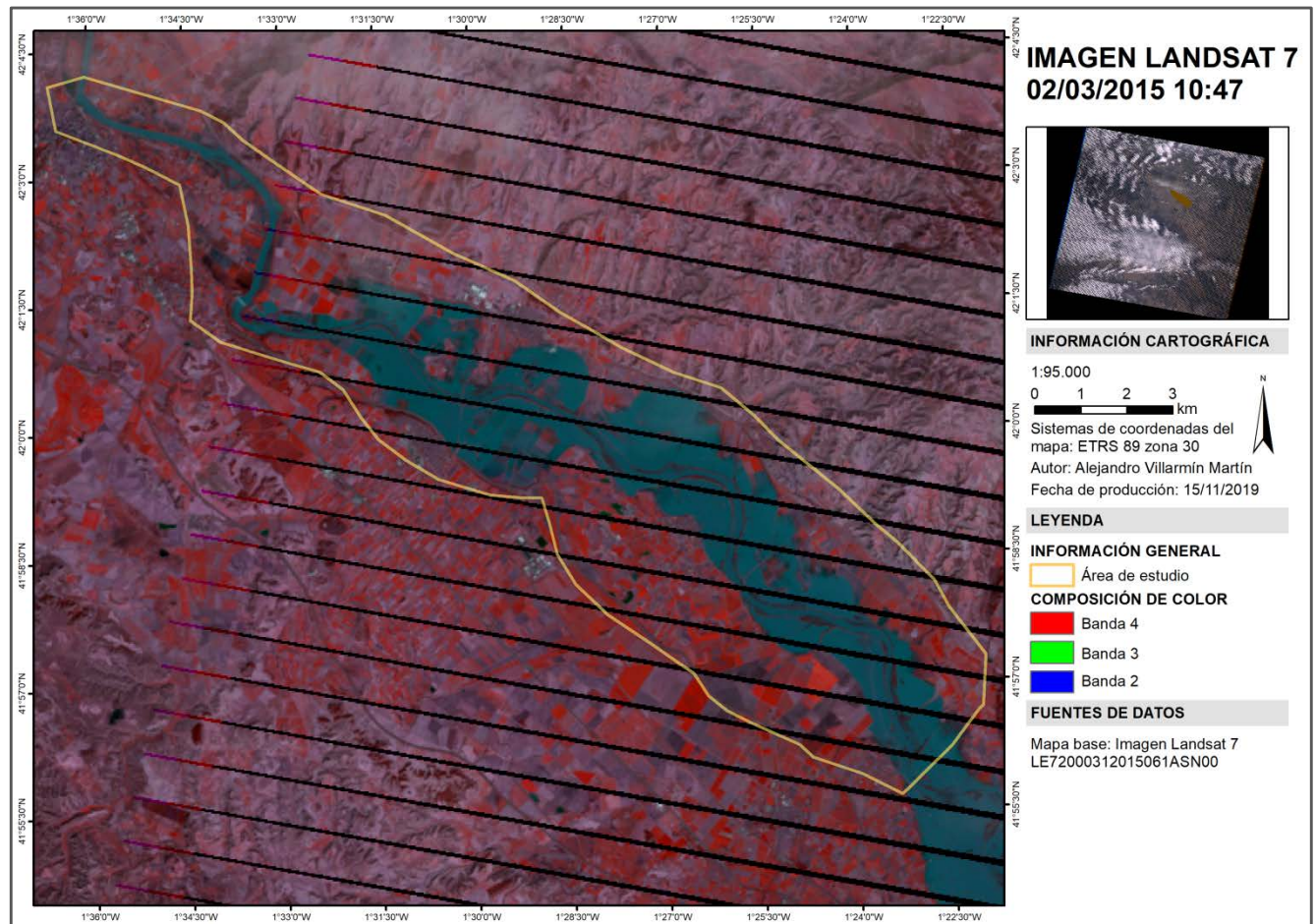


Figura 8. Imagen de Landsat 7 utilizada. Se muestra una composición falso color infrarrojo para evidenciar el contraste entre las zonas inundadas y el resto.

Respecto de la validación espacial mediante una imagen, en el “Informe sobre las avenidas del primer trimestre de 2015 en la cuenca del Ebro” de la CHE (2015), queda recogido como las condiciones climáticas durante el evento impidieron realizar vuelos que permitiesen capturar ortofotografías de la zona. Sí que tomaron fotos desde drones a baja altura, pero estas no son aptas para delimitar las zonas afectadas. Por otra parte, tres fueron los satélites que capturaron información durante el evento: Sentinel 1, Landsat 7 y Landsat 8. Debido a las fechas (2 y 3 de febrero de 2015), las mejores opciones son las imágenes captadas por Sentinel 1 y Landsat 7, ya que Landsat 8 tomó sus imágenes al final del evento. La capacidad del sensor radar de Sentinel 1 de captar imágenes y la inexistencia del bandeado que afecta a las imágenes de Landsat 7 lo convertía en la primera opción para validar el modelo espacialmente. Sin embargo, las imágenes de esta misión no se encon-

traban disponibles al público en el momento de la realización de este trabajo. Cabe resaltar que las imágenes de Sentinel 1 fueron utilizadas por el programa Copérnico para generar cartografías que delimitasen las zonas inundadas. Sin embargo, esta cartografía no incluía la zona de estudio con la que se ha trabajado, por lo que definitivamente fueron descartadas. De este modo, las imágenes seleccionadas fueron las del satélite Landsat 7, que pese a presentar zonas afectadas por el bandeo, se puede apreciar perfectamente la extensión de la lámina de agua, tal y como se muestra en la Figura 8.

La imagen utilizada fue descargada desde el servicio web de *United States Geological Survey (USGS)*. Dicha imagen pertenece a la colección de “TI” de datos Landsat. Estas imágenes forman parte de las escenas con mayor calidad de datos disponibles (Nivel 1), las cuales son adecuadas para el análisis de series temporales. Las relaciones entre las diferentes bandas del sensor, así como las longitudes de onda en las que este satélite recoge información y la resolución de la misma, quedan recogidas en la Tabla 5.

Tabla 5. Características de las bandas de Landsat 7 (USGS, 2019).

Bandas espectrales	Longitud de onda central (µm)	Resolución espacial (m)
Banda 1 - Azul	0,45 - 0,52	30
Banda 2 - Verde	0,52 - 0,60	30
Banda 3 - Rojo	0,63 - 0,69	30
Banda 4 - Infrarrojo próximo	0,77 - 0,90	30
Banda 5 - SWIR 1	1,55 - 1,75	30
Banda 6 - Térmico	10,40 - 12,50	60
Banda 7 - SWIR 2	2,09 - 2,35	30
Banda 8 - Pancromático	0,51 - 0,89	15

Para facilitar la comparación espacial entre la lámina de agua de la simulación y la imagen satelital, se calculó el índice NDWI (*Normalized Difference Water Index*), propuesto por McFeeters (McFeeters, *et al.* 1996), el cual se obtiene a partir de la información espectral de la imagen.

El resultado del índice se obtuvo al aplicar la fórmula expuesta en la Ecuación 1 mediante el comando *Raster calculator* a las bandas “2” (banda del verde) y “4” (banda del NIR) de la imagen de Landsat 7.

$$NDWI = (Verde - NIR)/(Verde + NIR) \quad \text{Ecuación (1)}$$

5. RESULTADOS

Este apartado consta de tres subapartados en los que se analizan los resultados obtenidos de las superficies de rozamiento, la validación de la simulación y la comparación de las simulaciones con mallas de alta resolución.

