ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MINAS Y ENERGÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA GEOLÓGICA Y MINERA

TESIS DOCTORAL:

**SIMULACIÓN NUMÉRICA DE INUNDACIONES
FLUVIALES EN LAS OMAÑAS (LEÓN). PROPUESTA
DE MEDIDAS CORRECTORAS.**

RAQUEL MARTÍNEZ CANTÓ
Ingeniera Geóloga

Dirigida por:
ARTURO HIDALGO LÓPEZ

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE MINAS Y ENERGÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA GEOLÓGICA Y MINERA

TESIS DOCTORAL:

**SIMULACIÓN NUMÉRICA DE INUNDACIONES
FLUVIALES EN LAS OMAÑAS (LEÓN). PROPUESTA
DE MEDIDAS CORRECTORAS.**

RAQUEL MARTÍNEZ CANTÓ
Ingeniera Geóloga

Dirigida por:
ARTURO HIDALGO LÓPEZ

Año:
2019

*Dedicado a
mi familia*

Agradecimientos

Quisiera aprovechar para agradecer a varias personas la ayuda que me han prestado en la realización de esta tesis.

A Arturo Hidalgo, por el entusiasmo que mostró cuando le pedí que tutorizase mi doctorado, por su implicación y confianza, por todas las horas dedicadas, por esas charlas que hemos tenido a lo largo de estos años... Por todo, gracias.

Al personal de la Escuela de Minas y Energía (Lázaro, Pilar...), de la UPM, por todas las facilidades prestadas para que pudiese llevar a cabo mi investigación, especialmente la parte de laboratorio.

A las compañeras doctorandas (Laura, Isabel, Margarita, Natalia y Estefanía) con las que he compartido momentos de ilusión, cansancio, desesperación y felicidad y que han hecho el camino más acompañado.

A mis amigos, quienes han sido un gran apoyo constante, preocupándose y aguantando los momentos en que no tenía tiempo ni para respirar. Su apoyo y comprensión han sido un gran pilar.

Por último, a mi familia por su energía y estar dispuestos a acompañarme al campo y escucharme. En especial a Alberto, por ser el empujón que necesitaba para apuntarme al programa de doctorado, por su cariño y su apoyo constante, por inspirarme cuando ya no podía más.

Resumen

Esta tesis tiene como objeto la modelización matemática y simulación numérica de los flujos superficiales en las cuencas bajas de los ríos Luna y Omaña (provincia de León), teniendo en cuenta los datos de caudales de los últimos años. Así mismo, y a la luz de los resultados, proponer una serie de medidas para disminuir todos los riesgos asociados.

En el capítulo 1, con la idea de tener una visión general del tema, se presenta una recopilación sobre distintos enfoques del estudio y materias afines que nos ayudan a completar la información. Se incluye también la descripción de la zona geográfica donde se sitúa el estudio. Se trata de un área de poca pendiente, sobre terrenos cenozoicos, con una confluencia de dos ríos, en cuyas llanuras de inundación se encuentran distintas poblaciones, la principal es Santiago del Molinillo, y también áreas agrícolas de importancia, como los cultivos de lúpulo. Debemos tener en cuenta a la hora de realizar este tipo de investigaciones, que hay normativas estatales y autonómicas sobre el riesgo de avenidas, el libro blanco del agua, etc. que nos pueden afectar.

A continuación (en el capítulo 3) se describen las técnicas empleadas a lo largo de la realización de esta tesis. Entre esta metodología destacamos las técnicas de estudio hidrológico, climático y geológico, que sirven de base para las simulaciones. Se han recogido datos de los últimos 30 años (1984-2014) de las estaciones hidrométricas cercanas (obteniendo calados) y de las estaciones meteorológicas (recogiendo pluviometrías y temperaturas), que posteriormente se han analizado. Por su parte, para conocer más en profundidad la dinámica fluvial, nos ayudamos de la geología, estudiando distintas muestras cogidas en la zona.

En este capítulo también se recuerda la base matemática necesaria para las simulaciones, partiendo de las ecuaciones de Navier - Stokes para llegar a las ecuaciones bidimensionales de aguas someras, mediante un promedio temporal y una posterior integración vertical, y el método de resolución elegido: volúmenes finitos. Los métodos basados en volúmenes finitos son muy apropiados para la resolución de modelos dentro del ámbito de la dinámica de fluidos, dado que representan de manera muy adecuada las bases físicas de dichos problemas. De hecho, el software que se utiliza en esta tesis, el código Iber, emplea dicho método de resolución para calcular, a partir de calados puntuales, rugosidades y topografía, los calados y velocidades de la lámina de agua tanto en los cauces como en la llanura de inundación (y así poder ver los efectos de las avenidas).

El capítulo 4 expone más en profundidad el análisis del área geográfica para conocer sus características y está formado por 6 secciones distintas. En la primera sección se hace una revisión del clima de la zona, teniendo como base los datos aportados por AEMET y el Ayuntamiento de Las Omañas, entre otros, lo que proporciona un clima árido - templado con invierno frío y falta de estación seca.

En la siguiente sección se trabaja la hidrología, con un análisis de caudales de un periodo

de 30 años para establecer caudales medios y, a partir de ellos, años secos y años húmedos. Con estos datos y los apuntes de temporales y avenidas con inundaciones nos podemos hacer una mejor idea de la situación que se quiere evitar.

La tercera sección describe la caracterización de la cuenca en organismos oficiales, principalmente en el PHC, elaborado por la CHD, donde se describe como una área de riesgo potencial significativo de inundación (ARPSI). Aun así, y con la mala calidad de las aguas, la CHD no estima oportuno una gestión a corto - medio plazo del área para bajar el riesgo.

También se han analizado los cambios en la dinámica fluvial y en la actividad humana a lo largo de los años, a través de fotografías aéreas tomadas entre el 1945 y el 2004. En ellas se observa un aumento de edificaciones, redes de comunicación y terrenos agrícolas en las llanuras de inundación, a la vez que se deteriora y disminuye la dinámica fluvial, al encauzarse los ríos y reducir su sinuosidad.

En la sección quinta se realiza un análisis morfológico y geomorfológico, de tal manera que se estudia el tipo de red fluvial dando como resultado una red rectangular en cabecera que pasa a dendrítica en el curso bajo de los ríos. Además, se anota la erosión encontrada en los cauces y la excavación de las orillas en ciertos puntos, provocado por la acción hidráulica.

Por último, en este capítulo se analiza el material transportado por los ríos hasta su confluencia. Este trabajo se ha realizado en muestra de mano, donde se ha observado que los materiales depositados son groseros (con un diámetro medio de aproximadamente 5 cm), formando barras centrales y laterales, sin material fino. Estos materiales tienen una esfericidad media, que va en aumento a medida que crece la distancia a la cabecera, y son cuarcitas en su gran mayoría. Además, se han analizado en microscopio, observando una textura granoblástica, presentando minerales accesorios. Este análisis a lo largo del cauce, determina que dichas muestras transportadas provienen de la formación Barrios, aunque con los datos accesibles y al no haber ninguna gran avenida en la duración de la investigación, no es posible conocer si el transporte se ha producido en un episodio o en distintos. Esta sería una línea de trabajo futura.

El capítulo 5 describe la aplicación del software Iber para la obtención del modelo hidrodinámico. En una primera calibración del modelo se trabaja con un área pequeña, alrededor de la población de Las Omañas, donde se prueban todas las opciones y se valida si los datos introducidos son suficientes para obtener los resultados deseados. En esta aproximación se define que todas las simulaciones se realizarán en lecho del río seco y esquema numérico de Roe de primer orden para la resolución aproximada de los problemas de Riemann que aparecen en las interfases de los volúmenes de control. Se han comparado varias opciones en cada caso (lecho seco o mojado, diferentes esquemas...) y dado que los resultados obtenidos en cada caso son similares, se ha optado por las variables que ofrecen menor tiempo de computación.

Una vez está claro cómo se van a llevar a cabo las simulaciones, estas se han hecho para un caudal medio, los máximos instantáneos de los años hidrológicos 2000-2001 y 2013-2014 y el caudal máximo instantáneo registrado (uniendo el máximo de cada uno de los ríos, independientemente de en qué año se hayan producido). Se han elegido estos caudales para ver la situación más común (caudal medio) y los efectos ante grandes avenidas. Además, del año hidrológico 2013-2014 se tiene registro fotográfico de los efectos de las inundaciones, que se utilizan para validar el modelo y los resultados obtenidos numéricamente.

Los resultados de las simulaciones indican que hay puntos problemáticos por donde se genera un gran flujo de agua hacia la llanura de inundación a ambos lados de los cauces

principales. Ya en la simulación de caudal medio se pueden apreciar esos puntos, lo que lleva a pensar en unas obras de medidas preventivas estructurales. Además, se observan los tiempos de avance de la lámina de agua y su extensión a cada segundo, por lo que se puede utilizar para establecer los avisos de los sistemas de alerta, de cara a una posible evacuación. Para la validación se han comparado las alturas de agua calculadas con Iber con las alturas medidas en los puntos de las fotografías tomadas el día en cuestión por los vecinos, que concuerdan perfectamente (salvando únicamente el error posible por los métodos de medida utilizados), lo que confiere verosimilitud a las simulaciones realizadas.

En el capítulo 6, por último, se proponen una serie de medidas de defensa ante las posibles avenidas, divididas en medidas no estructurales y medidas estructurales. Las primeras se basan en los cálculos temporales de las simulaciones, los mapas de riesgo y peligrosidad y la topografía del área. Se deja claro en la sección que el municipio debe tener un plan de prevención frente al riesgo de inundación (según INUNCyL) y actualmente no dispone del mismo. Además, se proponen un sistema de alarma, la instalación de paneles informativos y una mejor gestión de los embalses, ya que en los momentos de grandes lluvias y deshielo se suma el desembalse y provoca más daños.

Como se ha especificado, en otra sección del capítulo 6 se han diseñado unas medidas estructurales para reducir las alturas de agua en la llanura de inundación gracias a diques paralelos a los cauces principales. Su diseño está adaptado a la zona y a sus características, y gracias a Iber podemos ver el efecto que tendrían para las avenidas ya simuladas, por lo que la posibilidad de variar sus medidas y características no supone un coste añadido. Es por ello que finalmente se han fijado 4 diques en el área, de un tamaño medio - corto y una altura no superior al metro, que reducen en gran medida la lámina de agua en la llanura y evitan que entre en las calles de las poblaciones. Uno de los diques está situado en el río Omaña, evitando así el corte del puente de Las Omañas. Otros tres están situados en el río Luna, evitando la inundación de Mataluenga y reduciendo el impacto sobre los terrenos agrícolas.

Con el estudio realizado podemos concluir que utilizar las técnicas matemáticas y los software adecuados es posible diseñar actuaciones para reducir los daños provocados por grandes avenidas de agua sin un alto coste.

Summary

This phd investigation's objective is mathematic modelling and numeric simulation of the surfaces flows in the loer basin of Luna and Omaña rivers (province of León, Spain), taking into account the flow in the last years. Moreover, and based on the results, propose some meassurements in order to reduce the asociated risks.

In chapter 1, with the idea to have a general view to the topic, a compilation of different study approaches is presented, that help us to complete the information. A description of geographic zone is included too. This area have less slope, above cenozoic terrains, with a rivers' confluence in which floodplains there are some villages - like Santiago del Molinillo - and important agricole areas - with hop. In this type of investigations about flood risk, the white book of water, etc. that can affected us.

To continue (in chapter 3), the techniques used throughtout the realization of this thesis are described. Between the methodology are destacable hydrological, climatical and geolo-gical study techniques, which form the basis for simulations. The data of the last 30 years (1984-2014) of the nearby hydrometric stations (to obtain depht) and meteorological stations (pluviometric and temperature) have been collected, and they have been analyzed later. On the other hand, to know more of the fluvial dynamics, we help ourselves with geology, stud-ying different samples taken in the area.

In this chapter, the mathematical basis requiered for simulations is recolled, starting form de Navier - Stokes equations to arrive at two-dimensional equations of shallow water, by means of a temporal average and a later vertical integration, and the chosen resolution method is finite volumes. Methods based on finite volumes are very appropriate for the reso-lution of models within fields of fluid dynamics, since they represent in a very adequate way physical bases of said problems. In fact, the software that is used in this thesis, Iber code, uses this resolution method to calculate - based on specific depht, roughness and topography - channels and in floodplain (in order to see floods' effects).

Chapter 4 expose deeply the geographical analysis to know bettr its characteristics and six sections formed it.

In the first section a climatic revision are done, based on the data of AEMET and the municipality of Las Omañas, among others, and in this case it is an arid - temperate climate with cold winter and no wet station.

The following section is about hydrology, with a flow rates analysis - during a period of 30 years in order to stablish flow rate medium - and to know dy and wet years. With these dates and knowledge of meteorological weather and thus we can have an image of the real situation to avoid floods.

The third section describes characterization of the basein in official organisms, in PHC principally, elaborated by CHD - Duero Hydrologic Confederacy-, where area of flood poten-

tial risk (ARPSI in Spanish) is described. With that and bad quality of water, CHD does not consider timely a court - medium term gestion to lower area risk.

Furthermore, fluvial dynamic changes and human activity have been analyzed, through areal photographs taken between 1945 and 2004. In they, an increase of buildings, communications networks and agricole terrains in floodplain are detected. These points trigger a change in fluvial dynamics for channel the rivers and reduce sinuosity.

In section five, a morphologic and geomorphologic analysis are done. With that, a network fluvial type is studied and it results a network rectangular in headboard and a dendritic one in a lower course of the rivers. Moreover, its clear a channels' erosion and a shores excavation in some points, done by hydraulic action.

For least in this chapter, we analyzed material transport for rivers to the confluence. This work has been done in hand sample, where it has been observed that the deposited materials are coarse (with a average diameter of approximately 5 cm), forming central bars and lateral, without material no. These materials have an average sphericity, which is increasing as the distance to the headland grows, and they are quartzites in its great majority. In addition, they have been analyzed under a microscope, observing a grain texture, presenting accessory minerals. This analysis to along the channel, determines that these transported samples come from Barrios training, although with the accessible data and since there is no great avenue in the duration of the investigation, it is not possible to know if the transportation has occurred in one episode or in different. This would be a line of future study.

Chapter 5 describes the application of the Iber software for obtaining the hydrodynamic model. In a first calibration of the model you work with a small area, around the population of Las Omañas, where all the options are tested and validated if the data entered are enough to obtain the desired results. In this approach it is agreed that all simulations will be carried out in the dry river bed and the first-order Roe calculation scheme. Several options have been compared in each case -dry or wet bed, different schemes...- and given that the results obtained in each case are the same, we have opted for the variables that offer the least computation time.

Once it is clear how the simulations will be carried out, these have been done for an average flow, the instantaneous maximums of the hydrological years 2000-2001 and 2013-2014 and the maximum flow rate registered instantaneous - uniting the maximum of each of the rivers, regardless of in what year they occurre). These flows have been chosen to see the most common situation (average flow) and the effects before large avenues. In addition, from the hydrological year 2013-2014 there is a photographic record of the effects of the floods, which are used to validate the model and the results obtained numerically.

The results of the simulations indicate that there are problem points where a large flow of water is generated towards the floodplain on both sides of the main channels. Already in the simulation of average flow you can see these points, which leads to think about some works of structural preventive measures. In addition, the advance times of the water sheet and its extension are observed every second, so it can be used to establish the warnings of the warning systems, facing a possible evacuation. For the validation, the water heights calculated with Iber were compared with the heights measured at the points of the photographs taken on the day in question by the neighbors, which agree perfectly (saving only the possible error by the measurement methods used), which gives verisimilitude to the simulations carried out.

In chapter 6, finally, a series of defense measures are proposed in the face of possible avenues, divided into non-structural measures and structural measures. The first ones are

based on the temporal calculations of the simulations, the risk and hazard maps and the topography of the area. It is made clear in the section that the municipality must have a prevention plan against flood risk (according to INUNCyL) and currently does not have it. In addition, an alarm system, the installation of information panels and a better management of the reservoirs are proposed, since in the moments of great rains and thaw, the disbanding is added and causes more damage.

As specified, in another section of chapter 6, structural measures have been designed to reduce the water heights in the lowland plain. flood thanks to levees parallel to the main channels. Its design is adapted to the area and its characteristics, and thanks to Iber we can see the effect they would have for simulated avenues, so the possibility of varying its measurements and characteristics does not imply an added cost. It is for this reason that 4 dams have been cut in the area, of a medium - short size and a height not exceeding one meter, which greatly reduce the water sheet in the plain and prevent it from entering. in the streets of the towns. One of the dams is located on the Omaña river, thus avoiding the cutting of the Las Omañas bridge. Three more are located on the Luna River, avoiding the flood of Mataluenga and reducing the impact on agricultural land.

With the study carried out we can conclude that using the mathematical techniques and the appropriate software it is possible to design actions to reduce the damages caused by large avenues of water without a high cost.