5.1. Superficie de rozamiento

En la Tabla 6 se muestran las métricas seleccionadas, junto al valor de Chi² obtenido tras la aplicación del test de *Kruskal Wallis*. Las razones para seleccionar estas diez variables fueron, por un lado, el valor del estadístico, y por otro lado el uso de métricas basadas en la altura, la intensidad y la información espectral.

Tabla 6. Variables seleccionadas y valor del estadístico Chi².

Variables	Chi²
Percentil 95% (elevación)	540,569
Media (elevación)	538,330
Desviación estándar (elevación)	508,972
Porcentaje de los primeros retornos por encima de la altura (elevación)	490,901
Coefficiente de varianza (intensidad)	477,610
Percentil 5% (intensidad)	474,366
Banda del rojo	313,321
Banda del verde	294,890
Media (intensidad)	283,810
Infrarrojo próximo	166,482

La identificación de superficies mediante RF presentó un grado de acierto del 90,83% según el método de validación “test” y del 90% según el método OOB. Al analizar las matrices de confusión de ambos métodos de validación, recogidas en las Tablas 7 y 8, es posible apreciar que, en ambos casos, las clases informacionales “Arbutos” y “Urbano” han sido las que más confusión han generado en el modelo, pese a que también presentan un error bajo. En el caso de la clase “Arbustos”, ambas matrices muestran como el modelo tiende a confundirlo con las clases “Árboles” y “Cultivos”, lo cual es lógico, debido en parte a que “Arbusto” es una clase intermedia y con unas características de altura similares a ambas. Por otra parte, los errores detectados en la matriz de confusión de la clase “Urbano” muestran que el modelo presenta dificultades para diferenciarla con los arbustos principalmente. Esto puede deberse también a un problema con las alturas, ya que en algunas vías de comunicación sobre elevadas se seleccionaron puntos “Training” y “Test”, los cuales presentaban unas características métricas similares a las de la clase “Arbustos”.

Tabla 7. Matriz de confusión de la ratio de error “test”.

	Árboles	Arbustos	Cultivos	Urbano	Error
Árboles	29	1	0	0	3%
Arbustos	2	25	2	1	16%
Cutivos	0	1	29	0	3%
Urbano	0	3	1	26	13%

Tabla 8. Matriz de confusión OOB.

	Árboles	Arbustos	Cultivos	Urbano	Error
Árboles	90	7	1	2	10%
Arbustos	3	87	7	3	13%
Cutivos	0	6	93	1	7%
Urbano	4	5	1	90	10%

El último método utilizado para la validación fue el coeficiente Kappa, el cual arroja un resultado de 0,89 (Tabla 9). Este resultado muestra un grado de acuerdo casi perfecto, según la clasificación de Landis y Koch (1977), dejando claro que los resultados obtenidos no se deben al azar, sino que existe una alta correlación entre ellos (Borràs *et al.*, 2017).

Tabla 9. Resultados de errores e índice Kappa.

Método de validación	Resultados
OOB	10%
Test	9,17%
Kappa	0,89

Como resultados cartográficos se encuentra por un lado las cartografías obtenidas a partir de RF, las cuales quedan recogidas en la Figura 9 y 10 y por otro lado la cartografía obtenida a partir de CLC, representada mediante la Figura 11.

La cartografía obtenida mediante RF (Figura 9) muestra mucho más detalle que la presentada en la capa de CLC (Figura 11). Prueba de ello son los múltiples ejemplos de vegetación arbustiva o arbórea diseminada por el cauce del río, los caminos e incluso dentro de las zonas urbanas. También esta cartografía identifica los elementos urbanos, no solo en las zonas de los núcleos de población, sino que también es capaz de identificar edificios dispersos e incluso vías de comunicación. Por desgracia toda esta información no es posible transferirla a Iber, debido a su elevado detalle, por lo que es imperativo utilizar una cartografía que recoja la información más importante a la vez que se reducen el número de polígonos de pequeño tamaño, además de incluir un cauce.

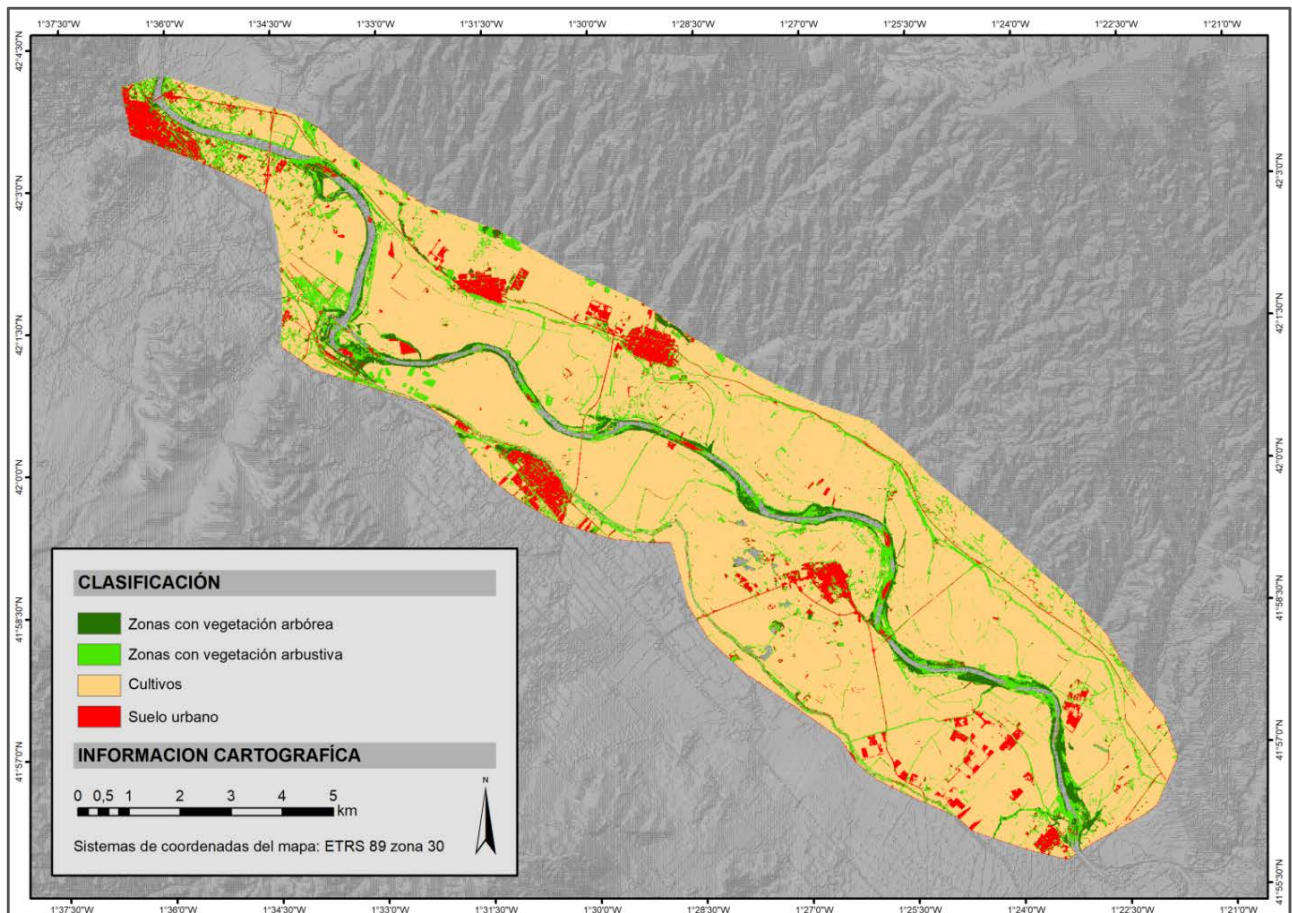


Figura 9. Tipos de superficies según la clasificación de RF.

Desde el punto de vista para la simulación, los datos con más importancia son la vegetación de ribera y las áreas urbanas que CLC no recoge, los cuales presentan a priori una impedancia mayor al paso del flujo. El resultado final, presentado a través de la Figura 10, muestra una cartografía, que si bien no posee tanto detalle como la obtenida directamente de RF, sí que recoge elementos de interés para la simulación, como la vegetación arbórea y arbustiva, o elementos urbanos de gran tamaño. De este modo se pierden los polígonos dispersos y de pequeño tamaño, pero se mantienen

los principales elementos de la zona, ofreciendo un resultado que no guarda tantas diferencias con la cartografía original, teniendo en cuenta que se ha trabajado con las simulaciones a una resolución de 30 m.

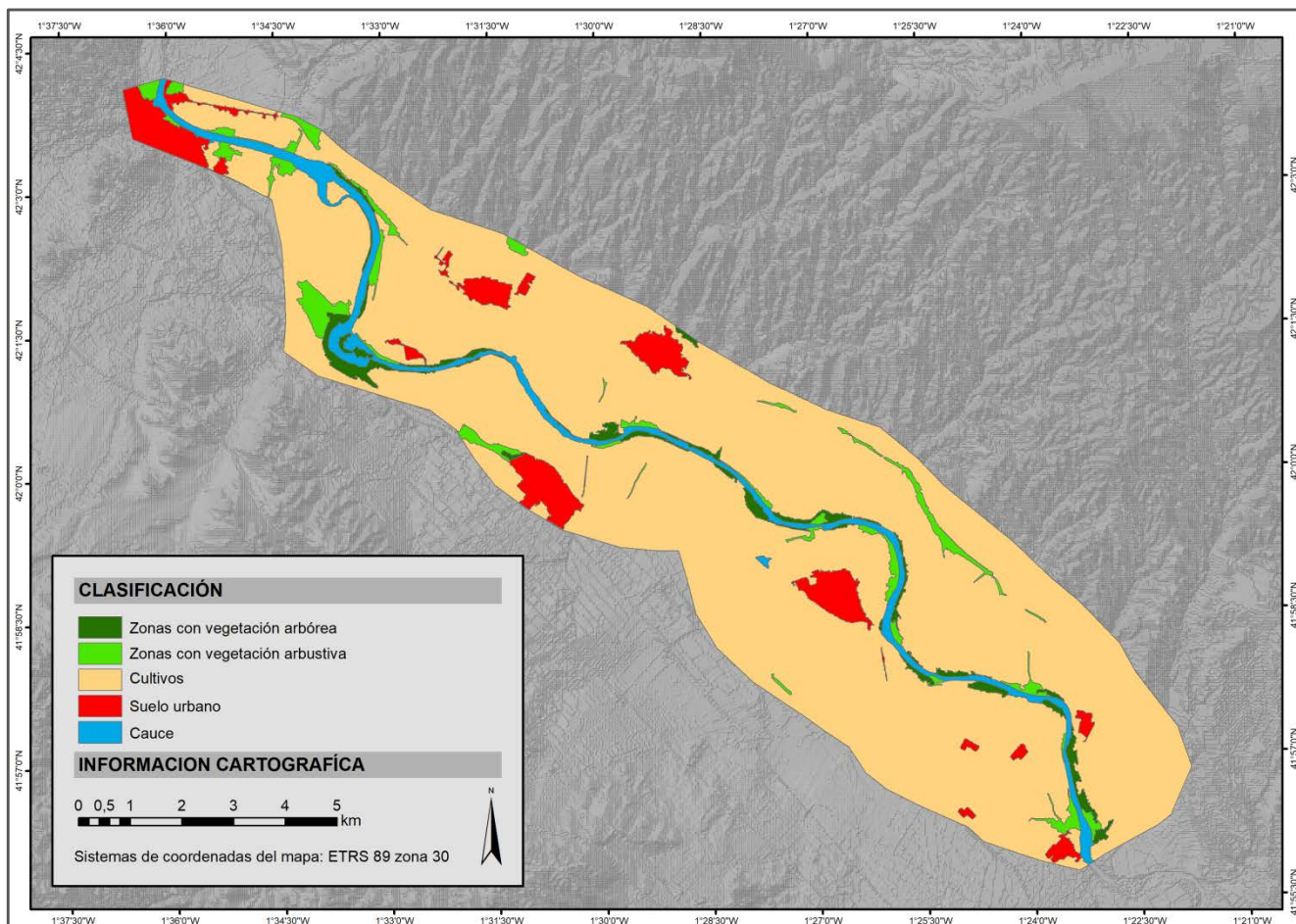


Figura 10. Tipos de superficies según la clasificación de RF procesada.

Finalmente, al comparar los resultados de la Figura 10 con los de la Figura 11, es evidente que se ha obtenido una cartografía más detallada. Esta guarda una mayor relación con la realidad, principalmente en la ocupación de espacios de vegetación de ribera o la inclusión de otros municipios como Novillas o elementos urbanos diseminados que no quedan recogidos en CLC. Acercando de este modo el resultado obtenido mediante una clasificación digital manual.