Índice general

Agradecimientos	III
Resumen	V
Summary	IX
Lista de figuras	XV
Lista de tablas	XIX
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Introducción	1
1.2. Localización de la zona de estudio	3
1.2.1. Marco geológico	4
1.3. Marco legal	6
1.4. Estudio bibliográfico.	8
2. OBJETIVOS	11
3. METODOLOGÍA	13
3.1. Datos climáticos e hidrológicos	13
3.2. Datos geológicos	16
3.3. Métodos numéricos	19
3.4. Iber/arcgis	20
4. Análisis hidrogeomorfológico	23
4.1. Análisis climático e hidrográfico	23
4.2. Estudio hidrológico	27
4.3. Caracterización de la cuenca en organismos oficiales	28
4.4. Análisis de fotogrametría	29
4.5. Análisis geomorfológico	31
4.5.1. Análisis morfométrico	31
4.5.2. Análisis geomorfológico.	32
4.6. Análisis petrológico del material transportado.	33
5. ESTUDIO HIDRÁULICO	39
5.1. Simulación numérica	39
5.1.1. Calibración del modelo	39
5.1.2. Simulaciones y resultados	40

5.2.	Análisis de los resultados	43
5.2.1.	Caudal medio	43
5.2.2.	Caudal máximo instantáneo año hidrológico 2000-2001	44
5.2.3.	Caudal máximo instantáneo año hidrológico 2013-2014	45
5.2.4.	Caudal máximo instantáneo registrado	46
6.	PROPUESTA DE MEDIDAS DE DEFENSA	49
6.1.	Medidas no estructurales	50
6.1.1.	Cartografía de riesgos	50
6.1.2.	Ordenación territorial	51
6.1.3.	Predicción y control de inundaciones y sistemas de alerta temprana .	53
6.1.4.	Plan de emergencias	54
6.1.5.	Comunicación	55
6.2.	Medidas estructurales	56
7.	CONCLUSIONES	59

Índice de figuras

1.1. Número de fallecidos en España por riesgos naturales, en el periodo 1990-2010. Extraído de [8].	1
1.2. Número de fallecidos en España por inundaciones, en el periodo 1990-2010. Extraído de [8].	2
1.3. Muestra de las plantaciones de lúpulo en la ribera del río Órbigo, 10 km aguas abajo de la confluencia de los ríos Omaña y Luna.	3
1.4. Situación de la zona de estudio.	3
1.5. Terreno privado con vacas en Mataluenga, a orillas del río Luna.	4
1.6. Mapa geológico del área de estudio, donde se observan los periodos geológicos representados en la zona y la tectónica.	5
1.7. Mapa geológico del área de estudio, donde se observan las litologías presentes en la zona y la tectónica.	6
3.1. Material de laboratorio para el análisis microscópico.	18
3.2. Datos de rugosidad asignada mediante coeficiente de Manning.	21
4.1. Imagen satélite donde se observa la localización de las estaciones consultadas y el área de estudio (marcada en amarillo).	25
4.2. Tipos de masas de agua superficial en la cuenca del Duero [?].	26
4.3. Mapa de riesgo de inundaciones, donde se muestra el ARPSI que contiene el área de estudio. Modificado de [?].	29
4.4. Zona de estudio en la ortofoto de 1945-1946. [59]	29
4.5. Zona de estudio en la ortofoto de 1956-1957.	29
4.6. Zona de estudio en la ortofoto de 1973-1986 [59]	30
4.7. Zona de estudio en la ortofoto de 2014 [59].	30
4.8. Recorte del mapa nº 7 del Plan Hidrológico (extraído de [59]). El mapa completo se puede consultar en Anexos.	31
4.9. Imagen tomada en la parada 1, donde se aprecia el tamaño de los cantos del lecho fluvial y de la barra central.	33
4.10. Imagen tomada en la parada 2, donde se aprecia el tamaño de los cantos del lecho fluvial y de la barra central con el martillo geológico como escala.	33
4.11. Situación de las paradas donde se han realizado los muestreos.	33

4.12. A) Muestras seleccionadas para estudiar al microscopio. B) Rompiendo cantos de la parada 1 del río Luna para estudiarlas. C) Fotografía tomada en la parada 2 (río Luna) para ver los tamaños de los cantos depositados en el lateral. D) Muestras de mano recogidas en distintos puntos, donde se observan en corte fresco.	34
4.13. A,B) Muestra 2 de la parada 1, vista al microscopio óptico en nícoles cruzados(A) y nícoles paralelos(B), con una ampliación de 20x, donde se aprecia la microclina. C) Muestra 4 de la parada 4, vista al microscopio óptico en nícoles cruzados, con una ampliación de 5x, donde se aprecia la diferencia de tamaños entre la vena de cuarzo y el resto de muestra. D) Muestra 3 tomada en el margen del río, vista al microscopio óptico en nícoles cruzados, con una ampliación de 2.5x, donde se pueden ver los clastos del conglomerado. Figura extraída de Martínez-Cantó e Hidalgo, 2017b	34
4.14. A) Muestra 4 de la parada 1, vista al microscopio óptico en nícoles cruzados, con una ampliación de 5x, con evidencias de recristalización (bordes irregulares entre cristales, con ángulos de 120°). B,D) Muestra P1-M2a, en nícoles cruzados (B) y paralelos (D), con ampliación de 5x, donde se ve gran cantidad de minerales secundarios. C) Muestra C-M2, con cuarzo subeuhedral y anhedral y extinción ondulosa, en nícoles cruzados y 5x. Figura extraída de Martínez-Cantó e Hidalgo, 2017b.	35
4.15. Muestra P1 - M1, en nícoles cruzados (A) y nícoles paralelos (B,C, D y E) cada 90°. Se puede observar turmalina en el centro.	36
4.16. Mapa indicativo del área de estudio (en amarillo) y el contacto sur del miembro La Matosa (previsiblemente, área fuente de las cuarzoarenitas).	37
5.1. Área de estudio utilizada para calibración del modelo. Las Omañas. Se representa el calado calculado, siendo el máximo alcanzado 3,DH108 m.	39
5.2. Fotografías tomadas el 2 de abril de 2014 y localización de las mismas. . . .	40
5.3. Localización de los puntos de control y resultados numéricos obtenidos. . . .	40
5.4. Datos de rugosidad mediante coeficiente de Manning.	41
5.5. Extracto del mapa de cultivos y aprovechamientos 2000-2010, consultado en el visor SIG del MAGRAMA.	42
5.6. Simulación con los datos medios. Se representa el calado en el paso 3600s de la simulación.	42
5.7. Simulación con los datos del año hidrológico 2000-2001. Se representa el calado en el paso 3600s de la simulación.	42
5.8. Simulación con los datos del año hidrológico 2013-2014. Se representa el calado en el paso 3600 s de la simulación.	43
5.9. Simulación con los datos del año hidrológico 2013-2014, con un área de 18 km ² . Se representa el calado en el paso 14400 s de la simulación.	43
5.10. Simulación con los datos del año hidrológico 2013-2014. Se representa la velocidad en el paso 3600 s de la simulación.	43
5.11. Simulación con los datos del año hidrológico 2013-2014. Se representa el caudal específico en el paso 3600 s de la simulación.	44
5.12. Simulación con los datos máximos registrados de caudal instantáneo en las cuencas. Se representa el calado en el paso 3600 s de la simulación.	44

5.13. Simulación con los datos máximos registrados de caudal instantáneo en las cuencas. Se representa la velocidad en el paso 3600 s de la simulación.	44
5.14. Simulación con los datos máximos registrados de caudal instantáneo en las cuencas. Se representa el caudal específico en el paso 3600 s de la simulación.	45
5.15. Simulación con los datos del año hidrológico 2013-2014 calculado según el método de Roe de 2º orden.	45
5.16. Simulación con los datos del año hidrológico 2013-2014 calculado según el método DHD o hidrológico.	45
5.17. Fotografías tomadas por los vecinos durante el episodio del 2 de abril de 2014 en Santiago del Molinillo.	46
5.18. Fotografías tomadas por los vecinos durante el 2 de abril de 2014 en Santiago del Molinillo.	46
5.19. Situación de las fotografías tomadas por los vecinos durante el 2 de abril de 2014 en Santiago del Molinillo.	46
6.1. Extracto del mapa de riesgos elaborado por la Confederación Hidrográfica del Duero, con zoom en la zona de estudio.	50
6.2. Mapa con localización de las ARPSI del área estudiada, elaborado por la CH Duero.	51
6.3. Mapa de peligrosidad del área de estudio, basándonos en el Real Decreto 9/2008.	51
6.4. Croquis que describe el escenario en el que nos encontramos (elaborado siguiendo las directrices de INUNCyL). En rojo se señalan edificios principales, en azul los ríos y cauces secundarios, en negro las principales vías de comunicación y en un polígono azul se incluye el área de inundación.	52
6.5. Mapa del sistema meteoalerta donde se observa el riesgo que afecta a Castilla y León a fecha 26 de diciembre de 2017 (afectada por el temporal Bruno), publicado en la red social Twitter.	53
6.6. Explicación del riesgo existente en la provincia de León a fecha 26 de diciembre de 2017 (afectada por el temporal Bruno).	54
6.7. Visor de información de la red SAIH-A enlazado a la web de la Confederación Hidrográfica del Duero a fecha 26 de diciembre de 2017 (afectada por el temporal Bruno)	54
6.8. Panel en las calles de Pamplona para evitar daños por inundaciones en un aparcamiento (extraído de Pamplonaactual.com, noticia del 6 de febrero de 2014.	55
6.9. Ejemplo de panel explicativo para colocar en las poblaciones afectadas, para conocimiento de los vecinos y visitantes (elaboración propia).	55
6.10. Diseño de uno de los diques en la malla, datos del mismo, y se indica traza en amarillo.	56
6.11. Simulación con el diseño de tres diques, uno en la parte superior del área y otros dos aguas abajo. La simulación está realizada con los caudales máximos registrados el año hidrológico 2013-2014.	56

6.12. Resultados de la simulación del dique en el margen derecho del río, junto a Villarroquel. En la zona superior izquierda, se aprecia una disminución del caudal circulante gracias al dique diseñado. También se puede apreciar el dique diseñado en el margen izquierdo, a la altura de Mataluenga, en pro de controlar la avenida, aunque no se obtienen resultados característicos debido a las pérdidas.	57
6.13. Salida de la canalización al río, detalle de las compuertas.	57
6.14. Resultados de la simulación en el río Omaña con diques que contienen el agua. Las flechas blancas muestran la localización de los diques.	57

Índice de cuadros

1.1. Distribución de las cuantías pagadas y costes medios por año de los daños causados por inundaciones en toda España, expresados en pesetas. A partir de 2004 se observa un incremento porque se incluyen los datos por vientos extraordinarios. Extraído de [8].	2
4.1. Serie con los datos de temperatura medios, máximos y mínimos mensuales, calculados para la serie de los últimos 30 años (1984-2014) en la provincia de León.	24
4.2. Serie anual con los datos de pluviometría medios mensuales y anuales, calculados para la serie de los últimos 30 años (1984-2014) según los datos facilitados por AEMET. En esta tabla se puede ver que siguen las mismas tendencias en ambas estaciones de medición.	25
4.3. Caudal máximo (m^3/s) registrado en las diferentes estaciones de aforo en los últimos años hidrológicos (datos extraídos de MAGRAMA). En rojo se señala el año seco y en azul el año húmedo. Imagen extraída de [60]	27
4.4. Registro de inundaciones ocurridas en los ríos que conforman la zona de estudio. Modificado de [69].	27
4.5. Números de canales según el orden de Strahler y la relación de bifurcación en las subcuencas de los ríos Luna y Omaña.	31
4.6. Tabla comparativa de los resultados obtenidos en análisis macroscópico de las muestras.	35
5.1. Tabla de validación de los resultados numéricos, donde se observa una diferencia mínima causada por la precisión distinta entre los métodos de trabajo.	41
5.2. Datos de rugosidad impuestos en el software para todas las simulaciones. Estos datos se extraen de la cartografía disponible en abierto por la Junta de Castilla y León y los propios valores de Iber respecto a cada uso del suelo.	41
5.3. Comparativa de los resultados numéricos obtenidos en Iber y en campo de las inundaciones sufridas en Santiago del Molinillo, abril 2014.	47

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

Las inundaciones responden a la ocupación de agua de zonas que habitualmente se encuentran secas y son “fenómenos naturales que no pueden evitarse” (Directiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2007, relativa a la evaluación y gestión de los riesgos de inundación). Cabe destacar la existencia de diferentes tipos de inundaciones [8]: naturales o artificiales, terrestres o costeras e “in situ” o por escorrentía, avenida o desbordamiento. El presente trabajo se enfoca en las inundaciones naturales, terrestres y provocadas por avenidas, en los márgenes de dos ríos.

Las inundaciones fluviales se producen cuando el caudal que lleva el río es excesivo para su cauce, provocando su desbordamiento. Este desbordamiento sucede cuando se producen lluvias torrenciales o debido a procesos de deshielo, o la combinación de ambos, por ejemplo. También se puede producir por una mala gestión o rotura de presas situadas aguas arriba de la zona del río a estudiar u otras infraestructuras hidráulicas. Otra causa de inundaciones es la obstrucción de cauces naturales o artificiales, así como la invasión de los mismos por vegetación y/o grandes cantidades de sedimentos que causan aterramientos.

Según el Real Decreto 903/2010, de 9 de julio, de evaluación y gestión de riesgos de inundación, “las inundaciones en España constituyen el riesgo natural que a lo largo del tiempo ha producido los mayores daños tanto materiales como en pérdidas de vida humanas”. El número de desastres naturales no ha aumentado en los últimos años, aunque el número de personas afectadas es cada vez mayor debido al crecimiento de la misma [8], [47]. El riesgo, por tanto, se ha ido incrementando estos años, relacionado con el aumento de la vulnerabilidad por el número de personas afectadas. Es cierto que en España no se producen estas catástrofes al nivel que sufren otros países, sin embargo, estos sucesos cada año contabilizan un variado número de afectados e, incluso, víctimas mortales (ver figuras 1.1 y 1.2).

En España hay casi 1400 puntos conflictivos que sufren periódicamente inundaciones importantes según fuentes de Protección Civil. Además, según el Consorcio de Compensación de Seguros y el Instituto Geológico y Minero de España, los daños por inundaciones se estiman en total en una media de 800 millones de euros anuales (ver tabla 1.1). Estas situaciones presentan gran interés desde el punto de vista ambiental, por el riesgo para el medio ambiente que suponen las inundaciones, y también económico, pues estos fenómenos provocan serias pérdidas económicas a las poblaciones afectadas.

Por todos los daños personales y económicos debidos a inundaciones, debemos tener

Año	Cuantías pagadas	Costes medios
1990	0	0
1991	0	0
1992	2.605.827	2.883
1993	0	0
1994	0	0
1995	0	0
1996	0	0
1997	2.769.729	2.978
1998	0	0
1999	1.904.120	95.206
2000	0	0
2001	31.968.992	4.639
2002	0	0
2003	15.307.696	3.998
2004	18.658.598	3.012
2005	84.198.960	5.256
2006	14.740.782	4.431
2007	49.582.689	4.898
2008	13.575.019	4.121
2009	497.518.803	1.849
2010	97.830.734	1.137

Tabla 1.1: Distribución de las cuantías pagadas y costes medios por año de los daños causados por inundaciones en toda España, expresados en pesetas. A partir de 2004 se observa un incremento porque se incluyen los datos por vientos extraordinarios. Extraído de [8].

1.1. INTRODUCCIÓN

Figura 1.1: Número de fallecidos en España por riesgos naturales, en el periodo 1990-2010. Extraído de [8].

muy presentes las tareas a realizar en materia de inundaciones definidas en la Directiva 2007/60/CE y el Real Decreto 903/2010 por los organismos pertinentes:

- Evaluación preliminar del riesgo de inundación (EPRI) e identificación de las áreas de riesgo potencial significativo de inundación (ARPSI).
- Realización de mapas de peligrosidad y mapas de riesgo de inundación.
- Redacción de planes de gestión del riesgo de inundación.

No debemos dejar que nos afecte la pérdida de memoria histórica con respecto a las inundaciones, para evitar que sigan sufriendo inundaciones zonas que previamente las habían sufrido ya. Al respecto, está el análisis de la dinámica fluvial y el conocimiento de alturas de agua y de su velocidad, que es esencial para determinar los caudales de desbordamiento y poder implementar medidas preventivas de las inundaciones [60]. Por otra parte, la incorporación de técnicas cartográficas y el apoyo de sistemas de información geográfica permiten establecer de una forma más adecuada las acciones de recuperación de los terrenos afectados [61].

La predicción de la evolución espacio-temporal de las alturas y velocidades, y con ello de caudales, del agua del río se puede realizar con ayuda de modelos matemáticos que normalmente se resuelven mediante herramientas y técnicas de simulación numérica [65]. Los modelos matemáticos constituyen una forma de representar la realidad, por lo que se puede reproducir con ellos situaciones realistas sin esperar a que éstas se produzcan en el mundo real, en otras palabras, un adecuado conocimiento de las características geomorfológicas del terreno y de la morfometría fluvial ofrece la posibilidad de representar, mediante un modelo, tanto la dinámica normal del río como “provocar” su desbordamiento y, por lo tanto, la inundación [63].

La complicación de estos modelos matemáticos no hace posible la obtención de solución exacta que describa dicha dinámica por lo que la aplicación de métodos numéricos se hace

Figura 1.2: Número de fallecidos en España por inundaciones, en el periodo 1990-2010. Extraído de [8].

fundamental para obtener una solución aproximada que se ajuste a la realidad. La simulación numérica de la inundación es el objetivo principal de este tratamiento del modelo [20].

Para llevar a cabo estos modelos matemáticos y obtener las medidas que simulen los efectos de las inundaciones se resuelven las ecuaciones de Saint Venant (o de aguas someras) según distintos métodos numéricos, como se puede ver en trabajos como los de [17], [87], [40], [22], [23] o [15].

Este área de estudio se ha elegido también por ser representativa de una casuística poco estudiada: la confluencia de dos ríos de montaña con fuerte cambio de pendiente en su tramo final y vegetación muy concreta (lúpulo, ver figura 1.3), que tiene gran influencia del deshielo causando desbordamientos que afectan a las poblaciones cercanas. Podemos mencionar algunos ejemplos como la región de Bavaria, en Alemania, cerca de la ciudad de Hallertau, o la región de Rakovnik, en Chequia, ambas con plantaciones de lúpulo y una configuración geomorfológica muy similar a la nuestra. Además, hay ejemplos de confluencias con inundaciones severas en Nauta (Perú), Francisco de Orellana (Ecuador) o Ghirano (Italia). En este último caso, durante el periodo 2002-2007, se construyó un dique para solventar, parcialmente, el problema.

1.2. Localización de la zona de estudio

Para llevar a cabo esta tesis doctoral es imprescindible delimitar un área geográfica y un marco geológico. La elección del área de estudio vino determinada por la cercanía y conocimiento personal del territorio.

El área de estudio se incluye en la demarcación hidrográfica internacional del Duero, que es la más extensa de la península Ibérica con 98103 km^2 . Es un territorio compartido entre Portugal (19.6 %) y España (80.4 %), en la que cubre unos 78888.85 km^2 . La zona que nos ocupa pertenece al espacio denominado Galaico - Leonés, donde los ríos nacen en el macizo

1.2. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Figura 1.3: Muestra de las plantaciones de lúpulo en la ribera del río Órbigo, 10 km aguas abajo de la confluencia de los ríos Omaña y Luna.

hercínico y desembocan en grandes afluentes del Duero.

La cuenca del Duero ofrece una orografía esencialmente llana, bordeada por cadenas montañosas periféricas excavadas por cicatrices fluviales. Entre estas cadenas destacan los Montes de León, la Cordillera Cantábrica, Pirineos occidentales, Sistema Ibérico y Sistema Central. En el centro de estas montañas se extiende la llanura central, que corresponde a la meseta norte. La mayoría de ríos, por su parte, tienen origen en las montañas comentadas y bajan al eje principal del río Duero, que divide la llanura en dos márgenes bien diferenciadas. Nuestra área de estudio se sitúa en la margen derecha, que cuenta con la subcuenca del río Esla, recogiendo las aportaciones en abanico de las subcuencas Porma - Curueño, Bernesga - Torío, Cea, Tera y Órbigo (donde se enclava la zona que nos ocupa). La cabecera del Órbigo está formada por los ríos Omaña y Luna, cuya confluencia da origen al río Órbigo propiamente dicho, tal y como indica la Confederación Hidrográfica del Duero (Plan Hidrológico de Cuenca, en adelante PHC, de 2015).

Este estudio se ha llevado a cabo en la zona concreta de Santiago del Molinillo, población del noroeste de León, en el municipio de Las Omañas (ver figura 1.4), en cuyas cercanías se unen el río Luna, que tiene una dirección N-S, y el río Omaña, cuya dirección es NO-SE, para formar el río Órbigo, a 900 msnm. Es en los alrededores de esta confluencia donde todos los años se producen, según los habitantes de la zona y los medios de información autonómicos, inundaciones que cortan vías de tráfico, dificultan seriamente la circulación, dañan el estado

Figura 1.4: Situación de la zona de estudio.

de las edificaciones y provocan grandes pérdidas a los agricultores. Debemos tener en cuenta que la población de los municipios cercanos son, en su mayoría, agricultores y ganaderos (figura 1.5).

Los ríos Omaña y Luna son ríos de cabecera, es decir, ríos montañosos con gran cantidad de afluentes pequeños y de caudal intermitente. Tienen un comportamiento nivopluvial en su cabecera, que pasa a ser pluvonival cuando forman el río Órbigo [69], ya que están muy regulados por la nieve y las precipitaciones de alta montaña. Ambos ríos nacen a la altura aproximada de 1200 msnm. Esto provoca grandes cambios en el caudal según la estacionalidad de los meses de nieve y deshielo frente a los meses de estío.

El río Luna atraviesa estrechos valles excavados en materiales paleozoicos, formando una red propia de un sistema de montaña, que discurre aprovechando la disposición de fallas, pizarras y esquistos [58]. También el río Omaña sufre un camino similar, ya que las litologías que atraviesa son las mismas que el río Luna. Sin embargo, el río Órbigo recorre 108 km

1.2. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Figura 1.5: Terreno privado con vacas en Mataluenga, a orillas del río Luna.

por una topografía llana, atravesando materiales blandos (margas, arcillas) que favorecen el desarrollo de valles muy amplios, con fondo plano y suaves. Esto evidencia la existencia de fuertes desniveles entre montañas y llanuras.

Cabe destacar que el río Luna está regulado aguas arriba por el embalse de Barrios de Luna y el contraembalse de Selga de Ordás. El primero de ellos está controlado por la Confederación Hidrográfica del Duero (en adelante CHD), mientras que el segundo lo está por la Junta Vecinal y la Comunidad de Regantes.

El embalse de Barrios de Luna, construido en 1956, sufre un vaciado considerable en época estival por el aprovechamiento de sus aguas para el regadío del Páramo y el consumo humano. Tiene una capacidad de 308 hm^3 y una extensión de 1122 hectáreas.

Pasadas las compuerta del embalse de Barrios de Luna, el río se dirige al contraembalse de Selga, construido en 1961 y situado 19 km aguas abajo del primero. Se construyó para proporcionar agua para el riego y el abastecimiento. Además, cuenta con una pequeña central hidroeléctrica a pie de presa.

En ambos embalses se puede observar una gran variedad de fauna, tanto de aves acuáticas en periodo invernal (ánade azulón, focha, garzas reales, cigüeñas...) como de peces (barbo, trucha, bordallo...). Este hecho da un valor ecológico alto a la zona.

La región en la que se incluye el área de estudio de esta tesis, constituye el 90 % de la plantación de lúpulo de España [64]. De ahí la importancia de estudiar y regular estas avenidas, en la medida de lo posible, con el fin de evitar los daños agrícolas y personales ocasionados.

1.2.1. Marco geológico

Como se ha dicho anteriormente, los ríos Luna y Omaña discurren por la vertiente sur de la Cordillera Cantábrica. La zona de estudio se enmarca en la zona de contacto de estos materiales con la cobertera mesozoica - cenozoica de la cuenca del Duero [56]. En este entorno es posible reconocer rocas de edades comprendidas entre el Precámbrico y la actualidad, destacando los materiales precámbricos, paleozoicos y cenozoicos [4].

La zona norte, de cabecera, se sitúa en el suroeste de la zona cantábrica, al este del anti-forme del Narcea, dentro de la Unidad de Correcilla de la Región de Pliegues y Mantos [88]. Las rocas paleozoicas están afectadas por pliegues con orientación oeste-este y por cabalgamientos vergentes al norte. Concretamente, el embalse de Barrios de Luna está enclavado entre las diversas formaciones del flanco suroeste del Sinclinal de Alba, con edades entre el Precámbrico y el Devónico más alto. Destacan las formaciones Herrería, Láncara, Oville y Barrios, siendo éstas de distinta composición y comportamiento. A continuación se exponen las características principales de estas formaciones (ver figuras 1.6 y 1.7).

Figura 1.6: Mapa geológico del área de estudio, donde se observan los periodos geológicos representados en la zona y la tectónica.

La *formación Mora*, formada por rocas del Precámbrico, las más antiguas de la serie, está constituida por lutitas y limolitas con fina laminación de areniscas de grano fino y microconglomerados con cuarzo, feldespatos, fragmentos de roca y micas. La proporción de areniscas / lutita es siempre muy baja, tratándose en su mayoría de afloramientos de turbiditas de tipo distal.

La *formación Herrería* se formó en el Cámbrico Inferior y está constituida por rocas silíceas como areniscas y lutitas que se alternan entre sí, depositadas en un mar somero donde los ríos aportaban grandes cantidades de sedimentos [1]. Entre las areniscas encontramos las dendritas de pirolusita, y las lutitas presentan tonalidades pardas, verdosas y rojizas.

La *formación Láncara* está constituida por rocas de naturaleza carbonatada, depositadas en un mar cálido, poco profundo y tranquilo. Está dividida en tres tramos por su coloración

1.2. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

y composición: un primer tramo formado por dolomías de color amarillento, un segundo tramo con rocas calizas de color gris claro, y un tercer tramo constituido por calizas rojas de aspecto irregular, llamadas calizas *griotte* [85].

La *formación Oville* son areniscas y lutitas depositadas en el fondo marino del Cámbrico Medio. En ella son abundantes los fósiles de trilobites, encontrando caparazones completos o fragmentados, recubiertos de limonita. Esta zona es localidad - tipo de algunas especies de estos fósiles, es decir, es una zona donde se han descrito por primera vez algunas especies. La formación toma un color pardo - verdoso tanto en corte fresco como en superficie [82].

La *formación Barrios* está formada por cuarcitas, rocas constituidas en su mayoría por cuarzo. La edad de esta formación está fechada entre el Cámbrico Superior y el Ordovícico Inferior [6]. Cabe señalar que entre las cuarcitas se halla una capa de caolín, de apenas 30 centímetros de espesor.

La *formación Formigoso* está formada por lutitas de color negro y se originó durante la primera mitad del Silúrico, al depositarse los materiales en un fondo marino pobre en oxígeno. Este hecho provocó que se ralentizara la descomposición de la materia orgánica, que se acumulaba y daba esos tonos a las rocas [55].

Figura 1.7: Mapa geológico del área de estudio, donde se observan las litologías presentes en la zona y la tectónica.

El río Luna también atraviesa la *formación Cuevas*, unas areniscas con intercalaciones de pequeñas capas de carbón, correspondiente al Carbonífero Superior. En estas capas de

carbón, que forman las cuencas mineras, se han situado a lo largo de los años las empresas extractivas (cuenca de La Magdalena y Valdesamario, en Ordás).

Los materiales del Cenozoico en esta zona están representados por el *complejo de Vegaquemada* (Eoceno). Estos materiales están divididos en dos tramos, el inferior o facies Garum tiene un carácter más arcilloso mientras que el superior está formado por una potente sucesión de conglomerados [24].

En el margen derecho del río Luna, hacia el este, se extiende el llamado abanico de la Robla. Se trata de unos materiales en contacto lateral con el complejo Vegaquemada, formados por un abanico silíceo con una alta pendiente, es decir, conglomerados con clastos silíceos provenientes de los relieves paleozoicos situados al NO de dicho margen.

En el curso del río Omaña encontramos, además, las facies neógenas de las Omañas - Villarroquel, formadas por conglomerados silíceos que lateralmente van pasando a otras facies como las de Cimanés, constituidas por arenas finas y arcillas [86].

1.3. Marco legal

Cada vez está más presente en la sociedad la problemática de las inundaciones provocadas por el desbordamientos de ríos y eso se hace patente en la ordenación jurídica, que contiene varias leyes sobre la protección, planificación, demarcaciones, evaluación del riesgo, etc.

A continuación pasamos a describir la situación legislativa en la que se encuentra la cuestión de estudio actualmente. Para ello, se hace una revisión de las principales leyes, decretos y directivas, en vigor.

- Ley 2/1985, de 21 de enero, sobre Protección Civil.
- Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, que desarrolla los títulos preliminar, I, IV, V, VI, VII y VIII de la Ley 29/1985, de 2 de agosto, de Aguas.
- Real Decreto 927/1988, de 29 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de la Administración Pública del Agua y de la Planificación Hidrológica, en desarrollo de los títulos II y III de la Ley de Aguas.
- Real Decreto 407/1992, de 24 de abril, Norma Básica de Protección Civil.
- Consejo de Ministros, 9 de diciembre de 1994, Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones.
- Convenio sobre cooperación para la protección y el aprovechamiento sostenible de las aguas de las cuencas hidrográficas hispano-portuguesas, hecho ad referendum en Albufeira el 30 de noviembre de 1998.
- Directiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre de 2000, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas, conocida como la Directiva Marco del Agua.
- Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional.

1.3. MARCO LEGAL

- Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por el que se aprueba el Texto Refundido de la Ley de Aguas.
- Ley 62/2003, de 30 de diciembre, de medidas fiscales, administrativas y del orden social que incluye, en su artículo 129, la modificación del texto refundido de la Ley de Aguas, aprobado por Real Decreto Legislativo 1/2001, de 20 de julio, por la que se incorpora al derecho español la Directiva 2000/60/CEE, por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas.
- Ley 27/2006, de 18 de julio, por la que se regulan los derechos de acceso a la información, de participación pública y de acceso a la justicia en materia de medio ambiente (incorpora las Directivas 2003/4/CE y 2003/35/CE).
- Directiva 2006/118/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 12 de diciembre de 2006, relativa a la protección de las aguas subterráneas contra la contaminación y el deterioro.
- Real Decreto 125/2007, de 2 de febrero, por el que se fija el ámbito territorial de las demarcaciones hidrográficas.
- Real Decreto 126/2007, de 2 de febrero, por el que se regulan la composición, funcionamiento y atribuciones de los Comités de Autoridades Competentes de las demarcaciones hidrográficas con cuencas intercomunitarias, así como de la parte española de las demarcaciones hidrográficas compartidas con otros países.
- Real Decreto 907/2007, de 6 de julio, por el que se aprueba el Reglamento de la Planificación Hidrológica (Reglamento de la Planificación Hidrológica).
- Directiva 2007/60/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de octubre, relativa a la Evaluación y Gestión de los Riesgos de Inundación.
- Real Decreto 60/2011, de 21 de enero, sobre las normas de calidad ambiental en el ámbito de la política de aguas.
- Instrucción de la planificación hidrológica, Orden ARM/2656/2008, de 10 de septiembre, por la que se aprueba la instrucción de planificación hidrológica, y Orden ARM/1195/2011, de 11 de mayo por la que se modifica la anterior.
- Real Decreto 1364/2011, de 7 de octubre, por el que se establece la composición, estructura y funcionamiento del Consejo del agua de la demarcación de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Duero.
- Directiva 2013/39/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 12 de agosto de 2013, por la que se modifican las Directivas 2000/60/CE y 2008/105/CE en cuanto a las sustancias prioritarias en el ámbito de la política de aguas.
- Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental, que incorpora al ordenamiento jurídico español la Directiva 2001/42/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de junio de 2001, relativa a la evaluación de los efectos de determinados planes y programas en el medioambiente.

- Orden AAA/1760/2016, de 28 de octubre, por la que se regula la estructura informática del Registro de Aguas y de la Base Central del Agua.
- Real Decreto 638/2016, de 9 de diciembre, por el que se modifica el Reglamento del Dominio Público Hidráulico aprobado por el Real Decreto 849/1986, de 11 de abril, el Reglamento de Planificación Hidrológica, aprobado por el Real Decreto 907/2007, de 6 de julio, y otros reglamentos en materia de gestión de riesgos de inundación, caudales ecológicos, reservas hidrológicas y vertidos de aguas residuales.

1.4. Estudio bibliográfico.

La dinámica de los ríos y las inundaciones fluviales han sido estudiadas desde hace años. Estos estudios comprenden desde clasificaciones geomorfológicas y morfométricas, pasando por estudios del riesgo y vulnerabilidad y simulaciones con distinto software, hasta medidas preventivas. A continuación, se realiza una revisión y un pequeño análisis de dichas referencias para que sirvan de punto de partida y de marco para el trabajo que se llevará a cabo.

El estudio de las **formas geomorfológicas** relacionadas con los ríos ha sido tratado por distintos autores a lo largo de los años. Cabe destacar entre las metodologías seguidas, el uso de la fotografía aérea [66] o incluso de imágenes satélite para áreas grandes pero con menor amplitud temporal [3]. En otro orden de fotografías, [29] utiliza fotografía en superficie, elaboradas a 2m de altitud a escala 1:10, y la fotografía remota desde un globo, a una distancia de 10 m y escala 1:45, para comparar los resultados de clasificación granulométrica con los tomados directamente con retícula, quedando estos correctos al 95 %.

Además, el estudio de las características morfométricas es de especial interés para conocer la dinámica del río, como en los trabajos de [51], [52], [50]. Como antecedentes claros en lo que respecta al estudio en profundidad de los materiales depositados por el río y sus formas, tenemos las investigaciones de [41] y [78]. En ambas se presentan diversas metodologías para el muestreo en campo: con pala excavadora o superficial.

El estudio de las **inundaciones** se ha abordado desde distintas perspectivas. Por un lado, destacan los trabajos sobre la cartografía de riesgos y su relación con la ordenación del territorio [73], [67], [72]. Por otro lado, hay trabajos sobre la vulnerabilidad frente a episodios de desastres naturales en general [79], [12]. Por último destaca un grupo de trabajos sobre las inundaciones en Castilla y León, tanto estudios en general [69] como las investigaciones sobre episodios en concreto [75].

En los últimos años se han publicado muchos trabajos sobre **softwares** utilizados para la simulación de inundaciones, sus efectos, el transporte de sedimentos y otras variables que afectan a la distribución del agua en las llanuras de inundación. Algunos de estos trabajos son comparaciones entre distintos programas, como el de [57] entre Hec-Ras y FESWMS-2DH y el de [80] entre Hec-Ras e Iber. Otros utilizan un programa en concreto para modelizar distintos episodios de llanura de inundación [70], [14], [15], [46], [30], problemas con presas [80], [9], etc.

Los trabajos previos sobre **medidas preventivas** para evitar el riesgo de inundación se pueden dividir en dos grupos, según traten de medidas estructurales o no estructurales. En el primer grupo encontramos estudios como el de [45] explicando las metodologías para el dimensionamiento de una escollera, así como sus ventajas. También existen trabajos sobre las

1.4. ESTUDIO BIBLIOGRÁFICO.

implementaciones de estas estructuras en situaciones reales, como los de [34] que exponen los efectos de la turbulencia en los alrededores, [42] que trabajaron con los efectos de pequeñas presas de retención en los perfiles fluviales y carga de sedimentación, y [39] con obras de defensa como rebajes y ampliaciones de sección. Todas estas medidas se han programado y simulado con softwares como Iber, para conocer su alcance en casos reales.

Por otra parte, en las *medidas no estructurales* no ha habido apenas trabajos publicados a lo largo del tiempo. Destacan los trabajos de [10], [11] y [16], con estudios sobre la resiliencia y la vulnerabilidad frente a las inundaciones de distintas áreas de Castilla y León, y modelos hidrológicos e hidráulicos que se validan con los datos históricos y se relacionan claramente con los mapas de peligrosidad y los resultados de los estudios. Además, en [2] se especifican las medidas no estructurales a tomar en distintos casos, hasta alcanzar el ordenamiento urbanístico en función del riesgo.

Capítulo 2

OBJETIVOS

El objetivo principal de la tesis es *elaborar una propuesta para solventar los problemas causados por inundaciones fluviales en el municipio de Las Omañas*.

Para conseguir este objetivo se han concretado una serie de objetivos específicos que pasamos a detallar a continuación.

Respecto al **estudio específico del área**:

- Estudiar la configuración geográfica del entorno, incluyendo los distintos usos del suelo.
- Caracterizar geomorfológicamente los ríos, estudiando los cantos rodados y su petrografía.
- Analizar las inundaciones sufridas en la zona.

Respecto a la **metodología**:

- Elaborar una metodología sencilla para estudiar zonas inundables con pocos datos de partida.
- Establecer un sistema de actuación en zonas de confluencia de ríos con inundaciones periódicas.
- Identificar los parámetros base para realizar este tipo de investigaciones, de forma que ayude en otras localizaciones.

Respecto a las **simulaciones**:

- Analizar la influencia de introducir una condición inicial seca o con calado en la simulación, y los distintos esquemas de cálculo.
- Validar los resultados numéricos por medio de datos fotográficos.

Respecto a las **medidas preventivas**:

- Mejorar la ordenación del territorio y promover unos usos del suelo compatibles con el riesgo.

- Conseguir una disminución de la peligrosidad, tanto para la salud como para las actividades económicas y el patrimonio cultural.
- Describir qué estrategias se deben seguir para elaborar una serie de medidas preventivas estructurales y no estructurales.
- Simular el efecto de diques de contención para reducir el alcance de los episodios de inundaciones en el río Luna y Omaña, para evitar daños en las poblaciones adyacentes.

Capítulo 3

METODOLOGÍA

La fase preliminar en todo estudio es la recopilación de la información y documentos existentes, relacionados con el mismo. A continuación se explican los métodos y datos utilizados en esta investigación.

3.1. Datos climáticos e hidrológicos

ETAPA 1: Recopilación de la información.

Para recopilar información hidrológica que se encuentra dispersa, se visitan instituciones que operan directamente con estaciones hidrometeorológicas o que disponen de datos e información relacionada, tanto en el ámbito local como regional. Esta información, se encuentra dispersa, tiene diferentes objetivos y escalas, y no es de tan fácil acceso como debería, lo que dificulta su consecución e integración.

El análisis de la información existente tiene el propósito de:

- Contar con una primera idea del entorno en cuanto al estado de los recursos hídricos.
- Detectar la carencia de información actualizada para identificar lo que se necesita complementar. Se requiere entonces comparar la calidad, el alcance y la actualidad de la información disponible para concluir sobre las necesidades de nuevas investigaciones.
- Obtener conocimiento sobre los aspectos relacionados a derechos de acceso al agua para riego, para consumo humano, problemas de contaminación, saneamiento, etc., para una mejor comprensión de la situación actual del recurso hídrico.

Los estudios hidrometeorológicos utilizan datos de observaciones reales de valores de diversos parámetros (precipitación, temperatura, niveles, gastos, etc), cuya variabilidad en el tiempo es grande y no sistemática.

Según la Organización Meteorológica Mundial (en adelante, OMM), las series confiables deben tener como mínimo 20 años de registros continuos de estaciones de funcionamiento regular y permanente, susceptibles a las realidades de cada país, las que, en caso de no existir series extensas pueden utilizarse hasta de 10 años. En el caso de estudio, estos datos son accesibles a través de la Confederación Hidrográfica del Duero (CHD) y constituyen series más largas. Para esta investigación se utilizarán la serie de datos de los últimos 30 años, correspondientes al periodo 1985-2015.

Se dará importancia a los datos más actuales, por los cambios climáticos que se han presentado en los últimos tiempos y en las diferentes regiones.

a) Red meteorológica.

Esta red permite conocer y evaluar la mayor parte de los elementos que conforman el ciclo del agua, como es el caso del parámetro fundamental de la precipitación, cuantificando el agua meteórica y el conocimiento de la forma y distribución de las lluvias. Por otra parte se registran importantes parámetros relacionados con la evapotranspiración y otros de interés para el sector agropecuario. Estos datos son propiedad de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), a la que se han solicitado los datos de intensidad de lluvia y cantidad diaria para su uso en esta investigación.

b) Red hidrométrica.

Al igual que en la red meteorológica, se obtendrán los datos de las estaciones hidrométricas operadas por el Sistema Automático de Información Hidrográfica (SAIH) e incluidas la Red Oficial de Estaciones de Aforo (roeA), y por otras instituciones que registra el Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA), los cuales nos permiten conocer el escurrimiento superficial, es decir, los caudales que, posiblemente, es el parámetro del ciclo hidrológico que puede ser medido con mayor exactitud, siempre y cuando, la red de estaciones de medida estén bien ubicadas para obtener una buena representatividad de las diversas zonas hidro-climáticas y caracterizar los regímenes fluviales de la cuenca hidrográfica.

De acuerdo a su funcionamiento, pueden ser: Primarias cuando son fijas y perennes, Secundarias susceptibles a cambio de lugar luego de un período y, Terciarias aquellas que han sido instaladas en ciertos sitios para llenar objetivos específicos y a menudo se levantan a la finalización de la construcción de la obra para la que fueron instaladas. Todas las estaciones utilizadas en este estudio son primarias.