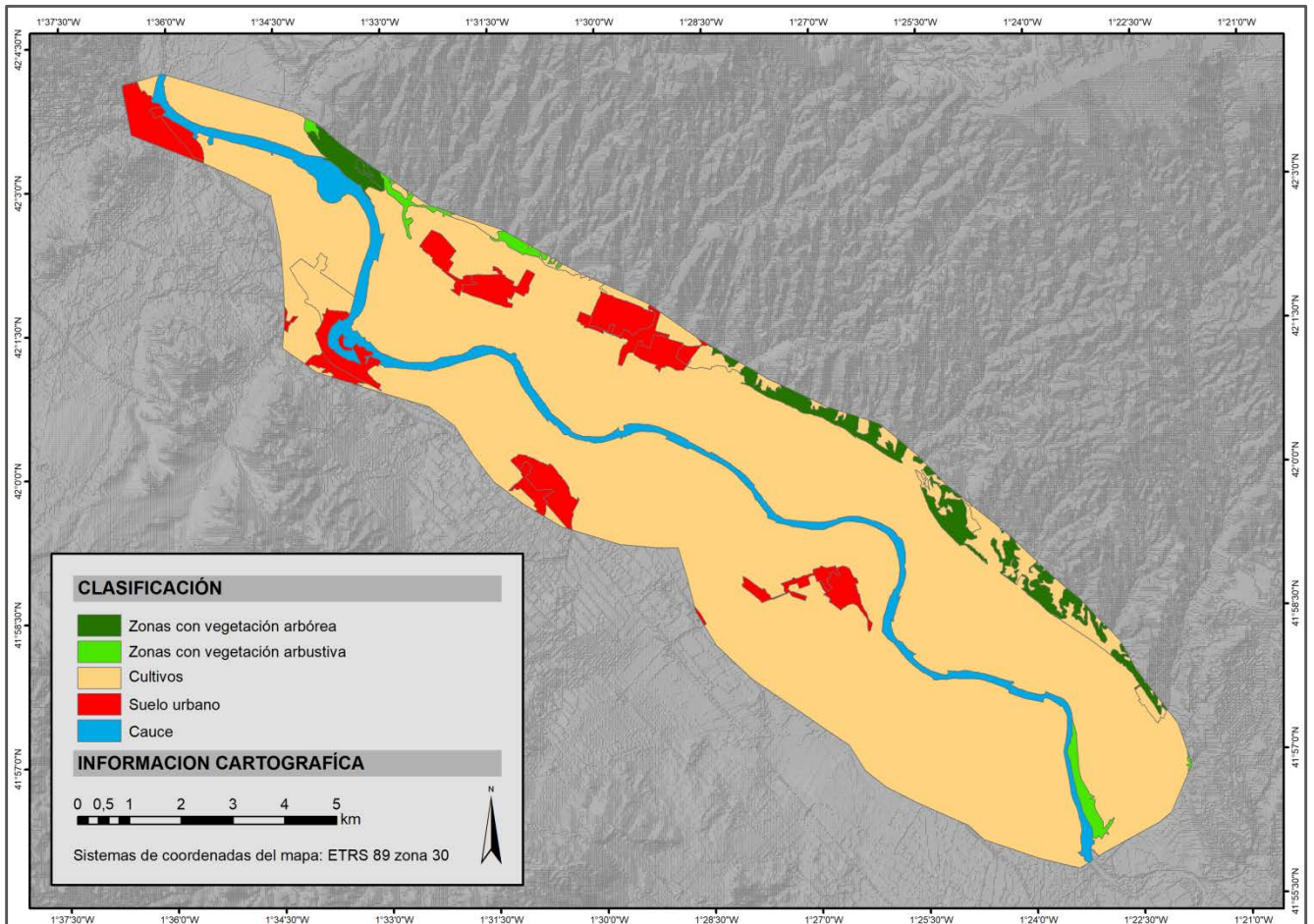


Figura 11. Tipos de superficies según la clasificación de CLC.

5.2. Validación de las simulaciones

Los resultados obtenidos mediante ambas simulaciones presentan un área inundada muy similar entre sí. En las Figuras 12 y 13 es posible apreciar como el flujo ha superado las diferentes motas que existen en la zona, e invade algunas carreteras secundarias y municipios próximos al mismo, como Cabanillas, Ribaforada, Buñuel, Novillas y Tudela, siendo los más afectados estos dos últimos. En general la masa de agua simulada ha avanzado en ambas simulaciones hasta las zonas del escarpe o terrazas fluviales donde, debido al desnivel topográfico, se ha paralizado. Cabe destacar sobre esto último, que, pese a basar la malla de los elementos no caracterizados como cauce con una resolución de 30 m, los resultados son muy precisos en cuanto a coincidencias con las zonas de escarpe y terrazas. También se observa en la segunda mitad del área simulada que la laminación del flujo cubre perfectamente antiguos espacios ocupados por el cauce. Según estas simulaciones, la primera mitad simulada es la más afectada, ya que dentro de esa zona las carreteras de la zona están más próximas al cauce, lo que sumado a que la llanura de inundación es más extensa da como resultado una mayor afección a las vías de comunicación.

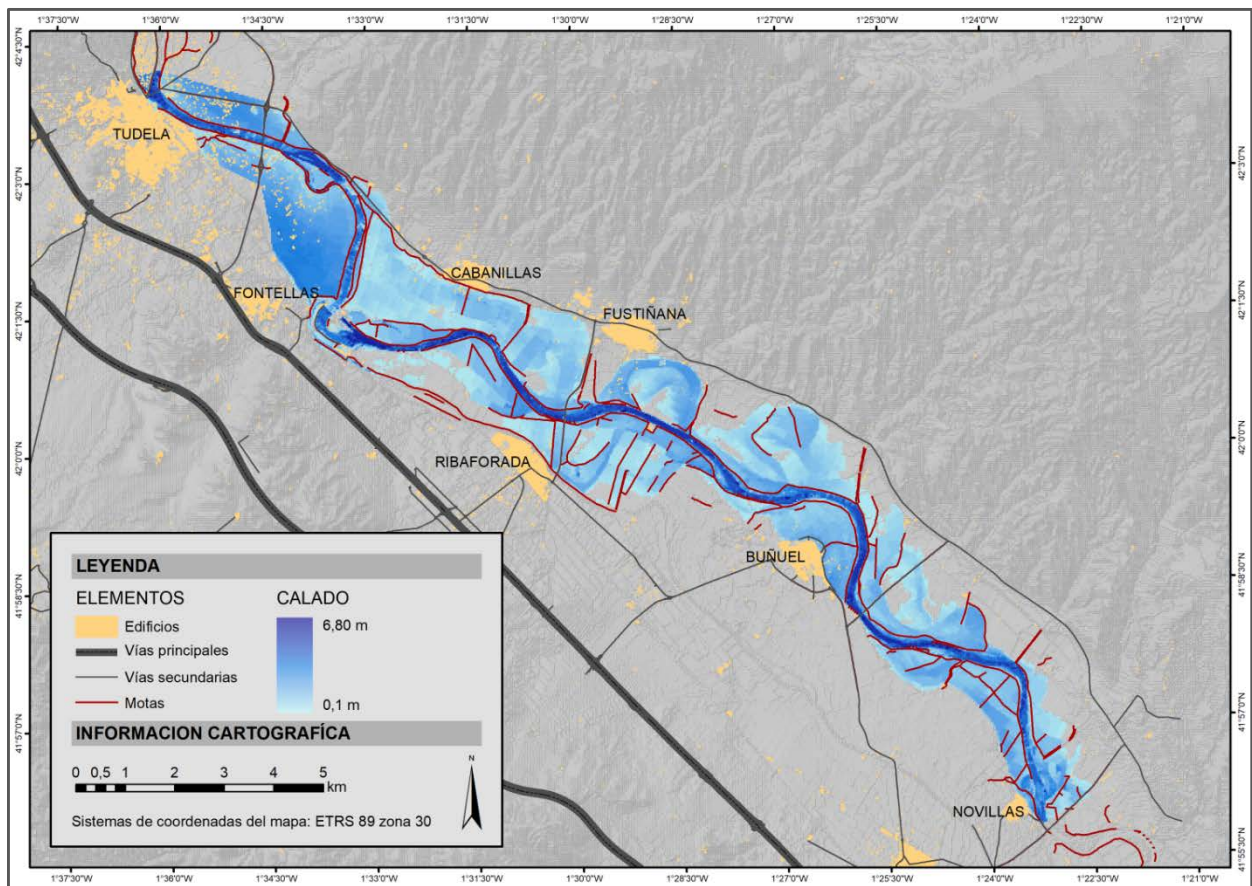


Figura 12. Resultado de la simulación realizada a partir de CLC.