ETAPA 2: Caracterización climática.

Análisis y ajuste de las series meteorológicas.

Las series meteorológicas diarias, mensuales o anuales de todas las estaciones de la cuenca y de su periferia, entregadas por la AEMET, serán analizadas para determinar su extensión y continuidad, con fines de seleccionar los períodos más adecuados para la homogeneización de datos y cálculo de los parámetros climáticos. Los períodos a homogeneizarse tendrán una extensión de entre 20 y 25 años, tratando de que sean lo mas extensos posibles.

Se dará prioridad al análisis de los datos de precipitación y temperatura, por ser fundamentales para el estudio climático.

ETAPA 3: Caracterización hidrológica.

Para el cálculo de los diferentes parámetros que caracterizan el régimen hidrológico de los distintos cursos de agua de la Cuenca, se utilizará, lo más frecuentemente posible, la información recopilada y tratada en la CHD. Sin embargo, es indispensable analizar y verificar los factores que han permitido a la CHD calcular las distintas variables hidrológicas.

a) Análisis y ajuste de datos hidrométricos.

Para esto se tomará una base de datos que identifique a cada estación en estudio, la cual contiene: tabla de caudales y niveles diarios, lista de aforos realizados, tablas y curvas de

3.1. DATOS CLIMÁTICOS E HIDROLÓGICOS

descarga, hidrogramas, etc. Estos datos se recogerán de la CHD.

De este análisis se obtendrán los caudales medios mensuales y anuales, caudales máximos y mínimos y régimen hidrológico que serán utilizados en el cálculo de la simulación numérica.

b) Zonificación hidrológica.

En una cuenca hidrográfica, previamente al estudio hidrológico, es necesario determinar ciertos parámetros físicos característicos, simples, maleables y calculables con los datos disponibles, que permitan delimitar zonas de iguales condiciones hidrológicas que lleven a estimar las disponibilidades de agua en todo el territorio nacional, incluyendo zonas en las cuales no existen estaciones de medida y control.

Para esto, es necesario que la determinación de estos parámetros se realicen en unidades hidrográficas lo más pequeñas posibles de manera tal que, por su tamaño, sus elementos internos tengan muy poca variación y puedan considerarse como homogéneos.

Delimitación hidrográfica de cuencas.

Tomando como base la división hidrográfica en cuencas y subcuencas de la Propuesta Interinstitucional realizada por: MAGRAMA y CHD, se delimitarán las cuencas, teniendo como referencia los modelos del terreno que se encuentren disponibles en lugares de poca definición altimétrica.

Los conceptos generales sobre división hidrográfica a ser tomados en cuenta son: cuenca hidrográfica, es el área limitada por la divisoria de aguas en la cual escurre el agua que se recoge en un solo cauce y que desemboca directamente al mar o sale del territorio nacional; subcuenca, es el área que drena directamente al cauce principal de la cuenca hidrográfica; y, microcuenca, es el área donde se recoge el agua que alimenta al cauce principal de la subcuenca.

Caracterización de cuencas.

Con estos datos iniciales, se realizará la caracterización hidrológica con parámetros considerados, a más de su importancia, como poco cambiantes a través del tiempo y que definan adecuadamente las condiciones hidrológicas de las microcuencas.

- Pluviometría (P): Los valores de pluviometría se definen mediante la ponderación de las zonas de precipitación media, determinadas en el estudio climático, que se encuentran en el área de la microcuenca.
- Permeabilidad (K): La influencia del suelo y subsuelo en la escorrentía superficial, se refleja en la permeabilidad como aporte del agua subterránea y el retardo del agua infiltrada hasta su llegada al río. Siguiendo la clasificación en base a la litología, tendremos:

CLASE K2 - Zona permeable con capa acuífera arenada. Esta clase es muy importante para el mantenimiento del caudal de base de los ríos y para la investigación de aguas subterráneas. Pertenecen a esta clase todos los depósitos aluviales, coluviales y glaciares, las formaciones compuestas de conglomerados o areniscas y las unidades arenosas y limo arenosas.

CLASE K5 - Zona impermeable. Son rocas sin acuífero como las semimetamórficas y metamórficas o intrusiones de rocas graníticas. Cuando están muy fracturadas pueden responder a la clase K4.

Análisis de órdenes.

Se necesita consultar los mapas de ordenación de cauces para poder establecer un recuento del número de los cauces de cada orden. Estos mapas los elabora cada confederación hidrográfica de todos los ríos presentes en la misma, por cuencas más grandes. Es trabajo personal ir contando cuántos cauces hay de cada tipo para establecer la relación entre ellos.

Además, con esta información y el tipo de cuencas, se describe la dinámica de la misma (drenaje, densidad, relaciones de bifurcación...). Estos parámetros se analizan siguiendo los estudios de Howard, Schumm y Strahler.

ETAPA 4: Estudio histórico.

Un último paso a realizar siempre es el estudio de la dinámica fluvial y su caracterización climática e hidrológica es la recopilación de datos ocurridos en los últimos años, tales como el análisis de fotografías aéreas o el registro de eventos extraordinarios pasados.

Las fotografías aéreas han sido consultadas a través del Instituto Geográfico Nacional. En la zona estudiada encontramos este tipo de instantáneas de los vuelos: norteamericano serie A años 1945-46, norteamericano serie B años 1956-57, internacional años 1973-1986, PNOA 2014. Todos ellos se han comparado para ver los cambios en la dinámica fluvial y la antropización de la zona de estudio que puedan haber afectado más.

Además, se ha realizado una lectura en profundidad del Plan Hidrológico de Cuenca de la CHD, al mismo tiempo se ha estudiado la situación de los embalses y los mapas de riesgos de inundaciones implementados por la Confederación a lo largo de los años.

3.2. Datos geológicos

ETAPA 1: Recopilación de la información.

El trabajo de documentación abarca la búsqueda de todo tipo de información bibliográfica, cartográfica y documental referida al área de estudio en particular.

Esta búsqueda se ha producido por distintos medios como los electrónicos (repositorios, revistas especializadas, etc.) o bibliotecas... De este modo se cuenta con material publicado recientemente sobre el área de estudio y sobre áreas colindantes o similares geológicamente hablando. Además, se han utilizado testimonios personales e históricos para dar verosimilitud a los trabajos.

Tras la recogida de la información, se ha procedido a la separación por temáticas de la bibliografía, tal y como se han comentado en el capítulo 1. Esto ha permitido un análisis más detallado y comparado de los artículos encontrados, para poder completar el puzzle de antecedentes sobre el que trabajar.

En esta etapa se ha recopilado también la información cartográfica, proveniente del Instituto Geológico y Minero de España (en adelante IGME). Son los mapas geológicos nacionales (MAGNA) de la segunda serie, las hojas 102, 128, 129, 160 y 161, con una escala de 1:50.000. La base topográfica se ha obtenido del Instituto Geográfico Nacional (IGN).

Una vez tenemos toda la información previa recogida, se elabora el plan de trabajo, con su correspondiente diseño de las campañas de campo (con días, paradas de estudio, elección del material a utilizar, necesidades a cubrir...). Para ello es necesario conocer bien las condiciones climatológicas del área de estudio y la disponibilidad del personal implicado.

3.2. DATOS GEOLÓGICOS

ETAPA 2: Tareas de campo.

a) Muestreo.

El trabajo de reconocimiento directo del área de estudio constituye la base de la investigación. Para ello se han llevado a cabo una serie de recorridos sistemáticos por toda el área de estudio, tomando datos y muestras en lugares relevantes. Es necesario el siguiente material: martillo, bolsa hermética, rotulador permanente, brújula y gafas de protección.

La recolección de las muestras de los diferentes sitios de muestreo se realizó en zonas accesibles, como las barras laterales o los caminos de la llanura de inundación. Se eligió un muestreo sistemático en el segundo caso, que acabó siendo casi aleatorio por la dificultad de acceso a los bordes del río en la mayoría de los casos. Y es que son terrenos privados a los que no se puede acceder. En cualquier caso, este muestreo se realizó siguiendo el cauce de los ríos en su curso bajo. El muestreo en las barras laterales se ha realizado de modo aleatorio, tomándose en intervalos de espacio variable y distribuido al azar según la disposición de las barras.

De las muestras recogidas, se obtienen dos partes por cada muestra, una destinada a los estudios de laboratorio (para realización de lámina delgada y estudio microscópico) y otra para su análisis y descripción en muestra de mano.

Estos muestreos se utilizarán para, por un lado, describir los materiales de las barras laterales (siendo indicativos del transporte del río) y, por otro lado, servir de apoyo al conocimiento del contexto y comprobación de la cartografía existente.

b) Otras tareas de campo.

Otras tareas de campo que no son propiamente el muestreo es el registro de datos de interés que acompañen el muestreo y la comprensión global del área de estudio. Para facilitar la toma de las mismas, como material complementario se lleva un mapa geológico de la zona, una fotografía aérea y una libreta de campo.

En estos soportes se anotarán los puntos de muestreo, las medidas tomadas con brújula en el caso de que sean necesarias, las características del área de muestreo para su comprensión (además de un croquis con el diseño de la misma, con dimensiones y profundidad de lámina de agua en su caso), la orientación de los materiales, otras circunstancias que puedan facilitar la interpretación de resultados como la presencia de contaminantes o actuaciones en el cauce, fecha y hora de la toma de muestras y la visita a campo...

Además, es necesario realizar una campaña fotográfica en cada visita al área de estudio para ilustrar el informe y comprender mejor *a posteriori* la casuística concreta, debido a que es un medio que está en continuo cambio y cada vez podemos encontrar una altura de lámina de agua diferente y una disposición de los materiales depositados distinta (probablemente promovida por distintas avenidas que hayan afectado en el periodo de tiempo desde una visita a otra).

ETAPA 3: Técnicas analíticas utilizadas.

Las ciencias geológicas tienen a su disposición varias técnicas que permiten la correcta identificación y caracterización de un determinado tipo de roca, principalmente basados en la petrología, mineralogía y geoquímica. En este estudio, ya que no es eminentemente geológico, se han utilizado solamente algunas de estas técnicas, siendo estas las más comunes y que más se adecuan al objetivo del mismo.

a) Análisis petrográfico macroscópico.

Se realiza un reconocimiento y descripción de los materiales que afloran en el área, mues-

treados como se ha comentado en el apartado anterior. Esto permite, entre otras cosas, la elección de muestras a estudiar con otras técnicas.

Los criterios utilizados para la descripción han sido los siguientes: las propiedades físicas (color en roca fresca y en campo, tamaño de los cristales, dureza, tamaño de grano, brillo, forma, exfoliación, esfericidad y redondez) y datos estructurales (fracturas y rizaduras, si aparecen...).

b) Análisis petrográfico microscópico.

La técnica más usada para el estudio de rocas es el uso de un microscopio óptico normal al que se le han añadido filtros polarizadores, llamados nícoles. Uno de ellos está fijo en el microscopio, mientras que el otro, el analizador, puede girarse 90°. De esta forma podemos ver las muestras en nícoles paralelos o en nícoles cruzados. Es decir, al aplicar los dos filtros polarizadores sólo se deja pasar la luz que vibra en un plano, absorbiendo el resto de rayos luminosos.

Figura 3.1: Material de laboratorio para el análisis microscópico.

La preparación de la muestra apta para ser vista al microscopio se ha llevado a cabo en el Laboratorio de Microscopía Aplicada. Esta preparación se realiza para dejar las muestras con un espesor de unas 30 micras (0.03 mm.), con ayuda de una sierra de diamante y una

3.3. MÉTODOS NUMÉRICOS

pulidora, para terminar el trabajo a mano. Esta muestra debe tener unas dimensiones de 2 x 4 cm aproximadamente, y debe estar pegada a un portaobjetos (ver figura 3.1) .

El método permite conocer la estructura y textura de la roca, la mineralogía de los granos cristalinos que la forman y la disposición y naturaleza de las superficies de contacto, además de interpretar el origen del material, su génesis y sus relaciones.

Se debe llevar especial cuidado cuando se realiza esta técnica, con la identificación de las poblaciones de los tamaños de cristales, ya que en muchos casos pueden tratarse de secciones no diametrales.

ETAPA 4: Tareas de gabinete complementarias.

a) *Comprobación de la cartografía.*

Como se ha comentado anteriormente, con los datos recopilados en campo y comparándolos con las hojas geológicas del área, se analiza y comprueba la veracidad de la cartografía a una escala más detallada. Esta comparación se completa con la foteointerpretación realizada previamente.

Esta tarea nos ayudará a determinar si es necesario elaborar un mapa geológico de menor escala para comprender mejor y dejar plasmado el comportamiento y litologías del área.

b) *Tratamiento de imágenes.*

Las fotografías tomadas en campo, en algunos casos, necesitan ser tratadas mediante software específico para acompañar la memoria, esclareciendo algunos puntos y dando apoyo visual.

c) *Análisis de datos.*

Se estudian y se ordenan las anotaciones, completándolas con las anotaciones realizadas en el laboratorio, las fotografías tomadas en campo (ya identificadas correctamente) y la consulta de la bibliografía antes recopilada y otra nueva, si fuese necesario.

Es también necesario realizar una revisión de los resultados obtenidos en el laboratorio, de forma que obtengamos datos confiables, con información suficiente, organizada y clasificada.

Una vez analizados todos los datos se procede a elaborar unas conclusiones que ayuden a dar sentido físico al estudio de inundaciones que se está realizando.

3.3. Métodos numéricos

Las ecuaciones que gobiernan el comportamiento de un fluido son conocidas **ecuaciones de Navier - Stokes**. Estas ecuaciones forman un sistema no lineal [20], formado por cuatro ecuaciones (para un fluido incompresible) con conservación de masa y momento (ver 3.1).

$$\begin{aligned} \frac{\delta u_j}{\delta x_j} &= 0 \\ \frac{\delta u_i}{\delta t} + \frac{\delta u_i u_j}{\delta x_j} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\delta p}{\delta x_i} + \frac{1}{\rho} \frac{\delta \tau_{i,j}}{\delta x_j} + F_i \end{aligned} \tag{3.1}$$

Donde $u_i (i = 1, 2, 3)$ son los componentes de la velocidad instantánea, $\tau_{i,j}$ es el tensor de estrés de la velocidad, P es la presión y F_i son las fuerzas de volumen [20]. Para un fluido newtoniano, el tensor de viscosidad puede ser expresado como:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\delta u_i}{\delta x_j} + \frac{\delta u_j}{\delta x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\delta u_k}{\delta x_k} \right) = 2\mu \left(s_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \frac{\delta u_k}{\delta x_k} \right) \quad (3.2)$$

Donde s_{ij} es el tensor de la tasa detensión y μ es la viscosidad dinámica. Para un fluido incompresible, la ecuación 3.2 se reduce a:

$$\tau_{ij} = 2\mu s_{ij} \quad (3.3)$$

Para la modelización matemática se parte de leyes de conservación de masa y de cantidad de movimiento, como los que se utilizan en la bibliografía sobre hidrodinámica fluvial [14]. Las **ecuaciones de aguas someras** asumen una componente vertical de la velocidad constante es decir, componente normal de la aceleración despreciable [20], [38]. Las ecuaciones de Navier - Stokes se promedian en tiempo y se obtienen las ecuaciones de Reynolds, que posteriormente se promedian en profundidad para dar las ecuaciones de aguas someras en dos dimensiones (ver 3.4).

$$\begin{aligned} \frac{\delta h}{\delta t} + \frac{\delta q_x}{\delta x} + \frac{\delta q_y}{\delta y} &= 0 \\ \frac{\delta q_x}{\delta t} + \frac{\delta}{\delta x} \left(\frac{q_x^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) &= -gh \frac{\delta z_b}{\delta x} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} - \frac{\delta}{\delta x} (h \overline{u'_x u'_x}) - \frac{\delta}{\delta y} (h \overline{u'_x u'_y}) \\ \frac{\delta q_y}{\delta t} + \frac{\delta}{\delta x} \left(\frac{q_x q_y}{h} \right) + \frac{\delta}{\delta y} \left(\frac{q_y^2}{h} + g \frac{h^2}{2} \right) &= -gh \frac{\delta z_b}{\delta y} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} - \frac{\delta}{\delta x} (h \overline{u'_x u'_y}) - \frac{\delta}{\delta y} (h \overline{u'_y u'_y}) \end{aligned} \quad (3.4)$$

La mayoría de flujos hidráulicos son flujos de superficie libre que se extienden sobre largos dominios espaciales (relativamente), como estuarios, ríos, canales... Algunas de las complicaciones que presentan cuando se realiza una simulación numérica sobre este tipo de flujos es la compleja geometría, el tamaño del dominio, la computación de la superficie libre y el tratamiento del frente seco - mojado [20].

Utilizar el **método de volúmenes finitos** en dinámica de fluidos es relativamente reciente [33]. Este método permite resolver numéricamente ecuaciones diferenciales. Si consideramos una malla de discretización del espacio fluido, y en cada punto de esta malla se construye un volumen de control, tendremos que el volumen total del fluido es igual a la suma de los volúmenes de control [33], [14].

El programa utilizado resuelve las ecuaciones de aguas someras mediante un esquema numérico de volúmenes finitos para mallas bidimensionales no estructuradas, siendo un modelo de *tipo arista*. En este caso, la malla generada está formada por triángulos que se dividen en tres por cada uno de ellos, uniendo cada vértice con el baricentro [33]. Estos subtriángulos se unen por pares de forma que cada volumen finito estará definido por dos subtriángulos con una arista de la malla inicial en común. Todo el desarrollo se puede consultar en la bibliografía [17], [20], [22], [28], por lo que no nos extenderemos más aquí.

Este método tiene como ventaja principal el evitar los problemas derivados del cálculo de la perpendicular a las aristas frontera en puntos angulosos del contorno, donde habría dos perpendiculares. Esto es debido a que esos puntos nunca serán nodos de la malla en este tipo

3.4. IBER/ARCGIS

de volumen finito. Como contrapartida, en este tipo no se utilizan los nodos ni las celdas iniciales.

La metodología usada en el proceso de caracterización se basa en la selección de aquellos parámetros que se considera que en mayor medida determinan la existencia de peligrosidad y riesgo de inundación, y sobre los que al mismo tiempo se dispone de información suficiente para poder realizar la valoración sin la necesidad de llevar a cabo nuevos estudios.

3.4. Iber/arcgis

Para tratar las imágenes aéreas que se han conseguido en el IGN, se trabaja con arcmap con el fin de recortar y unir las ortofotos y prepararlas para su introducción en Iber. Al mismo tiempo se hace lo mismo con el modelo digital del terreno (MDT), que es el dato que nos va a dar la elevación del terreno necesaria para las simulaciones.

Arcmap es un producto incluido en el software arcgis, un sistema de información geográfica. Se ha utilizado la versión 10.2 para el tratamiento de los mapas y fotografías aéreas. Este programa permite planificar adecuadamente la ordenación del territorio, compilar información geográfica, resolver problemas de análisis espacial crear y administrar bases de datos geográficos, entre otros problemas. Además, es un software muy extendido en este tipo de menesteres y sobresale por la rapidez en el trabajo.

Una vez tenemos los datos trabajados y listos, se incluyen en el código informático elegido para modelizar las inundaciones de la zona. En el caso de este trabajo, se ha elegido el programa Iber versión 2.3 para resolver las ecuaciones por el método de volúmenes finitos [89], [27], por ser un software libre, de fácil acceso y por los numerosos campos de aplicación. En esta línea hay publicaciones como las de [15] y [16]. Iber es un modelo matemático bidimensional, muy utilizado en la simulación del flujo en lámina libre tanto de ríos como estuarios. Ha sido desarrollado por el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente de la Universidad de A Coruña y el Instituto FLUMEN de la Universitat Politècnica de Catalunya y el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería. El código Iber se basa en el método numérico de volúmenes finitos, que es especialmente indicado para la resolución de modelos matemáticos basados en leyes de conservación de masa y cantidad de movimiento, que aparecen frecuentemente en problemas de dinámica de fluidos, de los que tanto las ecuaciones de aguas someras como de St. Venant son un caso particular. El programa se ha diseñado específicamente para el estudio de calados y velocidades, de forma que se puedan determinar zonas inundables, diseño de encauzamientos y obras de protección, planes de emergencia por rotura de presas, optimización de obras hidráulicas... Para ello se ha estructurado en tres módulos diferentes: el módulo hidrodinámico (el utilizado en esta investigación, donde se obtienen calados y velocidades), el módulo de turbulencia (para medir tensiones) y el módulo de transporte de sedimentos (que incluye transporte de fondo y en suspensión).

Las condiciones y datos incluidos en el programa para realizar las simulaciones han sido los siguientes:

- Se ha importado el Modelo Digital del Terreno mediante la técnica RTIN, con máximo 200m y mínimo 10m, y con una tolerancia de 0.2m.

Figura 3.2: Datos de rugosidad asignada mediante coeficiente de Manning.

- Se han incluido los datos de caudal máximo instantáneo como el caudal inicial en las condiciones de contorno, según caudal constante y flujo de salida supercrítico. Caudal máximo río Omaña = $115,44 \text{ m}^3/\text{s}$. Caudal máximo río Luna = $148,02 \text{ m}^3/\text{s}$.
- La condición inicial propuesta es: todo el territorio seco.
- Se han incluido los datos de rugosidad del suelo por el método de uso del suelo, según los números de Manning ya registrados en el programa. Este trabajo se ha introducido de forma manual para una mayor exactitud de los datos (ver figura 5.4).
- El mallado de discretización se ha realizado para que cada elemento de la geometría sean dos en la malla no estructurada, de elementos triangulares de tamaños distintos, distribuidos en dos familias: elementos de 5 m de lado y elementos de 10 m de lado. Esta malla se adapta a la geometría del área, ya que los tamaños pequeños se encuentran situados en las zonas más conflictivas, como son los cauces y poblaciones, mientras que los elementos de gran tamaño se sitúan en la llanura de inundación.
- Los datos asignados al problema son: tiempo de simulación: 14400 s (4 horas) y un intervalo de resultados de 1800 s (30 minutos).
- Se ha añadido el puente sobre el río Luna.

Capítulo 4

ANÁLISIS HIDROGEOMORFOLÓGICO

El análisis geomorfológico e histórico sirve para completar el estudio hidrológico e hidráulico y calibrar la modelización hidráulica, corroborando las zonas inundables constatables mediante referentes históricos [?].

Se trata de realizar una identificación y caracterización de la cuenca de estudio, tanto en sentido cualitativo como en sentido cuantitativo, para conocer el comportamiento general de los ríos y el análisis de la dinámica fluvial. Esto es un paso preliminar para el estudio de los ríos en caso de avenidas e inundaciones

4.1. Análisis climático e hidrográfico

El estudio geomorfológico del paisaje y su evolución temporal van íntimamente ligados al clima [81]. El clima varía la fisionomía del paisaje dándole unas características propias, en función de la litología, vegetación, actividad humana...

La climatología, a su vez, se basa en una gran complejidad de caracteres que dotan a cada clima de unas características individuales, dificultando establecer unidades de clasificación. Por este motivo existen tantas clasificaciones climáticas como autores versados sobre el tema [81]. A pesar de la extensión del tema, las clasificaciones climáticas se pueden considerar en cuatro grupos, según su fundamentación: basadas en la temperatura, basadas en las precipitaciones, mixtas y relacionadas con la distribución de los seres vivos.

Centrándonos ya en el clima de Castilla y León, observamos la gran diversidad climática de la autonomía y la cantidad de fenómenos extremos que la afectan. Estos últimos no se manifiestan con homogeneidad en todo el territorio, sino que está muy influenciada por su configuración morfológica y las diferencias entre las montañas de la periferia y las llanuras del interior [68].

Antes de clasificar el clima del área de estudio por los métodos más comunes, es necesario describir las características del mismo, analizadas según los datos facilitados por la Agencia Estatal de Meteorología (en adelante, AEMET), para determinar de forma clara el tipo de clima.

Temperatura

La máxima temperatura mensual es de 26.7°C, registrada en agosto, mientras que la mínima temperatura se registra en enero, siendo de -1.1°C (ver 4.6). La temperatura media anual está alrededor de 9.8°C, calculada para toda la provincia de León, por lo que puede variar en función de la altitud, latitud, situación geográfica exacta... A pesar de este inconveniente, es lógico suponer que un aumento de la altura conllevará una disminución en las temperaturas y, por tanto, en las zonas de cabecera de los ríos habrá unas temperaturas más bajas que en la zona de confluencia.

•	TEMP. MEDIA (°C)	TEMP. MÁX. (°C)	TEMP. MÍN. (°C)
ENERO	2,8	6,7	-1,1
FEBRERO	4,3	8,9	-0,2
MARZO	7	11,9	2,2
ABRIL	9	14,7	3,3
MAYO	12	18	6,1
JUNIO	16,4	23,3	9,5
JULIO	19	26,7	11,3
AGOSTO	18,7	26,2	11,3
SEPTIEMBRE	16	22,5	9,5
OCTUBRE	11,4	16,9	5,9
NOVIEMBRE	6,6	11,2	2
DICIEMBRE	3,7	7,4	0

Tabla 4.1: Serie con los datos de temperatura medios, máximos y mínimos mensuales, calculados para la serie de los últimos 30 años (1984-2014) en la provincia de León.

A partir de febrero se distingue un aumento de las temperaturas, aunque hasta el mes de mayo este ascenso no es demasiado rápido. Las máximas se alcanzan en julio o agosto, dependiendo del año evaluado. El calentamiento ocurrido en la primera mitad del año, es más lento que el enfriamiento que tiene lugar de septiembre a enero. Este último tiene un tramo de menor descenso, producido entre los meses de diciembre y enero, donde la temperatura es prácticamente la misma.

Otro parámetro a considerar, dentro de los valores termométricos, es la amplitud térmica anual [81]. Este dato representa la oscilación de la temperatura media entre el mes más frío y el más caluroso del año. En este caso concreto, la amplitud térmica es de 27,5 °C aproximadamente, entre el valor mínimo alcanzado y el valor máximo.

Precipitación

Las precipitaciones anuales medias registradas entre los años 1984 y 2014 (serie de los últimos 30 años), para los observatorios de León - aeropuerto y La Magdalena, son importantes (tabla 4.2, figura 4.1). Con un balance anual medio de 527,58 mm para León y 695,25 mm para La Magdalena (situado más al NO, aguas arriba de la zona de estudio), lo que supone incluir a la zona en una región de clima húmedo.

4.1. ANÁLISIS CLIMÁTICO E HIDROGRÁFICO

•	AEROPUERTO LEÓN (mm)	LA MAGDALENA (mm)
ENERO	57,85	75,20
FEBRERO	42,79	54,91
MARZO	41,15	69,99
ABRIL	52,13	60,28
MAYO	60,36	66,33
JUNIO	35,39	41,22
JULIO	21,103	22,94
AGOSTO	23,75	32,99
SEPTIEMBRE	47,57	43,09
OCTUBRE	71,8	94,44
NOVIEMBRE	66,87	88,52
DICIEMBRE	70,78	81,806
TOTAL MEDIO ANUAL	527,58	695,25

Tabla 4.2: Serie anual con los datos de pluviometría medios mensuales y anuales, calculados para la serie de los últimos 30 años (1984-2014) según los datos facilitados por AEMET. En esta tabla se puede ver que siguen las mismas tendencias en ambas estaciones de medición.

En ambas estaciones se mide el mes más seco en julio (21,103 mm en León y 22,94 mm en La Magdalena) y el mes más lluvioso en octubre (71,85 mm y 94,44 mm, respectivamente). En cualquier caso, se comprueba que el mes seco sigue teniendo importantes precipitaciones. La oscilación pluviométrica se da, entonces, entre 21 mm y 95 mm aproximadamente. Además, se comprueba entre las dos estaciones que la altitud y latitud afecta a la cantidad de precipitaciones. Recordamos, por si fuese necesario, las ubicaciones exactas: León - aeropuerto está situado a una latitud de 42°35'18"N y una longitud de 5°39'4"O, con una altitud de 912m; por su parte la estación de La Magdalena está situada a 424701N, 54813O y 1000 m de altitud.

Del análisis pluviométrico se saca la conclusión de que no hay una estación anual preferencial para la lluvia, sino que de octubre a mayo se siguen distintos episodios de precipitaciones, siendo especialmente intensas en los meses de octubre a enero y de marzo a mayo. En verano se produce un descenso brusco de las lluvias, aunque no total. Como se ha señalado, el mes más seco es julio, seguido de agosto, y los más lluviosos son octubre, noviembre y diciembre.

Calculando el cociente entre el mes más lluvioso y el mes más seco se aprecia que las dos estaciones están por debajo del valor 4 o muy próximo (3,4 aeropuerto y 4,12 La Magdalena), valor propio de las zonas de montaña [81]. Este dato asevera la uniformidad de la precipitación en esta zona a lo largo de todo el año.

En el anejo 2 del Plan Hidrológico aparecen los cálculos estadísticos realizados para las series hidrológicas históricas. Se han realizado dos series, una completa que va entre los años hidrológicos 1940-1941 y 2005-2006, y otra corta que comprende entre los años 1980-1981 y 2005-2006. En estas series se muestran los datos estadísticos de la precipitación y aportación. Para esta investigación se utilizan los datos de la subzona del Órbigo.

En líneas generales, los valores de la serie completa son mayores a los de la serie corta en todas las subzonas, aunque siguen un patrón del mismo estilo en ambas series. Es muy

posible, tal y como se indica, que los cambios se hayan visto afectados por los cambios del uso del suelo en los diferentes años.

Tipo de clima

Existen tantas clasificaciones climáticas como autores trabajando en el mismo tema [81], tal y como se ha comentado anteriormente. Por este motivo, podemos clasificar el clima de la zona según distintas formas.

Según la clasificación de Martonne, basada en criterios geográficos, se trata de un clima templado con invierno marcado (distinguido con el número romano IV). Esta clasificación es la más básica.

Si nos basamos en la clasificación de Wilhelm Köppen [53], teniendo en cuenta las precipitaciones y las temperaturas, se reconoce como un clima templado. Es un clima templado húmedo tipo C, con una temperatura media del mes más frío entre -3°C y 18°C . Además, se completa con la letra f, por la falta de estación seca. De este modo, queda como un clima Cf según esta clasificación.

Por otro lado, de acuerdo con Heinrich Walter [90], se relaciona la zona con el clima y el bioma. Se trata de un ecosistema terrestre o geobiosfera, enclavado en la zona templada con precipitación todo el año (clasificación 5). Es así como se clasifica el clima del área de estudio como ZBVII, clima árido - templado con invierno frío (continental).

En general, se puede concluir que el clima predominante es el mediterráneo continentalizado, a causa del aislamiento que le provocan las cadenas periféricas. Los inviernos son largos y fríos, especialmente en el norte de la cuenca, y los veranos son cortos y suaves. La variabilidad interanual de las precipitaciones es errática temporal y espacialmente. En ciertos años se registran tanto sequías estivales propias de un clima mediterráneo, como grandes sucesiones de frentes atlánticos que producen episodios de avenidas e inundaciones.

En cabecera, los niveles de precipitaciones están por encima de los 650 mm, siendo muy alto, mientras que en las llanuras, el régimen pluviométrico es alto (500 mm). Esta distribución tan heterogénea de las lluvias también afecta a la zona y al comportamiento de los ríos frente a las inundaciones.

Hidrografía

La red hidrográfica de la parte española de la demarcación hidrográfica del Duero está formada por el río Duero, sus afluentes con un marcado carácter dendrítico y algunos ríos de la vertiente atlántica no relacionados con éste. La zona de estudio se encuentra enclavada en esta demarcación, siendo los ríos estudiados afluentes del río Esla (uno de los principales afluentes del Duero de la zona norte). Este área pertenece a la subzona del Órbigo según el Plan Hidrológico de Cuenca (en adelante, PHC), publicado en 2015.

Para la subzona del Órbigo, los recursos naturales totales necesarios para garantizar un buen funcionamiento se han evaluado en $1387 \text{ hm}^3/\text{año}$ según el Plan Hidrológico de Cuenca. El embalse que regula la disponibilidad de recursos en el sistema es el de Barrios de Luna, en la cabecera del río Luna, con una capacidad de 308 hm^3 . Actualmente, todo el sistema del Órbigo atiende el regadío de 68400 hectáreas, principalmente de cultivos de lúpulo, y no se prevé el crecimiento de la superficie de riego a abastecer.

4.2. ESTUDIO HIDROLÓGICO

Tener este embalse aguas arriba de la zona de estudio provoca la clasificación de los ríos Omaña y Luna como masas de agua naturales o muy modificadas (figura 4.2), según el tramo que se analice en concreto.

Las masas de agua muy modificadas son “aquellas que, como consecuencia de alteraciones físicas producidas por la actividad humana, han experimentado un cambio sustancial en su naturaleza” (PHC, 2015). Dentro de esta categoría se encuentran los embalses o los ríos con una alteración importante de su régimen hidrológico, encauzamiento, etc.

4.2. Estudio hidrológico

En este apartado se estudian en profundidad las inundaciones sufridas y su evolución temporal con el fin de conocer las causas y su importancia.

En muchas ocasiones, el paso de montaña a llanura, es decir, de fuertes pendientes a una cuenca llana y abierta, favorece las inundaciones sucedidas en las franjas de contacto de ambas unidades [69], como es el caso de Santiago del Molinillo, Las Omañas, Mataluenga, etc.

Para este apartado se han analizado los datos foronómicos, es decir, los caudales medios anuales obtenidos en las estaciones de aforo de la zona de estudio (Las Omañas, La Magdalena y Santa Marina del Rey) y registrados durante los últimos 30 años (tabla 4.3). Estos datos se extraen del Sistema Automático de Información Hidrográfica (SAIH) y la Red Oficial de Estaciones de Aforo (roeA), disponibles tanto en la web del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA) como en la página de la Confederación Hidrográfica del Duero - CHD (a la que pertenece la subcuenca del Órbigo).

“El Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH) de la Cuenca del Duero es un sistema de información encargado de captar, transmitir, procesar y validar aquellos datos que describen el estado hidrológico e hidráulico de la Cuenca, incluyendo, por tanto, el conocimiento del régimen hídrico a lo largo de su red fluvial y el estado de las obras hidráulicas principales y de los dispositivos de control que en ellas se ubican.”[?]

En la zona estudiada, las inundaciones se producen principalmente en los meses de enero a marzo (tabla 4.4). En estos meses se concentran las principales tormentas de lluvia que, si son tardías, se unen a los deshielos y provocan grandes problemas.

Como se ve en el registro, los caudales de los años húmedos siempre son superiores al doble de la de los años considerados secos. Aun así, hay casos excepcionales donde un año húmedo es casi el doble que un año “normal”, es decir, los que tienen un caudal aproximado al caudal medio de los registrados en la estación en cuestión. Esto se puede ver en el año 2000-2001, principalmente.

A modo resumen, podemos citar años hidrológicos secos de los últimos 30 años los siguientes: 1986-1987, 1992-1993, 1994-1995, 1998-1999, 2005-2006 y 2011-2012. Así mismo, los años hidrológicos húmedos acontecidos han sido: 1987-1988, 1995-1996, 2000-2001, 2006-2007, 2009-2010 y 2013-2014.

Basándonos en los datos de Morales y Ortega [69], el periodo de retorno para esta zona es de 2.5 a 3 años. Aunque estos datos están basados en el periodo estudiado por estos autores (de 1959 a 2001), puede extenderse muy bien al periodo estudiado en el presente trabajo.

Si se comparan las tablas 4.4 y 4.3, se obtiene que los principales episodios de inundaciones no solo corresponden con los años húmedos. Esto es así ya que un año húmedo se considera

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS HIDROGEOMORFOLÓGICO

AÑO	Las Omañas	La Magdalena	Santa Marina del Rey
RÍOS	OMAHÑA	LUNA	ÓRBIGO
1985-86	6.10	10.20	-
1986-87	4.31	9.08	-
1987-88	14.66	19.51	-
1988-89	11.94	8.67	-
1989-90	10.49	11.71	-
1990-91	-	15.05	-
1991-92	10.34	11.78	-
1992-93	7.86	9.82	-
1993-94	10.57	13.32	-
1994-95	7.05	9.09	-
1995-96	19.44	20.47	30.21
1996-97	9.59	12.39	9.79
1997-98	20.66	17.49	18.07
1998-99	5.37	9.49	4.35
1999-00	6.93	12.67	13.08
2000-01	21.10	25	37.80
2001-02	-	10.20	7.61
2002-03	8.90	15.60	22.30
2003-04	6.97	13.70	14.80
2004-05	7.14	14.60	11.90
2005-06	6.19	11.60	7.76
2006-07	-	16.90	22
2007-08	-	11.30	7.91
2008-09	-	12.20	10.10
2009-10	7.38	18.40	27.10
2010-11	6.12	-	16.50
2011-12	2.32	-	5.97
2012-13	6.59	-	18.99
2013-14	13.05	17.81	26.93
2014-15	-	16.7	16.93
Q MEDIO	8.30	14.58	16.61

Tabla 4.3: Caudal máximo (m^3/s) registrado en las diferentes estaciones de aforo en los últimos años hidrológicos (datos extraídos de MAGRAMA). En rojo se señala el año seco y en azul el año húmedo. Imagen extraída de [60]

4.3. CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA EN ORGANISMOS OFICIALES

según el cómputo total del año y las inundaciones se producen, principalmente, por un episodio de lluvias puntual e intenso, de manera que los cauces no dan salida a toda el agua, como es sabido por los científicos. Es decir, para que se produzca una inundación sólo necesitamos un caudal más alto de lo normal en un mes dado (ejemplos: episodio año 1989-1990 o episodio año 2012-2013). Eso sí, que sea un año húmedo condiciona el estado previo de la red de drenaje y, por tanto, esta tiene menor capacidad de drenaje. Recordamos también los episodios de agosto de 2015, en un momento de grave sequía. Sin embargo, hay años húmedos que se relacionan con distintos episodios en un mismo año, como el año extremadamente húmedo de 2000-2001, en el que se registraron 6 episodios de grandes avenidas.

Este hecho es muy necesario de destacar porque las personas que viven en la zona, y con las que nos hemos entrevistado, piensan que para darse inundaciones es necesario un año muy húmedo y muchas lluvias.