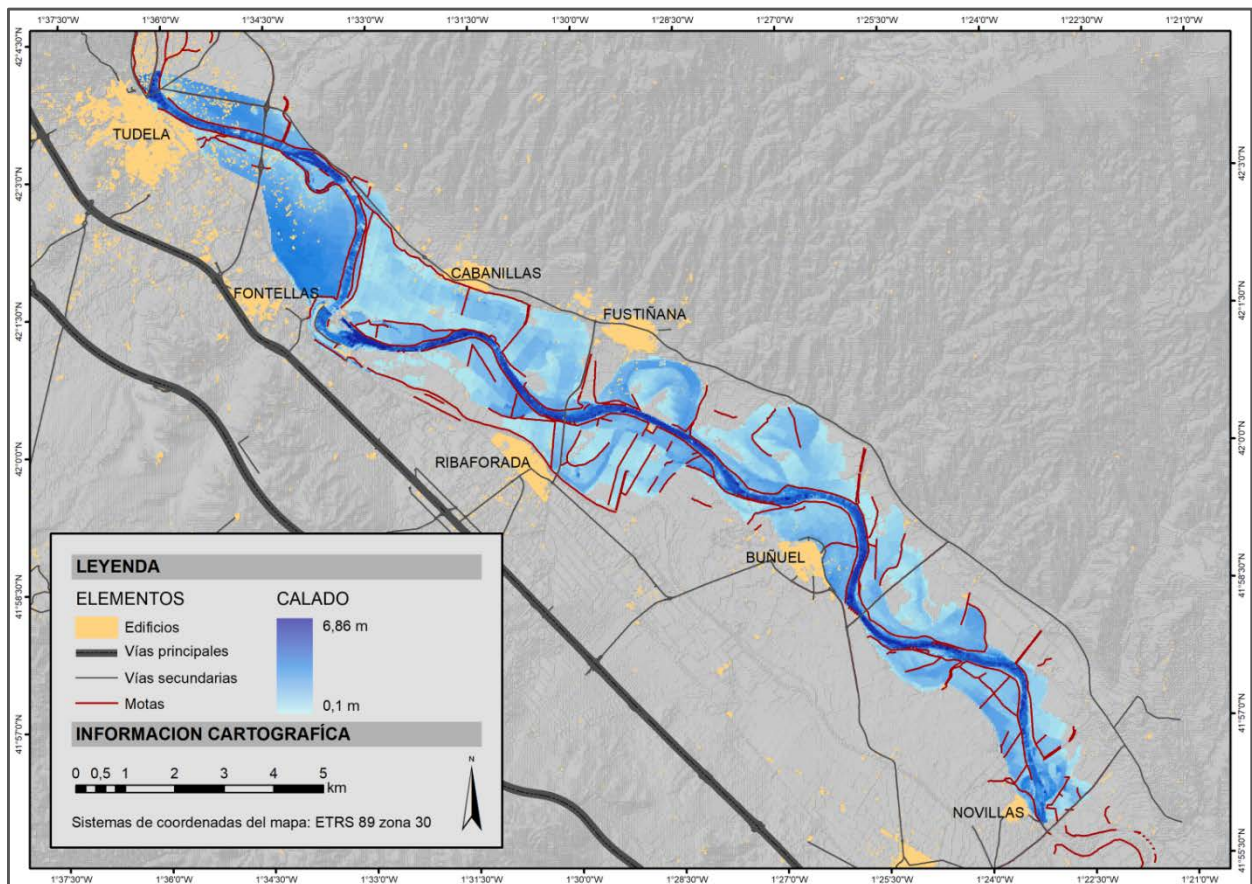


Figura 13. Resultado de la simulación realizada a partir de RF.

Los resultados obtenidos a través de la validación de las distintas simulaciones muestran unos resultados satisfactorios. En lo que a datos de calado respecta, la Tabla 10 muestra como ninguna se acerca a los 7,40 m recogidos en la estación de aforo de Novillas el día 2 de marzo del 2015 a las 10:45 h. La simulación que más se aproxima a este dato es la realizada con CLC, la cual presenta un dato de 4,59 m, mientras que la simulación realizada con RF presenta una cota 11 cm menor.

Tabla 10. Comparación de los resultados de las dos simulaciones.

Simulación según el tipo de superficie de rozamiento utilizada	Área inundada (km²)	Área no inundada (km²)	Área dentro del NDWI (km²)	Área fuera del NDWI (km²)	Calado (m)
CLC	41,68	52,11	29,76	18,02	4,59 m
RF	43,01	50,78	29,67	18,39	4,48 m

Por otra parte, el grado de acuerdo alcanzado, en cuanto a la extensión espacial de ambas simulaciones ha sido correcto, tal y como se puede apreciar en la Tabla 10 y la Figura 14. El tramo del cauce del río, comprendido entre los municipios de Tudela y Cabanillas (la cuarta parte superior del área de estudio), se pensaba que arrojaría unos resultados más ajustados con lo observado en la imagen satelital, debido a las características del cauce. Sin embargo, este ha resultado ser el tramo que menos se ha parecido con la imagen satelital. En contraposición, el resto de la zona simulada se asemeja notablemente con la información captada por el satélite. Cabe resaltar que, existen notas de prensa del día 27 de febrero de 2015, como la de RTVE, que comunican cómo el casco antiguo de Tudela y las zonas de cultivos aledañas quedaron completamente inundadas. Cabe la posibilidad de que la CHE u otra entidad entre los días 27 de febrero y 2 de marzo de 2015, realizase alguna acción para aliviar la acumulación del flujo en esta zona.

Al igual que sucede con los calados, el modelo más preciso ha resultado ser el generado con CLC. Este modelo ha dibujado un área inundada de 41,68 km², cifra considerablemente más elevada que los 33,09 km² extraídos del índice NDWI. Este incremento del área se debe a las zonas, anteriormente mencionadas, comprendidas entre Tudela y Cabanillas, donde ambas simulaciones se han excedido. No obstante, hay que tener en cuenta que este modelo coincide en más de un 70% con la extensión esperada.

Por su parte, los resultados del modelo generado con RF no han resultado tan precisos. Como se puede apreciar en la Figura 15 y en los datos recogidos en la Tabla 10, ambas simulaciones son muy similares, pero la realizada a partir de este modelo no ofrece los resultados esperados, presentando un 68% de coincidencia con el NDWI, al mismo tiempo que presenta un área inundada más extensa y con unos calados 10 cm más profundos que los simulados con CLC. Estos resultados sorprenden ya que este modelo presentaba una mayor impedancia al paso del agua, debido a que contaba con unos datos de rozamiento en los laterales del cauce más elevados que los presentados en el modelo de CLC.

Con este resultado cabe preguntarse cuáles han sido las razones por las que los dos modelos muestran tantas similitudes. Entre las diversas opciones se barajan que debido a la resolución y a la estrecha franja de árboles y arbustos que recorren el cauce, el modelo no recoge correctamente la impedancia generada por esta vegetación de ribera que contempla RF y no CLC, aunque otra posibilidad es que la rugosidad de las diferentes superficies no afecte tanto al resultado del modelo como se esperaba.