4.3. Caracterización de la cuenca en organismos oficiales

Además de lo expuesto, se tienen los datos de la caracterización del subtramo n°03-1800031-05 (Área de Riesgo Potencial Significativo de Inundación, ARPSI, de Santiago del Molinillo), extraídos del Plan Hidrológico de Cuenca 2015-2021. Estos datos reflejan que el estado de las masas de agua es malo y el objetivo fijado es que esté en buen estado para el periodo 2022-2027. Se considera que la zona tiene una peligrosidad global ponderando la regulación de 1.1 (de un máximo de 5) y un riesgo global de 0.8 (también de un máximo de 5), es decir, que no es un riesgo muy alto, ya que la población afectada es mínima (1119 personas) y los daños en actividades económicas tampoco son muy altos. Algunos de los datos más significativos es que el calado medio estimado en las zonas inundables sin considerar el cauce, para un periodo de retorno de 10 años, es de 0.17 m. Sin embargo, en el mapa de riesgos de inundaciones del PHC la zona se halla entre las zonas de alto riesgo (ver figura 6.2).

Por su parte, en la caracterización de la ARPSI, se lee que el estado de las aguas ya era el mismo en el plan anterior (2009-2015), lo que indica que las administraciones competentes no han trabajado para que el estado de estas aguas sea mejor y la zona tenga más valor. El objetivo es a muy largo plazo, 2020 - 2029, lo que no parece muy normal, dado que la zona está considerada como de “alto riesgo de inundación”, tanto en el mapa de peligrosidad como en el de riesgo (figura 6.2) realizados por la CHD en 2014-2015.

En los informes del PHC, además, se indica que el número de inundaciones históricas es de 3, que comparado con los datos recogidos en la tabla 4.4 de los últimos 30 años, no es correcto.

4.4. Análisis de fotogrametría

El análisis de las fotografías aéreas es un complemento indispensable para todo estudio geológico y geomorfológico. Mediante este estudio y la comparación entre ortofotos de distintos años, es posible observar cambios en la dinámica fluvial. La técnica de la fotointerpretación permite establecer relaciones entre los fenómenos representados en la imagen (topografía, formas del paisaje, vegetación...) con las unidades principales del paisaje [66].

Por tanto, es necesario recopilar todas las imágenes aéreas hechas en la zona de estudio, buscando en el archivo histórico de vuelos (con ayuda el Instituto Geográfico Nacional - IGN).

La zona de estudio se ha encontrado en cuatro de los seis bloques de vuelos que hay registrados. Estos son:

- Vuelo americano de 1945-1946, serie A. Figura 4.4
- Vuelo americano de 1956-1957, serie B. Figura 4.5
- Vuelo internacional de 1973-1986. Figura 4.6
- Vuelo de PNOA de 2014 (última fotografía del plan 2004 - 2019). Figura 4.7

Por tanto, la interpretación de fotografías aéreas es clave para entender las dinámicas espaciales de los municipios y los usos del suelo, así como la interacción entre la evaluación ambiental y la ordenación urbanística del territorio [43]. El detalle y la calidad de este tipo de fotografías ofrece una percepción única de los espacios, diferenciados por su aspecto visual, desde la cual se puede observar la evolución física del espacio.

Como queda claro en las pocas imágenes recopiladas, la recuperación de la documentación fotográfica espacial es dura y todavía queda mucha información por rescatar, tal y como relatan otros autores ([37], [35], [36]). Muchos ayuntamientos promovieron sus propios vuelos que, actualmente, no se encuentran disponibles ni accesibles para la población.

El número y las escalas utilizadas son muy heterogéneos. Las fotografías aéreas actuales (2004-2019, quinquenal) de máxima resolución, con un tamaño de píxel de 25-50 cm, están hechas a la misma escala que la serie de 1956-1957, 1:32000. Por su parte, el vuelo de 1945-1946 es de escala 1:43000 y el vuelo internacional de 1973-1986 es de 1:80000. Cabe señalar que en el plan actual de vuelos la zona ha sido fotografiada en 2004, 2006, 2008, 2011 y 2014. Siendo la pasada de 2008 la única con un tamaño de píxel de 25 cm, aunque todos los vuelos tienen un paso de malla de 5x5 m. Según los datos técnicos publicados en el IGN, la exactitud altimétrica del modelo digital del terreno generado en los vuelos del plan actual, tiene un error menor de 2 metros para los PNOA de 50 cm y menor a 1 metro para los de 25 cm. Respecto a la exactitud planimétrica, los errores son menores que 1 y 0.5 metros respectivamente en los casos anteriores.

A grandes rasgos no encontramos diferencias significativas en la zona de estudio, ya que la ocupación del territorio no ha cambiado de unos a otros, ni se observan grandes desarrollos urbanísticos en la misma. Las infraestructuras viarias de la zona (puentes sobre los ríos Luna y Omaña y carreteras de acceso a las localidades) ya estaban construidas en la primera fotografía que podemos estudiar. Sin embargo, se puede observar cambios en los alrededores de Mataluenga, por el aumento de caminos rurales (Figuras 4.6 y 4.7).

El principal cambio que encontramos está en la dinámica fluvial, concretamente en el río Omaña. En el vuelo de 1945-1946 se aprecia el carácter disperso y anastomosado del río (a pesar de la baja calidad de la imagen por el balance de blancos y negros) con gran cantidad de barras y canales a lo ancho del cauce fluvial. Por contra, en el vuelo de 2014, se ve el río meandriforme, sin apenas llanura de inundación diferenciada, y con menor número de canales.

Además, se observan cambios en el trazado del río Luna, ya que también han desaparecido algunos canales secundarios aunque en menor medida que en el río Omaña. Los cambios

4.5. ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO

principales en este río son las formas de los meandros, siendo actualmente más suaves los cambios de dirección del flujo.

La influencia antrópica queda patente en un aumento del área de cultivo, que limita la zona inundable del río y aumenta el riesgo ante un episodio de gran avenida de aguas. Estos terrenos son los que, principalmente, se ven afectados por las crecidas y, por tanto, deben indemnizarse por pérdidas agrícolas.

4.5. Análisis geomorfológico

La disposición de las alineaciones montañosas están relacionadas con la presencia de fallas inversas terciarias y provocan la instalación de una red hidrográfica por los estrechos valles ([50] y [59]), donde se evidencia que la cota alcanzada por los hielos fue, aproximadamente, la de 1000 metros en la última etapa glacial [52].

El estudio geomorfológico del tramo en cuestión, se realiza analizando las formas y disposiciones que han dado las avenidas recientes, cartografiándolas y comparándolas con los estudios históricos e hidráulicos.

4.5.1. Análisis morfométrico

La cuenca es la unidad geomorfológica para los estudios fluviomorfológicos, con tres subcuencas, con sus procesos sedimentarios distintos: erosión en la alta, transferencia en la media, depósito en la baja. En la subcuenca alta, los ríos se forman y el cauce se encañona por erosión. Los flujos llevan los productos de la socavación y de la erosión hacia las partes bajas de la cuenca. En la subcuenca media, existe un cierto equilibrio entre la capacidad de transporte del flujo y los aportes de sedimento; es la zona de transferencia. En la subcuenca baja, los sedimentos se depositan por falta de capacidad de transporte, generalmente, aunque en el caso de estudio solo se deposita el material grueso (gravas y cantos rodados). Esto es debido a la energía de transporte que, aunque suele disminuir en la parte inferior de los ríos, sigue siendo alta o, al menos, tiene la capacidad de transportar el material fino aguas abajo.

Para analizar la morfología de los ríos Luna y Omaña, lo primero en lo que nos fijamos es en los órdenes y cuantificación de los tramos, que calculamos por el orden de Strahler. Además, con estos datos obtenemos la relación de bifurcación (R_b) de acuerdo con Schumm [84].

Como se ve en la tabla 4.5, con los datos recogidos en los mapas del Plan Hidrológico de Cuenca 2015 - 2020 (figura 4.8), la jerarquización de los ríos da 9 para el río Luna y 10 para el río Omaña. Por su parte, la cuantificación del número de tramos de cauce de cada orden demuestra que se cumple la ley de Horton [48]; las relaciones de bifurcación entre 3 y 5 concuerdan con los resultados de cuencas de montaña [50].

Otro dato a tener en cuenta para caracterizar la cuenca es la morfología del cauce, extraída de conocer la disposición de los cauces y la densidad de drenaje de la red. Para ello, se deben diferenciar las distintas partes que conforman los cauces principales y definirlos. En el caso de los dos ríos que ocupan la zona de estudio, la densidad de drenaje es global, no distingue partes, y es alta, como se aprecia en la figura 4.8.

La forma en la que confluyen los cauces menores y principales es lo que denominamos disposición de los cauces y distinguimos dos zonas (misma división en ambos ríos). La parte

norte de los ríos, en general, tiene los ángulos rectos; mientras que la zona sur de la red tiene ángulos agudos de pequeño valor. Es decir, comparando estos datos con la definición de Howard [49] de tipos de redes de drenaje, estas redes son de tipo rectangular en la parte de cabecera y de tipo dendrítico en la zona de confluencia entre los dos ríos.

El tipo de red está muy relacionado con la litología y la tectónica. En este caso, la red rectangular está altamente relacionada con un control estructural fuerte, dirigido por fallas y pliegues [59]. El drenaje dendrítico, por su parte, es consecuencia de una estructura con capas horizontales o de pequeño buzamiento, lo que concuerda con el marco geológico (ver capítulo 1).

Para comprender la dinámica fluvial es importante conocer los parámetros geométricos de la zona. El caudal medio del río Luna es $14.58 \text{ m}^3/\text{s}$ y el del río Omaña es $8.30 \text{ m}^3/\text{s}$. En cuanto a las velocidades, estas son 1.5 m/s y 1.1 m/s respectivamente. El río Luna está regulado por dos embalses. Uno de ellos, regulado por la Confederación Hidrográfica, es el embalse de Barrios de Luna, situado más al norte; mientras que el otro, el de Selgas de Ordás regulado por la comunidad de regantes, está situado más cerca del área de estudio. La geometría del cauce en sección, aunque éste sea natural, se asemeja a una sección trapezoidal.

4.5.2. Análisis geomorfológico.

Los ríos son importantes agentes geológicos externos, por lo que son los principales moldeadores del relieve [74]. En este sentido, debemos destacar el poder erosivo y de transporte que tienen los ríos que nos ocupan. La erosión de un río comprende la acción hidráulica y la abrasión que son la erosión directa por golpes de la corriente contra paredes y fondo, y la erosión de los cantos transportados contra estos mismos elementos.

En los ríos Luna y Omaña encontramos erosión fluvial, ya que existe excavación de las orillas por la acción hidráulica. Sin embargo, en los tramos analizados, no hay procesos de abrasión porque no se observan pilancones o marmitas de gigante.

Las obras hidráulicas e intervenciones humanas en las cuencas cambian el equilibrio que fue establecido por el tiempo en los cauces. Por ejemplo, la construcción de presas en un río (como es el caso del embalse de Barrios de Luna y la presa de Ordás) no cambian el volumen anual total aguas abajo de las presas, sino la forma de las ondas de crecidas (picos mas bajos y estiaje más alto).

La forma del relieve en la zona estudiada confirma que se trata de un relieve fluvial-glacial. Se trata de un relieve erosional, con valles en V, aunque muy amplios. Además, en la zona baja existe relieve deposicional que dibuja un sistema meandriforme con point bars (acreción en el lado cóncavo) y crevasse splay.

4.6. Análisis petrológico del material transportado.

Coger muestras del material transportado por un río y analizarlas es uno de los primeros pasos a realizar en los estudios de dinámicas fluviales. El objetivo de este apartado es caracterizar estos depósitos acumulados en el tramo inferior del río Luna y del río Omaña.

La zona en la que se basa esta investigación, como área fluvial, está compuesta por cantos rodados, tanto en el fondo del lecho fluvial como en las barras localizadas en el centro

4.6. ANÁLISIS PETROLÓGICO DEL MATERIAL TRANSPORTADO.

y márgenes del río, dentro del canal. A estos sedimentos debemos prestarles especial atención para conocer a fondo la dinámica fluvial.

Los materiales que forman las barras, que son más groseros, y los que forman las llanuras de inundación, que son los más finos, pueden sufrir removilización esporádica en repetidos ciclos erosivos - deposicionales.

En el caso del río Luna, en las barras laterales y centrales no se encuentra material fino entre el material de gran tamaño (figuras 4.9, 4.10). Aunque es común que se mezclen distintos tamaños de depósitos.

Se han recogido muestras del material transportado en distintos puntos del río Luna (figura 4.11) para analizarlos y compararlos con los datos bibliográficos de las formaciones situadas aguas arriba, siguiendo los pasos relatados en el apartado 3.

El muestreo ha sido alternativo, con muestras del fondo del lecho, barras laterales y muestras de la llanura de inundación, con muestras de distintos tamaños. Lo primero que cabe destacar es la selección de los cantos en las áreas visitadas. Como se observa en las figuras 4.9 y 4.10 se trata de material grueso de unos 3 a 20 centímetros, con una esfericidad media que va en aumento cuanto más abajo la estudiemos, y una buena redondez.

En muestra de mano.

A continuación realizaremos una descripción más detallada en cada punto del muestreo, con las características analizadas en muestra de mano. En ambos ríos los resultados obtenidos son los mismos, por lo que se comentarán juntos.

Las muestras de la parada 1 son un material bien clasificado y bien redondeado, con una esfericidad alta (entre 0.93 y 0.95). Los cantos no presentan orientación y son grano-soportados. Los cantos tienen unos 12 cm de media. Para determinar la geometricidad [91] de los depósitos fluviales de estos puntos, se han medido las diagonales A, B y C para calcular las relaciones B/A (índice de elongación) y C/B (índice de achatamiento). El resultado clasifica las muestras como esferas clase II. La redondez ha sido analizada según los criterios de Krumbein [54], obteniendo unas medidas de 7 y 8, y Powers [77], clasificando los clastos como subredondeados. En la parte inferior del cauce, los cantos rodados son supermaduros texturalmente hablando, sin matriz.

Las muestras de la parada 4 y 5, aunque han sido recogidas en distintos ríos siguen una tendencia única (ver figura 4.12), están compuestas por un material medianamente clasificado comparando los resultados con Compton [25], redondeado y con una esfericidad media - alta (0.91 - 0.93). Los cantos no presentan orientación y son grano-soportados. El material tiene medidas muy diferentes, entre 5 y 30 cm aproximadamente. La geometricidad se ha calculado siguiendo el diagrama de Zingg [91] y la mayoría de muestras son oblados, clase III. La redondez ha sido analizada según los criterios de Krumbein [54], una escala para clastos psefíticos, y los clastos encontrados son bien redondeados en su mayoría, aunque algunos clastos hallados son redondeados (números 5 y 6). Todos estos puntos indican que, a esta altura del río, los cantos rodados son submaduros, sin matriz y con clastos angulosos.

Son cantos extracuencales por su composición química. Pasamos ahora a describir las muestras tanto en mano como al microscopio.

Las muestras recogidas del lecho fluvial en todas las paradas son cuarcitas blancas, con pocos tonos grises claro o azulados, fuertemente cementadas por cuarzo, de grano fino o muy fino. Se observan, en algunas muestras de ambas paradas, pequeños minerales rojos

que determinaremos con las láminas delgadas. No se observan estratificaciones cruzadas ni laminaciones paralelas al ser únicamente cantos separados del área fuente. En una de las muestras recogidas en la parada 1 se aprecia hematites desarrollado dentro de la porosidad, cerca de la superficie. Esta formación es posterior al arranque y transporte del canto, es decir, se ha formado durante su estancia en el río, por acción de las aguas superficiales.

Por otra parte, las muestras cogidas del camino en el margen izquierdo (figura 4.12, paradas 2, 3 y 6) del río son muy distintas entre sí, aunque la mayoría son muestras de cuarcitas como las del río. La muestra 3 es un conglomerado - brecha (formado por cantos angulosos) masivo e isótropo, sin distribución ni orientación preferencial de los componentes, con matriz calcárea. Como está formada por clastos de cuarzo en su mayoría, es una brecha cuarcítica. Está bien clasificada. Su madurez mineralógica es alta, ya que cuenta con minerales muy estables. La muestra 2 es una cuarcita como las que encontramos en el interior del río.

La variación de los tamaños de grano (tabla 4.6) con la distancia de transporte es producto de la selección hidráulica o transporte selectivo, la abrasión y los procesos de meteorización y corrosión. El redondeo de las formas se debe al transporte de tracción o de fondo, el más efectivo, y es más importante en rocas de gran tamaño de grano. Sin embargo, los clastos laminados suelen transportarse por suspensión.

Las muestras recogidas en todos los puntos recalcan la intensidad del transporte, debido a la nula cantidad de matriz encontrada y la composición química de la mayoría de las muestras, ya que el cuarzo no se erosiona con facilidad (como se indica en la serie de estabilidad mineral de Goldich [44]).

Cabe destacar que en el caso de transporte lineal (como es el caso), la redondez aumenta con la distancia de la siguiente forma: en los primeros metros aumenta muy rápidamente mientras que después tiende a estabilizarse.

De las muestras recogidas, se han seleccionado doce para analizar en el laboratorio (figura 4.12) mediante el estudio de su lámina delgada. Una vez hecho, podremos comparar con los trabajos bibliográficos y obtener el origen o área fuente de dichos materiales.

En lámina delgada.

En el microscopio petrográfico, las cuarcitas presentan textura granoblástica sin microfósiles. Todas las muestras analizadas están compuestas por más de un 85 % de cuarzo junto con otros minerales de menor cantidad. En las muestras se observan los característicos límites entre cristales de cuarzo de 120° , aunque los granos son subeuhedrales y sin foliación. Muchos de los granos presentan extinción ondulante (figura 4.14). En la mayoría de casos el cuarzo está recrystalizado (por ejemplo, en la muestra RL-P2-M3), formándose inclusiones dentro de otros cristales.

La variedad de tamaños de cristales en las rocas estudiadas se puede dividir en dos familias de tamaños principales. El más pequeño de ellos está presente en las muestras P1-M2, P1-M2a, C-P1-M1 y P2-M4, mientras que el resto de muestras se compone de los cristales mayores. Sin embargo, en la muestra P2-M4 es posible ver una vena de cuarzo que cruza la cuarcita, con un tamaño de cristal mayor que el que del resto de muestra (figura 4.13).

Las cuarcitas contienen minerales accesorios como lo son la biotita, moscovita, turmalina (figura 4.15) y microclina (aunque en menor medida que los anteriores, figura 4.13). La biotita es el mineral más común de todos, ocupando aproximadamente el 5 % de las mues-

4.6. ANÁLISIS PETROLÓGICO DEL MATERIAL TRANSPORTADO.

tras. También contiene minerales opacos en lámina delgada en las rocas, incluyendo piritas anhedral. El cuarzo, como se ha comentado, es el mineral más abundante en las muestras analizadas.

En una de las muestras de la llanura de inundación (C-P1-M3) está formada por diferentes clastos de cuarcita entre matriz calcárea (aproximadamente el 30 %, figura 4.13), formando una textura porfidoblástica. Además, algunos clastos son de pizarras. Es decir, estamos frente a un conglomerado formado con cantos antiguos de cuarcitas y pizarras.

Interpretación y discusión de los resultados.

Los resultados obtenidos se han analizado comparándolos con la descripción de las formaciones geológicas que afloran aguas arriba, con objeto de conocer la procedencia del material. En el mapa geológico (hoja núm. 102, MAGNA, Suárez *et al.*, 1991) aparecen muchas formaciones pero solo las formaciones Barrios y San Pedro pueden ser el área - fuente de estos depósitos fluviales por su litología, aunque geográficamente es más probable que provengan de la formación Barrios.

Los datos se han comparado con las descripciones de artículos previos, como [56], [32], [5] [4] [7] [88].

La formación Barrios [26] ha sido descrita por Toyos y Aramburu [88] como cuarzoarenitas, con granos finos y muy finos, muy cementadas con cuarzo (cuarcitas) y con intercalaciones de pizarras grises y verdosas [6]. Estas cuarcitas contienen minerales como turmalina y circones, incluso glauconitas [32].

Estos autores comentan las características del miembro La Matosa dentro de la formación Barrios, siendo esta compuesta por unas cuarcitas de grano fino en la base y unas cuarcitas con grano medio en el techo [7]. La edad de este miembro es Cámbrico Medio - Superior [56].

Las muestras analizadas cumplen con todas estas características: son cuarcitas compactas sin matriz calcárea, con minerales accesorios como microclina, biotita, piritas y turmalina. Además, coincide con los colores descritos.

El miembro La Matosa es el único presente en el área de estudio, por lo que los depósitos pertenecen a este miembro (figura 4.16). Comparando su localización actual con el área - fuente en el mapa geológico de la zona, se concluye que los depósitos se han transportado a lo largo de unos 35 km por el río Luna (25 km en línea recta, aproximadamente). Aunque con solo el estudio de las muestras no es posible conocer si este viaje lo han realizado de una vez o en distintos episodios.

Figura 4.1: Imagen satélite donde se observa la localización de las estaciones consultadas y el área de estudio (marcada en amarillo).

4.6. ANÁLISIS PETROLÓGICO DEL MATERIAL TRANSPORTADO.

Figura 4.2: Tipos de masas de agua superficial en la cuenca del Duero [?].

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS HIDROGEOMORFOLÓGICO

FECHA	CAUSA	RÍOS
11/13-2-1985	Temporal de lluvias y deshielo.	Órbigo
15/26-12-1989	Temporal de lluvias y viento.	Órbigo
24/31-12-1995	Temporal de lluvias y deshielo.	Órbigo
3/16-1-1996	Temporal de lluvias, viento y deshielo.	Órbigo
20/30-1-1996	Temporal de nieve y viento. Lluvias.	Órbigo
8/9-11-2000	Temporal de lluvias.	Órbigo
6/12-12-2000	Temporal de lluvias y viento.	Órbigo
2/16-1-2001	Temporal de nieve y lluvias. Fuertes vientos y deshielo.	Órbigo
25/31-1-2001	Temporal de nieve y lluvias. Fuertes vientos. Desembalse Barrios de Luna.	Órbigo, Luna
6/11-2-2001	Temporal de lluvias.	Órbigo
28-2/8-3-2001	Temporal de nieve y lluvias. Deshielo. Desembalse Barrios de Luna.	Órbigo, Luna
03-07	Temporal de lluvias.	Órbigo
03-13	Temporal de lluvias.	Omaña, Órbigo
04-14	Temporal de lluvias y deshielo.	Omaña, Órbigo
01-16	Temporal de lluvias.	Omaña

Tabla 4.4: Registro de inundaciones ocurridas en los ríos que conforman la zona de estudio. Modificado de [69].

ORDEN	Ni LUNA	Ni OMAÑA	Rb LUNA	Rb OMAÑA
10	-	1	-	-
9	1	2	-	2
8	7	3	7	1.5
7	19	12	2.71	4
6	93	46	4.89	3.83
5	274	227	2.95	4.93
TOTAL	394	291	4.38	3.25

Tabla 4.5: Números de canales según el orden de Strahler y la relación de bifurcación en las subcuencas de los ríos Luna y Omaña.

4.6. ANÁLISIS PETROLÓGICO DEL MATERIAL TRANSPORTADO.

Figura 4.3: Mapa de riesgo de inundaciones, donde se muestra el ARPSI que contiene el área de estudio. Modificado de [?].

Parada	1 Luna	2, 3, 4 Llanura	4 Luna, 5 Omaña
Clasificación	Bien	Bien	Media
Tamaño (cm)	12	7	5-30
Redondez	Bien	Bien	Medio
Esfericidad	Alta	Media-alta	Media-alta
Geometría	Esfera	Oblado	Oblado
Textura	Supermaduro	Maduro	Submaduro

Tabla 4.6: Tabla comparativa de los resultados obtenidos en análisis macroscópico de las muestras.

Figura 4.4: Zona de estudio en la ortofoto de 1945-1946. [59]

Figura 4.5: Zona de estudio en la ortofoto de 1956-1957.

4.6. ANÁLISIS PETROLÓGICO DEL MATERIAL TRANSPORTADO.

Figura 4.6: Zona de estudio en la ortofoto de 1973-1986 [59]

Figura 4.7: Zona de estudio en la ortofoto de 2014 [59].

4.6. ANÁLISIS PETROLÓGICO DEL MATERIAL TRANSPORTADO.

Figura 4.8: Recorte del mapa nº 7 del Plan Hidrológico (extraído de [59]). El mapa completo se puede consultar en Anexos.

Figura 4.9: Imagen tomada en la parada 1, donde se aprecia el tamaño de los cantos del lecho fluvial y de la barra central.

Figura 4.10: Imagen tomada en la parada 2, donde se aprecia el tamaño de los cantos del lecho fluvial y de las barra central con el martillo geológico como escala.

4.6. ANÁLISIS PETROLÓGICO DEL MATERIAL TRANSPORTADO.

Figura 4.11: Situación de las paradas donde se han realizado los muestreos.

Figura 4.12: A) Muestras seleccionadas para estudiar al microscopio. B) Rompiendo cantos de la parada 1 del río Luna para estudiarlas. C) Fotografía tomada en la parada 2 (río Luna) para ver los tamaños de los cantos depositados en el lateral. D) Muestras de mano recogidas en distintos puntos, donde se observan en corte fresco.

4.6. ANÁLISIS PETROLÓGICO DEL MATERIAL TRANSPORTADO.

Figura 4.13: A,B) Muestra 2 de la parada 1, vista al microscopio óptico en nícoles cruzados(A) y nícoles paralelos(B), con una ampliación de 20x, donde se aprecia la microclina. C) Muestra 4 de la parada 4, vista al microscopio óptico en nícoles cruzados, con una ampliación de 5x, donde se aprecia la diferencia de tamaños entre la vena de cuarzo y el resto de muestra. D) Muestra 3 tomada en el margen del río, vista al microscopio óptico en nícoles cruzados, con una ampliación de 2.5x, donde se pueden ver los clastos del conglomerado. Figura extraída de Martínez-Cantó e Hidalgo, 2017b

Figura 4.14: A) Muestra 4 de la parada 1, vista al microscopio óptico en nícoles cruzados, con una ampliación de 5x, con evidencias de recrystalización (bordes irregulares entre cristales, con ángulos de 120°). B,D) Muestra P1-M2a, en nícoles cruzados (B) y paralelos (D), con ampliación de 5x, donde se ve gran cantidad de minerales secundarios. C) Muestra C-M2, con cuarzo subeuhedral y anhedral y extinción ondulosa, en nícoles cruzados y 5x. Figura extraída de Martínez-Cantó e Hidalgo, 2017b.

4.6. ANÁLISIS PETROLÓGICO DEL MATERIAL TRANSPORTADO.

Figura 4.15: Muestra P1 - M1, en nícoles cruzados (A) y nícoles paralelos (B,C, D y E) cada 90°. Se puede observar turmalina en el centro.

Figura 4.16: Mapa indicativo del área de estudio (en amarillo) y el contacto sur del miembro La Matosa (previsiblemente, área fuente de las cuarzoarenitas).

Capítulo 5

ESTUDIO HIDRÁULICO

Con las técnicas de análisis hidrológico y geomorfológico y el empleo de herramientas matemáticas e informáticas, se consigue modelizar la respuesta de un sistema fluvial ante eventos hidrológicos extremos (crecidas y avenidas) y predecir cuantitativamente las consecuencias de las intervenciones antrópicas en su cauce y la cuenca que drena [14].

En este capítulo se han utilizado los datos anteriormente analizados para, por medio de ecuaciones matemáticas y con ayuda del software Iber (ver capítulo 3), calcular los niveles y velocidades de caudales asociados a distintas hipótesis de situación de los ríos (caudales normales, crecidas, etc.). De este modo, conocemos mejor su dinámica y podemos proponer medidas a tomar en el caso que fuese necesario.

5.1. Simulación numérica

5.1.1. Calibración del modelo

Con el fin de trabajar correctamente con el software y sintetizar el tiempo de procesado de la información, se ha calibrado el modelo. Este paso se ha hecho en una pequeña área en el municipio de Las Omañas por donde discurre el río Omaña (figura 5.1) se realizó en un área pequeña, para que no implicase mucho tiempo de computación. Para esta simulación se ha introducido un caudal en el río Omaña de $115,44 \text{ m}^3/\text{s}$, correspondiente al caudal máximo instantáneo medido el 2 de abril de 2014.

Por una parte, se han comprobado los resultados tanto con el lecho del río seco, como conteniendo una altura de agua similar a la de un caudal circulante medio ($5,03 \text{ m}^3/\text{s}$, $0,40 \text{ m}$). Se han elegido estas dos opciones de cálculo por ver si afecta el calado anterior en el caso de una avenida puntual y fuerte como el estudiado.

En el caso de las dos simulaciones, el resultado es prácticamente el mismo, de tal manera que se ha usado el tiempo de computación para definir si se tomará una condición inicial u otra en las siguientes ejecuciones del modelo. Así, en este caso, la simulación realizada en cauce seco tardó menos que la realizada en cauce lleno, definiéndose como condición a elegir, el cauce seco.

Por otra parte, el programa ofrece la posibilidad de calcular con diferentes esquemas numéricos, por lo que las simulaciones pueden realizarse según tres opciones: primer y segundo orden del esquema de Roe y el esquema DHD hidrológico (Decoupled Hydrological Discretization). Para calibrar el modelo se ha realizado la misma simulación con los tres esquemas

Figura 5.1: Área de estudio utilizada para calibración del modelo. Las Omañas. Se representa el calado calculado, siendo el máximo alcanzado 3,108 m.

de trabajo.

Los resultados, de nuevo, son exactamente iguales. En este caso viene explicado por la importancia de la resolución matemática del frente seco-mojado en casos de avenidas fluviales e inundaciones de las terrazas aluviales. Este frente siempre se resuelve en segundo orden, ver [21].

El tiempo de procesado, de nuevo, es la clave para tomar la decisión. Para el esquema de primer orden de Roe, el tiempo es de 20 minutos; para el de segundo orden, 23 minutos; y para el esquema DHD, 22 minutos. Por tanto, el esquema que se usará para las próximas simulaciones será el de Roe de primer orden.

Validación de la calibración

Una forma de comprobar si los resultados numéricos concuerdan con la realidad es realizar una validación del modelo en esta zona de aplicación. Esto se ha realizado según datos reales de la inundación producida en esa fecha. Para ello, contamos con fotografías realizadas a lo largo del 2 de abril de 2014 en la población de Las Omañas (ver figura 5.2) [64].

La altura de estas láminas de agua sobre la llanura de inundación que se ven en las fotografías son las que podemos medir y comparar con el resultado del modelo numérico (ver figura 5.3). De esta forma, y comparando con las medidas de Iber, obtenemos una tabla de comparación (ver tabla 5.1) en la que vemos que los datos son bastante aproximados.

En este caso, lo que más afecta a que no sean exactos es la precisión del instrumento de medida, una cinta métrica. Por tanto, tenemos una precisión en la medida directa del orden de 1 mm. En la tabla 5.1 también se presenta el error absoluto de cada par de medidas.

La medida directa expresada en la tabla 5.1 es una media aritmética, ya que para obtener cierta validez, sin conocer los resultados verdaderos, se han repetido las medidas tres veces. La dispersión entre estas medidas no es muy alta, entre 0.001 y 0.003 metros.

5.1. SIMULACIÓN NUMÉRICA

Figura 5.2: Fotografías tomadas el 2 de abril de 2014 y localización de las mismas.

FOTOGRAFÍA	EXPERIMENTAL (m)	NUMÉRICO (m)
2	1,145	1,1356
3	0,175	0,17895
4	0,185	0,18536
5	0,038	0,040616

Tabla 5.1: Tabla de validación de los resultados numéricos, donde se observa una diferencia mínima causada por la precisión distinta entre los métodos de trabajo.

Como se puede observar en las figuras 5.2, 5.3 y en la tabla 5.1, los resultados obtenidos numéricamente se adecuan a los resultados vistos en la zona de estudio el mismo día. Concluimos, por tanto, que las condiciones que hemos definido en el trabajo numérico son correctas y válidas para otras simulaciones en la zona.

5.1.2. Simulaciones y resultados

Por todo lo expuesto anteriormente, y para todas las simulaciones (cuyas características se detallan más adelante), se ha seguido el mismo esquema de trabajo con el programa, de modo que se garantice la comparación de resultados. Estas condiciones son las que se detallan a continuación.

- La importación del modelo digital del terreno - MDT (con una resolución de 25 cm) mediante RTIN con tolerancia de 0.2 cm, máximo 200 cm. y mínimo 10 cm.

Figura 5.3: Localización de los puntos de control y resultados numéricos obtenidos.

- La condición de caudal constante.
- La condición inicial de que todo está seco.
- Introducción de la rugosidad de forma manual.
- Mallado de forma estructurada, con relación 1:2 entre los elementos de la geometría y los elementos de la malla.
- Inclusión del puente sobre el río Luna.

Para la rugosidad, que se ha definido manualmente como se ha comentado anteriormente, se han definido ocho áreas diferentes (ver tabla 5.2), obteniendo la figura 5.4, para dar mayor rigurosidad, ya que el mapa de usos del suelo no tiene la definición suficiente en la zona de estudio (ver figura 5.5).

Se han realizado cuatro simulaciones en Iber utilizando diferentes datos obtenidos del Sistema Automático de Información Hidrográfica (SAIH) y de la Red Oficial de Estaciones de Aforo (roeA), tal y como se ha comentado en el capítulo 3.

Para la primera simulación se han utilizado los datos de caudal medio anual, calculado a partir de los registros de caudal medio de cada año. En esta simulación se pretende conocer el comportamiento del agua, es decir, si sigue el cauce natural del río o si ya sufre alguna desviación al encontrarse con alguna zona de debilidad. Los caudales introducidos en el programa son: el caudal del río Omaña, $8,30m^3/s$, y el caudal del río Luna, $14,58m^3/s$. El resultado obtenido se puede observar en la figura 5.6.

5.1. SIMULACIÓN NUMÉRICA

Río	0,025
Suelo desnudo	0,025
Arena / arcilla	0,08
Vegetación dispersa	0,18
Vegetación densa	0,18
Infraestructura	0,020
Edificios aislados	0,0
Residencial	0,15

Tabla 5.2: Datos de rugosidad impuestos en el software para todas las simulaciones. Estos datos se extraen de la cartografía disponible en abierto por la Junta de Castilla y León y los propios valores de Iber respecto a cada uso del suelo.

También se ha simulado con los datos de caudal máximo instantáneo del año hidrológico 2000-2001. Se han elegido por tener el mayor caudal punta registrado en los últimos 30 años y por ser los datos de un periodo de retorno de 100 años. Los resultados se compararán con los de la simulación anterior. Los datos introducidos son el caudal del río Omaña, $141m^3/s$, y el caudal del río Luna, $87,50m^3/s$. Los resultados se pueden apreciar en la figura 5.7.

Además, se han introducido los datos de caudal máximo instantáneo del año hidrológico 2013-2014, correspondiente al episodio del 2 de abril de 2014. En este caso las lluvias se unieron al deshielo de las últimas nevadas importantes que cayeron la semana anterior. El desastre duró varios días. Los datos trabajados son el caudal del río Omaña, $115,44m^3/s$, y el del río Luna, $148,02m^3/s$. Es un episodio extraordinario ya que el río Luna registraba mayor caudal que el río Omaña. Los resultados se pueden ver en las figuras 5.8, 5.9, 5.11 y 5.10.

Otra simulación que se ha realizado ha sido con los datos de caudal máximo instantáneo registrado en cada uno de los ríos, siendo de años diferentes. Se ha realizado esta modelización ideal para conocer el alcance de una avenida máxima y los tiempos de respuesta que la población tendría en un caso de estas características. Los caudales introducidos son el del río Omaña, $192,03m^3/s$, registrado en el año hidrológico 1995-1996 y el del río Luna, $148,02m^3/s$, registrado en el año hidrológico 2013-2014. Los resultados están presentes en las figuras 5.12, 5.13 y 5.14.

Para cada una de estas simulaciones se han trabajado dos áreas distintas: la más pequeña, de unos $4 km^2$, incluye la confluencia de ambos ríos para ver el comportamiento de los mismos en ella; mientras que la más grande, de unos $18 km^2$, se centra en la zona aguas arriba, donde se pueden ver mejor la influencia de las inundaciones en las zonas urbanas. Los tiempos de simulación son distintos para cada una de las áreas estudiadas. En las de la zona de confluencia (como las figuras 5.7 y 5.13), el tiempo máximo es de 1 hora, con resultados cada minuto para poder conocer bien el comportamiento de los ríos. Por el contrario, en la zona aguas arriba (como las figuras 5.9 y 5.6), se ha determinado un tiempo máximo de 4 horas (por la longitud del área) y unos pasos intermedios de 30 minutos debido al aumento significativo del tiempo de cálculo.

Aunque en el calibrado del modelo ya se ha trabajado con las tres opciones de cálculo de Iber, se ha realizado el mismo proceso para la simulación número 3, con los datos del 2 de abril de 2014, para comprobar que la opción elegida sigue siendo la mejor en un área tan grande. De esta forma tenemos los siguientes tiempos de cálculo: mediante Roe de primer

Figura 5.4: Datos de rugosidad mediante coeficiente de Manning.

orden (figura 5.8) se tardan 2h de tiempo, con Roe de segundo orden (figura 5.15) se tardan 6 horas y con DHD (figura 5.16), 2:30h. Los resultados, como se aprecia en las figuras mencionadas, son prácticamente iguales. Por esta razón, para el resto de simulaciones, se ha comprobado que es mejor seguir trabajando con el método de Roe de primer orden.

5.2. Análisis de los resultados

En este apartado se van a comentar los resultados de cada simulación para, posteriormente, comparar los resultados entre ellas y discernir a qué se deben y si siguen la lógica científica.

5.2.1. Caudal medio

La primera salida de agua en el modelo tiene lugar en el 2160 s, es decir, 36 minutos después de que empiece a entrar agua en el sistema. En los últimos pasos del cálculo el caudal de salida se estabiliza, lo que indica que con este tiempo de simulación es suficiente para ver el alcance de los datos, siendo los reales en esta situación normalizada de comportamiento de los ríos.

Comparando las instantáneas del instante 2160 s y 3600 s se obtiene que en ambas hay varios puntos donde el agua se ha desbordado saliéndose de su cauce. Teniendo en cuenta que se trata de la simulación del caudal medio de los ríos implicados este resultado es algo que afectará negativamente a las crecidas y que no debería ocurrir, los cauces deben estar preparados para albergar el caudal medio de sus ríos. Una posibilidad de su causa es la limpieza deficiente o incorrecta de los cauces. Estos puntos de desbordamiento están

5.2. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Figura 5.5: Extracto del mapa de cultivos y aprovechamientos 2000-2010, consultado en el visor SIG del MAGRAMA.

principalmente en el río Omaña, en la confluencia y nacimiento del río Órbigo, y aguas abajo el río Luna.

5.2.2. Caudal máximo instantáneo año hidrológico 2000-2001

La simulación realizada tiene en el segundo 840 la primera salida de agua. Se estabiliza el cálculo en el segundo 2500, cuando la salida de agua es prácticamente la misma hasta el final de la simulación en el segundo 3600.