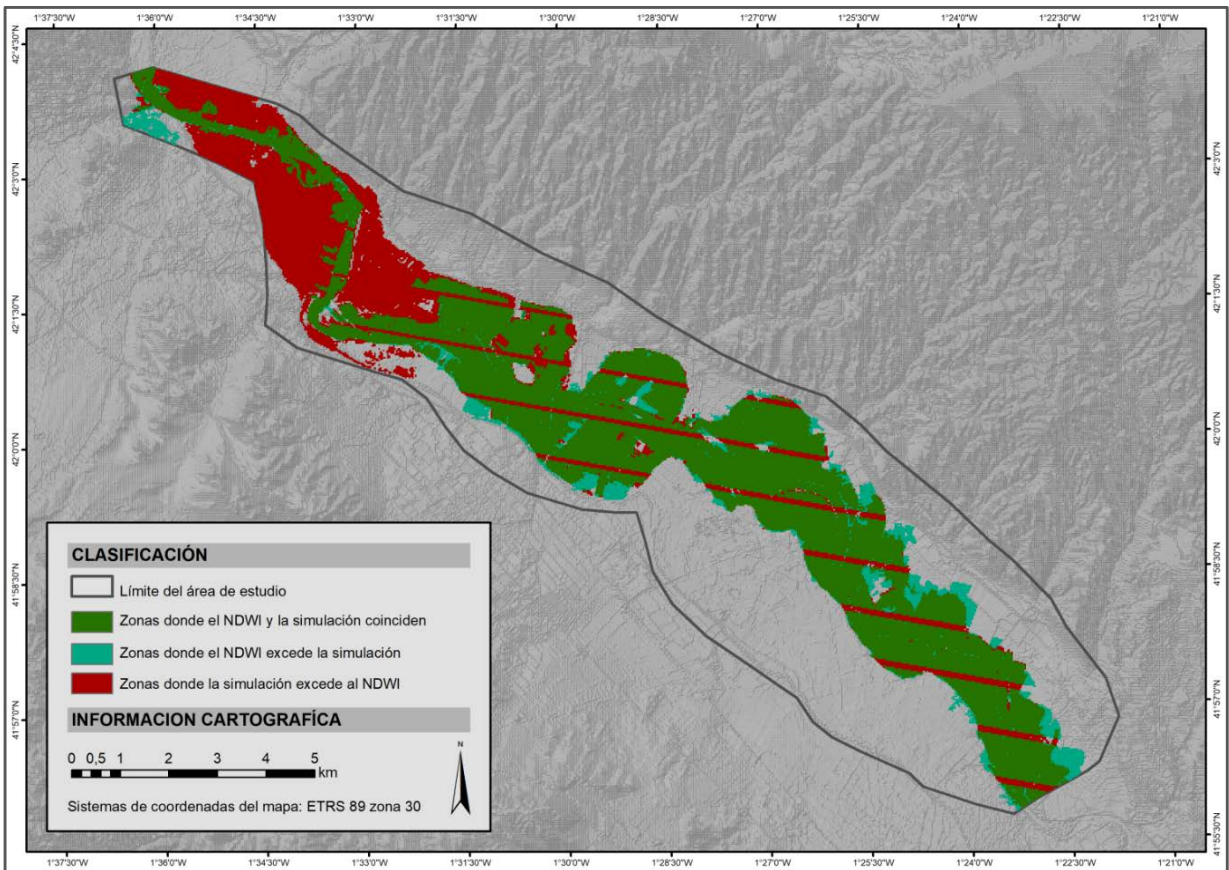


Figura 14. Zonas donde la simulación realizada a partir de los datos CLC coincide con los datos recogidos por el satélite Landsat 7.

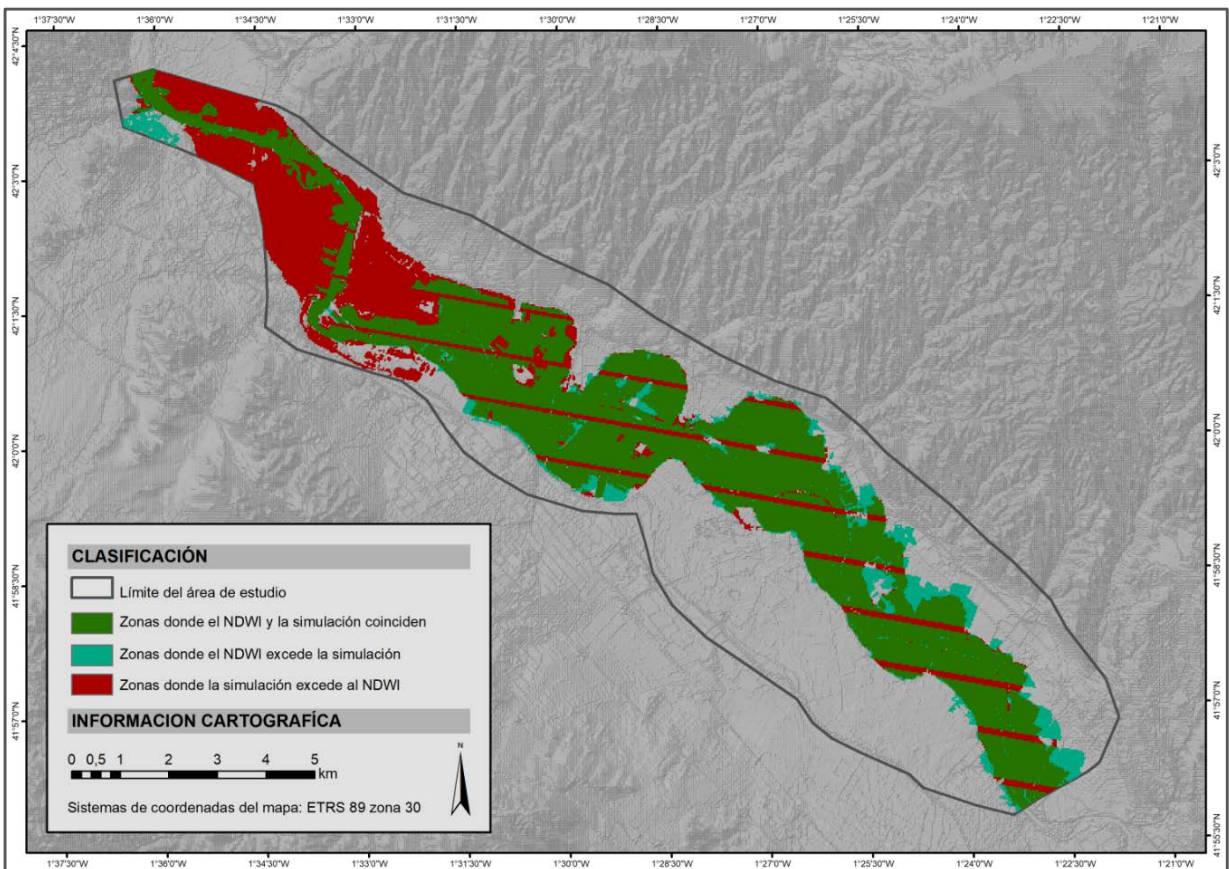


Figura 15. Zonas donde la simulación realizada a partir de los datos RF coincide con los datos recogidos por el satélite Landsat 7.

5.3. Comparación de las simulaciones de alta resolución

Como resultado final están las simulaciones de alta resolución. Debido al coste computacional que requieren estas simulaciones, solo se han realizado sobre la primera parte de la zona de estudio. Los resultados arrojados son muy distintos a la simulación anterior, en lo que a extensión de la misma se refiere. Como ya se ha comentado en el anterior subapartado, la resolución con la que se había trabajado anteriormente (30 m) podría restarle importancia al efecto de las rugosidades de las superficies.

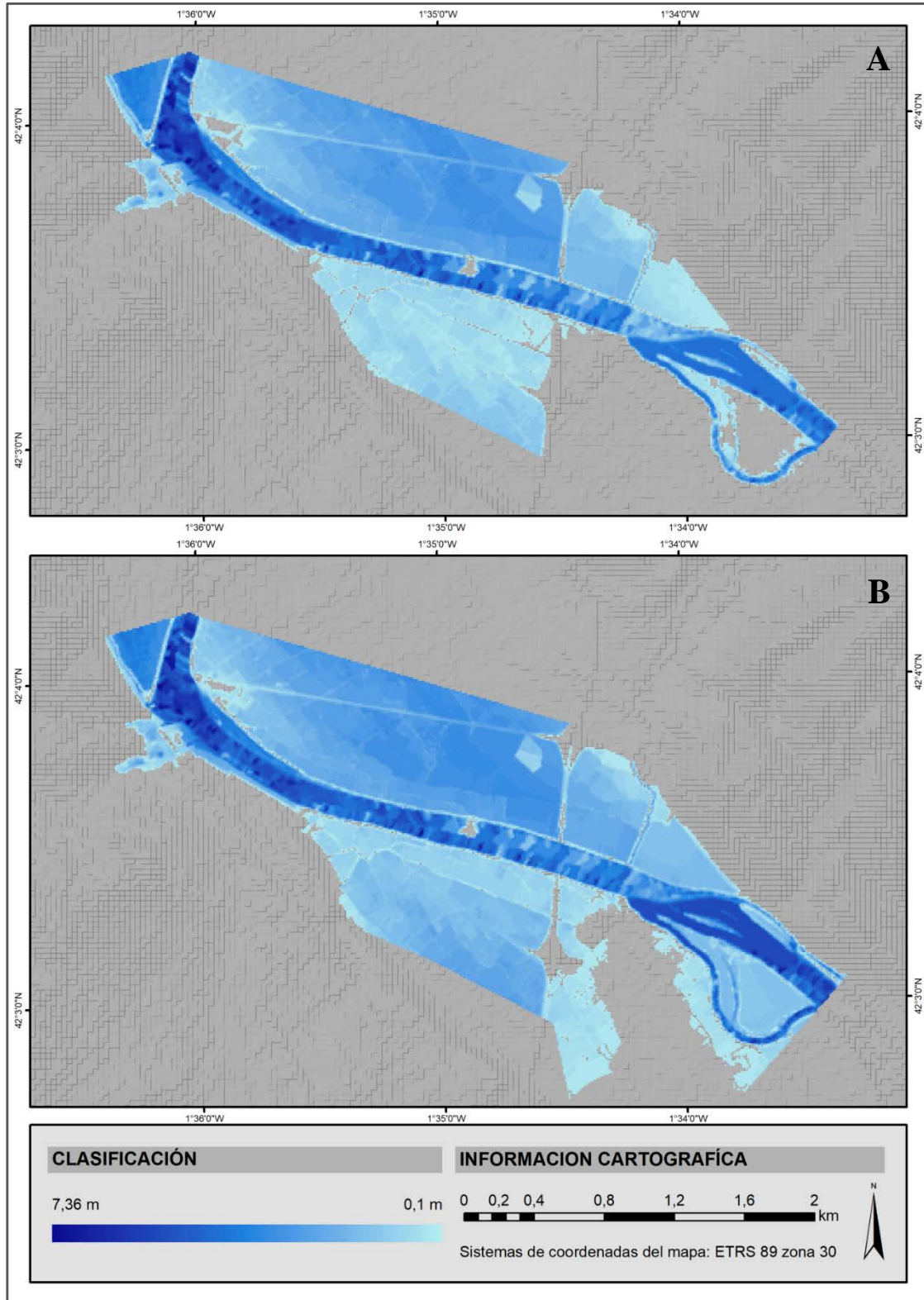


Figura 16. Simulaciones con mallas de alta resolución. A) Simulación RF. B) Simulación CLC.

Como se puede comprobar en la Figura 16 los resultados de estas simulaciones, muestran que la procedente de RF (Figura superior) alcanza una extensión un 15% menor que la simulación realizada con CLC (Imagen inferior). Las zonas de cultivos situadas en los extremos del cauce presentan menor cantidad de flujo, tanto a nivel de calados como de extensión, siendo especialmente significativa la parte final de la simulación donde la lamina de agua se ajusta mucho mejor al recorrido del cauce en el caso de la simulación con RF que en la de CLC.

Estos resultados constatan que las superficies de rozamiento si afectan significativamente en lo resultados de las simulaciones, siempre y cuando la resolución del modelo sea la adecuada.

6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Tal y como se ha mostrado en el apartado anterior, los resultados obtenidos no han permitido aceptar la hipótesis planteada inicialmente. No obstante, estos resultados son satisfactorios, puesto que ambas simulaciones han alcanzado un nivel de coincidencia del 70% con respecto a la validación espacial, lo cual, es un resultado positivo teniendo en cuenta todas las limitaciones técnicas y de datos que se han tenido. Al comparar estos resultados con los obtenidos por Echeverribar (2016), se observa que ambos son similares, aunque sus resultados, en cuanto a validación por datos de aforo son superiores.

De todas las limitaciones que se han encontrado, tres han sido las que han supuesto un mayor peso. La primera de ellas es sin duda la imposibilidad de trabajar a una mayor resolución espacial. Este era un problema que se tuvo en cuenta desde el principio, pero que no se pensó que podría tener las implicaciones que ha mostrado, ya que de las simulaciones validadas a las simulaciones con una mayor resolución espacial existe una diferencia en la extensión del resultado, entre la simulación de CLC y RF del 3% en el primer caso y 15% en el segundo. Lo cual invita a pensar que, con un modelo basado en una resolución de 1 m, como permiten por el momento los datos LiDAR-PNOA, sería posible superar el 70% de grado de coincidencia en la validación espacial y las diferencias entre un modelo y otro se acentuaría.

La segunda de ellas ha sido la falta de información batimétrica del cauce. El no disponer de este tipo de información y al trabajar en un río de tal envergadura, se presupone que los resultados no van a presentar toda la exactitud que se podría esperar. La falta de estos datos no sería tan importante en otro río de menor tamaño, aunque hay que tener en cuenta que a partir de 2017 el programa Lidar-PNOA dispone de estos datos la Comunidad Foral de Navarra, por lo que será posible reproducir con estos datos eventos posteriores en el área de estudio.

La última gran limitación es sin duda la falta de información durante el proceso de la avenida. Pese a disponer de informes detallados como el "*Informe sobre las avenidas del primer trimestre de 2015 en la cuenca del Ebro*" de la CHE (2015), se ha comprobado que ha faltado información necesaria para modelar la simulación correctamente. En concreto el problema se ha encontrado en la primera parte de la simulación, que como se ha podido advertir en el apartado anterior, la simulación inundaba zonas que no aparecieron afectadas por la avenida según la imagen Landsat 7, pero que sí que fueron anegadas durante el evento y no ha sido posible averiguar si el agua evacuó de forma natural, lo cual supondría un fallo en la simulación, o si por el contrario se realizó alguna acción para liberar el flujo laminado.

Pese a que estas han sido las principales limitaciones con las que se ha trabajado a lo largo del estudio, existen otras, que si bien es cierto que su impacto no se considera muy significativo existen. En este punto se puede hacer referencia a elementos de la simulación como la clasificación digital, la cual si bien es cierto que ha arrojado unos resultados muy buenos y su elaboración resulta novedosa, por cuanto combina información de altura de los retornos e intensidad, sí que hubiera sido ideal contar con imágenes ópticas multiespectrales de alta resolución espacial, como por ejemplo Sentinel 2.

En definitiva, este estudio demuestra que la identificación de las superficies mediante el uso de datos LiDAR es más precisa que la propuesta por CLC, pero la resolución espacial puede intro-

ducir variaciones en los resultados. Al trabajar con una resolución espacial de 30 m para la lámina de agua obtenida, las superficies de CLC se ajustan mejor a la imagen satelital. Por otra parte, cabe destacar la importancia de validar el modelo de simulación mediante el uso de imágenes, debido a que arroja más información que la tradicional validación por diferencia de calados.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi tutor, Antonio Luis Montealegre Gracia, todo el esfuerzo, atención y disponibilidad que ha mostrado a lo largo de todo el trabajo.

Agradecer también a los docentes Fernando Pérez Cabello y Raquel Montorio Lloveria, su disponibilidad y colaboración con el trabajo.

Finalmente, agradecer a José Ángel Losada García, de la Confederación Hidrográfica del Ebro, los datos proporcionados.

BIBLIOGRAFÍA

Landis, J.R. y Koch, G.G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Bio-metrics*, Vol. 33, pp. 159-174.

McFeeters, S.K. (1996) The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, Vol 17, pp.1425-1432.

Breiman, J. (2001). Random Forest. *Machine Learning*, Vol. 45, pp. 5-32.

Congalton, R.G. Birch, K. Jones, R. y Schriever, J. (2002). Evaluating remotely sensed techniques for mapping riparian vegetation. *Computers and Electronics in Agriculture*, Vol. 37, pp. 113-126.

Liaw, A. y Wiener, M. (2002). Classification and Regression by Random Forest. *R News*, Vol. 2, pp 18–22.

Bork, E.W. y Su, J.G. (2007). Integrating LiDAR data and multispectral imagery for enhanced classification of rangeland vegetation: A meta analysis. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 111, pp. 11-24.

Arizpe, D. Almeida, M.H. Baeza, D. Bergmeier, E. Bjorkland, R.H. Bjorkland, R. Brufao, P. Campea, A. Catita, D. Chatzinikolaou, Y. Cortes, R. Décamps, H. Dimopoulus, P. Döring, M. Duarte, M.C. Economou, A.N. Espirito-Santo, D. Fabiao, A. Faria, C. Fernandes, R. Fernández, J.A. Ferreira, M.T. Ferreirinha, J.C. Freitas, C. y Frochot, B. (2008). *Áreas de ribera sostenibles*. Una guía para su gestión. Generalitat Valenciana.

Arroyo, L. A., Johansen, K., Armston, J. & Phinn, S. (2010). Integration of LIDAR and QuickBird imagery for mapping riparian biophysical parameters and land cover types in Australian tropical savannas. *Forest Ecology and Management*, Vol. 259, pp. 598-606.

Johansen, K., A. Arroyo, L., Armston, J., Phinn, S. & Witte, C. (2010). Mapping riparian condition indicators in a sub-tropical savanna environment from discrete return LIDAR data using object-based imagen analysis. *Ecological Indicators*, Vol. 10, pp. 796-807.

De Gonzalo, C. (2011). *Propuesta metodológica de modelización hidrometeorológica e hidrodinámica enfocada a la ordenación del riesgo de inundación: aplicación a la cuenca del río Pejibaye (Costa Rica)*. Escuela Técnica superior de ingenieros de montes Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Madrid.

Instituto Geológico y Minero de España (IGME). (2013). *“Impacto económico y social de los riesgos geológicos en España”*. Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.

- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vazquez-Cendón, E., Dolz, J. & Coll, A. (2014). "Iber: herramientas de simulación numérica del flujo en ríos". *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, Vol 30. pp. 1-10.
- Magdaleno, F. y Martínez, R. (2014). Evaluating de quality of riparian forest vegetation: the RFV (Ri-parian Forest Evaluation) index. *Forest Systems*, Vol. 23 (2), pp. 259-272.
- Maltamo, M.; Naesset, E. y Vauhkonen, J. (2014). *Forestry Applications of Airborne Laser Scanning: Concepts and Case Studies*. Springer, London, 464 pp.
- Confederación Hidrográfica del Ebro (2015). *Informe sobre las avenidas del primer trimestre de 2015 en la cuenca del Ebro*, Ministerio para la Transición Ecológica
- Ollero, A. y Sanchez, M. (2015). Las inundaciones del Ebro en febrero y marzo de 2015. *Enseñanzas de la tierra*, Vol. 3, pp. 150-151.
- RTVE. (27 de febrero de 2015). El Ebro se desborda a su paso por Tudela e inunda varias calles del casco viejo. Agencias. Recuperado de <http://www.rtve.es/noticias/20150227/ebro-se-desborda-su-paso-tudela-inunda-varias-calles-del-casco-viejo/1105785.shtml>
- Cánovas-García, F.; Alonso-Sarría, F. y Gomariz-Castillo., F. (2016). Modificación del algoritmo Random Forest para su empleo en clasificación de imágenes de teledetección. *XVII Congreso Nacional de tecnologías de Información Geográfica*. 29, 30 de junio y 1 de julio, 2016, Málaga.
- Echeverribar, I. (2016). *Estudio de soluciones para mitigar inundaciones en el tramo medio del río Ebro mediante simulación numérica*. Universidad de Zaragoza, Escuela de Ingeniería y Arquitectura, Zaragoza, Aragón.
- Borràs, J.; Delegido, J.; Pezzola, A.; Pereira, M.; Morassi, G.y Camps-Valls, G. (2017). Land use classification from Sentinel-2 imagery. *Revista de Teledetección*, Vol. 48, pp. 55-66.
- Boruel, J. (2017). *Descripción de la metodología de elaboración de los estudios de rotura de balsa para la evaluación de peligrosidad con la herramienta Iber. Desarrollo de un ejemplo completo*. Escuela Politécnica Superior de Huesca, Huesca, Aragón.
- Medina, R.F. y Ñique, C.I. (2017). Bosques aleatorios como extensión de los árboles de clasificación con los programas R y Phyton. *Interfases*, Vol. 10, pp. 165-189.
- Montealegre, A.L. (2017). *Aplicaciones forestales de los datos LiDAR-PNOA en ambiente mediterráneo: su filtrado e interpolación y el modelado de parámetros estructurales con apoyo en trabajo de campo*, Tesis Doctoral, Dpto. Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza, 200 pp.
- Olcina, J. & Díez-herrero, A. (2017). Cartografía de inundaciones en España. *Estudios Geográficos*, Vol. 282, pp. 283-315.
- McGaughey, R.J. (2018). FUSION/LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization. United States Department of Agriculture Forest Service, Pacific Northwest Research Station.
- CNIG (21 de abril de 2019). Centro Nacional de Información Geográfica. Recuperado de <https://www.cnig.es/>
- PNOA (21 de abril de 2019). Plan Nacional de Ortofotografía Aérea. Recuperado de <http://pnoa.ign.es/>
- USGS (21 de abril de 2019). Servicio Geológico de EE.UU. Recuperado de <https://www.usgs.gov/>