En los primeros segundos de modelización se observa cómo el río Omaña ya se desborda en su inicio hacia el sur, mientras que el río Luna se desborda hacia el oeste siendo en el tercer minuto de simulación donde ya alcanza la carretera en dos puntos (en el puente dónde cruza el río y unos metros más al oeste), dejándola inutilizable durante el resto de la hora que dura la simulación. Esto nos indica el peligro que corren los vecinos si intentan pasar por esa carretera o si están cerca.

La velocidad que lleva el agua en el primer minuto llega a alcanzar $5,89m/s$ en el seno del río Omaña y $4m/s$ en el río Luna. Esta diferencia está provocada por varias cosas, entre ellas la cantidad de agua que lleva un río y el otro. El río Luna, al estar regulado por el embalse de Barrios de Luna, lleva menos cantidad y su recorrido es más plano que el el río Omaña.

Por este hecho, el agua del río Omaña alcanza la confluencia de los dos ríos mucho más rápido que el agua que descende por el Luna (en el segundo 720 frente al segundo 900). Esto provoca que el agua, en la confluencia, no sólo vaya hacia el sur siguiendo el trazado del río Órbigo, sino que vaya, en menor medida, hacia el norte en busca del Luna. La topografía, plana y sin apenas vegetación, es la causante de este hecho.

Ya en el último paso de la simulación, tras una hora desde la entrada de agua, se observa que los ríos se han desbordado hacia todos los lados, siguiendo líneas de menor resistencia como son carreteras, caminos, diferentes tipos de vegetación y antiguas zonas de inundación. En este punto lo que más preocupa es la situación del río Luna con respecto a la carretera

Figura 5.6: Simulación con los datos medios. Se representa el calado en el paso 3600s de la simulación.

que da acceso a Santiago del Molinillo y la afección a las tierras cercanas al pueblo.

El río sigue pasando por encima de esta carretera en varios puntos al lado del puente porque tiene muy poca altitud, por lo que queda inservible. Además, viendo el mapa no hay otra carretera que cruce hacia el este desde la población, por tanto, queda suspendido el tráfico. En este caso, se propondría elevar la carretera a su paso por la zona inundable del río Luna, en los bordes del puente.

En cuanto a la afección a casas y campos, en el último paso de la simulación se ve claramente como quedan inundados los terrenos desde el río Luna hacia el oeste, hasta los invernaderos, es decir, unos 260 metros de lámina de agua de unos 0.4 metros de altura media, aunque disminuye cuanto más cerca está del pueblo. En la parte sur del pueblo también ocurre lo mismo, las primeras casas hacia el este, hacia el lado del río Luna, también están fuertemente amenazadas por el agua. Estudiando los tiempos de la simulación, se puede establecer los tiempos de respuesta que tiene la población. Para el caso de las casas más al norte y los invernaderos, en el segundo 540 deben estar evacuados para garantizar que no tienen problemas. Para este tipo de avisos se toma como referencia que la simulación empieza 100 metros aguas arriba del puente. De este modo, 10 minutos después del pase de la avenida por ese punto, las casas más al noreste estarán inundadas.

5.2.3. Caudal máximo instantáneo año hidrológico 2013-2014

Como se ha dicho anteriormente (3), el río Luna tiene mayor caudal que el Omaña, pese a que debería estar regulado por el embalse. Esto, de por sí, nos indica que la regulación en estos momentos no es la correcta ya que vierte al medio mucha más agua de la que puede asimilar. Para comprobar esta hipótesis y lanzar una propuesta de mejora de gestión se debe analizar conjuntamente con los datos de salida de agua, en m^3/s , del embalse de Barrios de Luna para el año hidrológico 2013-2014. Estos datos no nos han sido facilitados pese a

5.2. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Figura 5.7: Simulación con los datos del año hidrológico 2000-2001. Se representa el calado en el paso 3600s de la simulación.

pedirse por los cauces oficiales (ley de información ambiental, ley 27/2006 de 18 de julio).

Según la simulación, las zonas inundables están de media bajo una lámina de agua de 0.6 metros, aunque en las inmediaciones del pueblo es menor, entre 0.01 y 0.4 aproximadamente. Por su parte, la velocidad máxima alcanzada es de $8,0264\text{m/s}$ en los puntos internos de los cauces, al igual que con los datos del año 2000-2001. La velocidad media es de $2,675\text{m/s}$. Estos datos se corresponden con lo que cabría esperar, ya que este episodio es más fuerte que los ocurridos en el año 2000-2001 y los resultados obtenidos así lo demuestran (mayor velocidad alcanzada, mayor terreno inundado, mayor lámina de agua, etc.).

Tal y como sucede en el caso anterior, en los primeros minutos ya se produce la inundación de terrenos secos fuera del cauce en ambos ríos. La carretera que da acceso a Santiago del Molinillo queda inutilizada desde los primeros momentos. Este hecho se extiende en el tiempo durante toda la simulación.

Como se ve en las imágenes, en el paso 240 s, a los 4 minutos, ya se ven amenazadas las primeras casas y los invernaderos, aunque las casas del pueblo se ven afectadas a los 14 minutos. Esto nos lleva a proponer una evacuación temprana inmediatamente se detecte el riesgo en las zonas de campo más cercanas al río, y una evacuación pasados los primeros cinco minutos para las casas del pueblo. Comparando estos tiempos con los tiempos de respuesta de la simulación del año hidrológico 2000-2001, comprobamos que la avenida del episodio del 2 de abril de 2014 es la más fuerte de los últimos años.

También aquí el agua del río Omaña alcanza la confluencia de los dos ríos mucho más rápido que el agua que desciende por el Luna. La topografía plana, que apenas haya vegetación, junto con la regulación que ejercen los embalses en las aguas del Luna, provocan este hecho.

Los resultados de esta simulación se han validado, al igual que sucede con la calibración del modelo, con fotografías tomadas en la población de Santiago del Molinillo a lo largo del día que se simula, 2 de abril de 2014. De este modo, en las figuras 5.17, 5.18 y 5.19, se puede

Figura 5.8: Simulación con los datos del año hidrológico 2013-2014. Se representa el calado en el paso 3600 s de la simulación.

heightNº Fotografía	Simulación (m)	Experimental (m)
1	0,114	0,12
2	0,074	0,08
3	0,385	0,38
4	0,332	0,34
5	0,449	0,45

Tabla 5.3: Comparativa de los resultados numéricos obtenidos en Iber y en campo de las inundaciones sufridas en Santiago del Molinillo, abril 2014.

comprobar la correcta definición del modelo y de los resultados numéricos calculados con Iber (tabla 5.2.3).

5.2.4. Caudal máximo instantáneo registrado

La simulación, en su último paso, alcanza la mayor extensión de terreno inundado de todas las simulaciones. El río Luna se desborda casi 400 metros hacia el oeste de forma que las primeras casas quedan anegadas. Este hecho lo podemos dividir en dos partes, la primera se produce a los 5 minutos cuando el agua alcanza los invernaderos, y la segunda tiene lugar a partir del minuto 13 cuando se alcanzan las casas del pueblo. Esto deja poco margen a la evacuación, ya que si alguien se encuentra en los invernaderos tendrá que salir inmediatamente tras escuchar el aviso, en dirección oeste y los demás vecinos deberán hacerlo en los primeros 5-7 minutos. El calado medio de la inundación de la zona hasta el pueblo es de 0,37 metros.

Además de estas inundaciones, también se provocan otras más al sur en el curso del río Luna hacia el este, llegando a alcanzar 300 metros. El río Omaña, por su parte, se desborda

5.2. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Figura 5.9: Simulación con los datos del año hidrológico 2013-2014, con un área de 18 km^2 . Se representa el calado en el paso 14400 s de la simulación.

hacia el sur unos 310 metros. Estas inundaciones son posteriores ya que están situadas aguas abajo. En la simulación se ve claramente que, en el momento del registro de la primera salida de caudal, en el río Órbigo no se han producido, aunque sí se registran las inundaciones de la zona más alta (población y río Omaña). Estas inundaciones no afectan a edificaciones pero sí a caminos vecinales y terrenos de aprovechamiento particulares, por lo que, si una avenida de este tipo ocurriese, los vecinos verían mermada su cosecha y, por ende, las ganancias de su trabajo.

La velocidad máxima alcanzada es de $8,023 \text{ m/s}$ en puntos del centro de los cauces principales, aunque la velocidad media es de $2,6744 \text{ m/s}$. Esta diferencia es debida a las distintas profundidades que tiene el cauce, los materiales sobre los que discurre el agua y la pendiente.

Figura 5.10: Simulación con los datos del año hidrológico 2013-2014. Se representa la velocidad en el paso 3600 s de la simulación.

Figura 5.11: Simulación con los datos del año hidrológico 2013-2014. Se representa el caudal específico en el paso 3600 s de la simulación.

5.2. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Figura 5.12: Simulación con los datos máximos registrados de caudal instantáneo en las cuencas. Se representa el calado en el paso 3600 s de la simulación.

Figura 5.13: Simulación con los datos máximos registrados de caudal instantáneo en las cuencas. Se representa la velocidad en el paso 3600 s de la simulación.

Figura 5.14: Simulación con los datos máximos registrados de caudal instantáneo en las cuencas. Se representa el caudal específico en el paso 3600 s de la simulación.

Figura 5.15: Simulación con los datos del año hidrológico 2013-2014 calculado según el método de Roe de 2º orden.

5.2. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Figura 5.16: Simulación con los datos del año hidrológico 2013-2014 calculado según el método DHD o hidrológico.

FOTO. 1

FOTO. 2

FOTO. 3

Figura 5.17: Fotografías tomadas por los vecinos durante el episodio del 2 de abril de 2014 en Santiago del Molinillo.

FOTO. 4

FOTO. 5

Figura 5.18: Fotografías tomadas por los vecinos durante el 2 de abril de 2014 en Santiago del Molinillo.

5.2. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Figura 5.19: Situación de las fotografías tomadas por los vecinos durante el 2 de abril de 2014 en Santiago del Molinillo.

Capítulo 6

PROPUESTA DE MEDIDAS DE DEFENSA

En todo plan o estudio de gestión del riesgo de inundación, es esencial dedicar una parte al programa de medidas a tomar, tal y como se especifica en el artículo 11.5 del Real Decreto 903/2010. Estos programas son el conjunto de actuaciones a llevar a cabo por la administración competente en cada caso, y deben tener en cuenta aspectos pertinentes tales como los costes y beneficios, la extensión de la inundación y las vías de evacuación, las zonas con potencial de retención de las inundaciones, las llanuras aluviales naturales, la gestión del suelo y el agua, la ordenación del territorio, etc. [47]

En el “Libro blanco del agua” de España se detallan más concretamente las actuaciones que deberían realizarse contra las inundaciones:

- Coordinación entre las distintas administraciones.
- Descentralización según el orden de las áreas inundables.
- Separación de daños en programas específicos para la reducción del número de víctimas (que incluyen las actuaciones en la red viaria y los sistemas de previsión y alerta) y en programas para la reducción de daños agrícolas (con creación de seguros agrarios).
- Realismo para fijar los umbrales de protección estructural.
- Respeto al medio ambiente potenciando las medidas de tipo no estructural, buscándose las soluciones menos agresivas en las medidas estructurales si fuesen necesarias.
- Prevención, de forma que se evite la ocupación urbana de zonas inundables.
- Transparencia para divulgar los mapas de riesgo entre los ciudadanos.

Debemos tener en cuenta, como dice el documento editado por la UNESCO (2013) *Flood risk management: a strategic approach*, que la protección absoluta no es posible y que se deben proponer un conjunto de respuestas para que sea más completa. Además, es posible que algunas inundaciones se deban promover como algo deseable.

Para poder conocer qué tipo de medidas impulsar se debe conocer el nivel del agua (calado), la velocidad, la duración de la inundación y el tiempo de respuesta. Todo esto se

ha descrito anteriormente (ver capítulo 5, por lo que ya se conocen las características de la cuenca y se está en disposición de proponer las medidas necesarias).

En este capítulo de la tesis se describen las medidas no estructurales que se pueden y deben aplicar en la zona, así como en proponer algunas medidas estructurales realistas.

6.1. Medidas no estructurales

En los últimos años se han comenzado a emplear las medidas no estructurales con mayor ahínco. Éstas son empleadas para limitar los efectos de las inundaciones, es decir, no actúan sobre la avenida en sí ni alteran sus características hidrológicas o hidráulicas sino que modifican la susceptibilidad de la zona inundable frente a los daños por inundación [31] [10] [16] [11].

Estas medidas se pueden clasificar en diferentes grupos:

- Modificación de la susceptibilidad al daño de las estructuras existentes, que engloba la ordenación territorial de las zonas inundables.
- Control del futuro desarrollo en la zona inundable, incluyendo la cartografía de riesgos y la comunicación.
- Mejora de la respuesta frente a las inundaciones mediante mecanismos de previsión, que cuenta con el sistema de alerta temprana, el plan de emergencia, la previsión de inundaciones y los seguros.

Este tipo de medidas no necesitan, a priori, de un presupuesto directo de inversión asociado, normalmente se integran en los presupuestos ordinarios de las distintas administraciones implicadas [13].

A continuación se detallan las propuestas de este tipo de medidas, para realizar en la zona estudiada por las autoridades competentes.

6.1.1. Cartografía de riesgos

Se entiende por cartografía de riesgos aquella que refleja, a una escala adecuada, la peligrosidad de cada zona frente a las inundaciones. Para ello se caracteriza la frecuencia, la magnitud de los calados y las velocidades provocadas. En este sentido, la administración local debe participar en los trabajos cartográficos.

En el caso estudiado, la cartografía de riesgo ha sido realizada por la Confederación Hidrográfica del Duero, a escala 1:650000 (ver 6.1), tal y como marca el RD 903/2010 que debe de hacerse. Por tanto, se han delimitado las zonas inundables y se han elaborado los mapas de peligrosidad y riesgo de inundación como aspectos clave de la gestión del riesgo de inundación.

La obtención de los mapas de peligrosidad se realiza mediante una modelización hidráulica cuya finalidad principal es obtener los valores de calados y velocidades en cualquier punto de la zona de estudio para las avenidas que se han considerado [?]. Estos mapas se han confrontado con los usos del suelo existentes, para tener en cuenta la vulnerabilidad de los terrenos inundados y el diferente valor del riesgo que implica su inundación.

6.1. MEDIDAS NO ESTRUCTURALES

Figura 6.1: Extracto del mapa de riesgos elaborado por la Confederación Hidrográfica del Duero, con zoom en la zona de estudio.

En lo referente al índice de riesgo en el Plan Hidrológico de Cuenca, entre las ARPSIs (áreas de riesgo potencial significativo de inundaciones) más afectadas está la numerada como 5: Órbigo - Tuerto - Duerna (figura 6.2).

Aprovechando los cálculos realizados en el capítulo 5, se ha obtenido el mapa de peligrosidad de inundación del área concreta de estudio (ver figura ??), con una escala más detallada, para el conocimiento de las autoridades y vecinos y la concreción de las propuestas.

6.1.2. Ordenación territorial

Para controlar que el futuro desarrollo urbanístico no interfiera y cree más riesgo, se zonifica la llanura de inundación y se limitan los usos del suelo en las zonas inundables. Esto debe realizarse desde la administración local o, en el caso de que no fuese necesario, debe acogerse a las normativas supramunicipales pertinentes [71].

La ordenación territorial tiene que ser compatible con los planes de gestión del riesgo de inundaciones [19]. Estos planes tienen que delimitar claramente las zonas inundables [67]. Además, las actuaciones urbanísticas deben ir acompañadas de un informe de sostenibilidad ambiental que incluya un mapa de riesgos naturales [73] como los realizados en esta

Figura 6.2: Mapa con localización de las ARPSI del área estudiada, elaborado por la CH Duero.

investigación.

El ayuntamiento de Las Omañas, del que depende administrativamente el municipio de Santiago del Molinillo, no tiene en su ordenación municipal ningún tipo de normativa acerca de la ordenación del territorio ni sobre el riesgo de inundaciones. Esto puede ser así porque el municipio tiene menos de 1000 habitantes (plan de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones en la comunidad autónoma de Castilla y León, INUNCyL).

Sin embargo, siendo estrictos con esta normativa y los datos de riesgo de la zona calculados en la presente tesis y los facilitados por la Confederación Hidrográfica del Duero, el ayuntamiento de Las Omañas debería tener desarrollado un Plan de Prevención frente al riesgo de inundaciones, que incluyese una limitación en los usos del suelo, un sistema de alerta, una vía de evacuación, etc. Esto es debido a que INUNCyL recomienda la elaboración de un plan de Actuación Local frente a inundaciones a todos los municipios con nivel de peligrosidad A (es decir, “núcleos que están situados en llanuras de inundación en su totalidad o parte de los mismos, presentando una frecuencia de, al menos, 2 eventos desde 1959 y 15 o más en el histórico”) y a los de nivel de peligrosidad B (“núcleos situados total o parcialmente en la llanura de inundación que han presentado al menos 2 eventos desde 1959”) de más de 1000 habitantes.

Según los datos manejados en esta investigación, Las Omañas tiene menos de 1000 habitantes, pero está construida sobre la llanura de inundación y sí tiene una frecuencia de T=50 años y T=10 años, por lo que estaría dentro del nivel de peligrosidad A. De modo que es

6.1. MEDIDAS NO ESTRUCTURALES

Figura 6.3: Mapa de peligrosidad del área de estudio, basándonos en el Real Decreto 9/2008.

más que recomendable que el ayuntamiento elabore una Actuación Local frente al riesgo de inundaciones.

El contenido mínimo de estos planes está claramente descrito en el anexo IX de INUNCyL. Éste contendrá la descripción del escenario, con un croquis donde se señalen los principales edificios, los lugares de confinamiento (como gimnasios, polideportivos, iglesias...), consultorios médicos, situación de las unidades de emergencia (bomberos, Policía Local o Guardia Civil), cursos de agua y área potencial de inundación, situación de cotas más altas (mapa topográfico), vías de comunicación (carreteras, ferrocarril...); el catálogo de medios y recursos; y la organización operativa básica con las medidas de actuación y protección previstas (vigilancia del nivel de los cauces, señalización de tramos inundables en vías de comunicación, información a la población de las situaciones de riesgo, etc.), los grupos de emergencia y acción. Todo esto irá recogido en una ficha.

Por tanto, en este apartado se proponen algunas líneas a seguir en cuestión de ordenación del suelo, que no solo se centran en Santiago del Molinillo, sino que son de aplicación en otros muchos lugares con similar problemática, con el fin de evitar así futuros daños. Además, se propone una ficha técnica como la solicitada por INUNCyL para el plan de actuación local.

En la figura 6.4 se encuentra la situación actual, donde se puede ver la afección a vías de comunicación y edificaciones del área de inundaciones. La organización operativa básica del área de estudio se constituye por los grupos de emergencia y acción, que estarán compuestos por la Junta Vecinal, representantes del ayuntamiento y de las fuerzas del orden correspondientes, y de las medidas de actuación y protección previstas. Para estas últimas, además de las que se detallan a continuación, se organizará una vigilancia de cauces que dependerá de dos personas, vecinos de cada uno de los pueblos afectados. Estos vecinos llevarán un control visual y fotográfico del río todos los días. En días con riesgo de desbordamiento (por temporal o deshielo) se harán varias observaciones al día, preferentemente cada 2 horas. Estas observaciones se tomarán siempre en el mismo lugar. Esto complementará el sistema de alerta temprana. Otra de las actuaciones propuestas es la señalización de tramos inundables

Figura 6.4: Croquis que describe el escenario en el que nos encontramos (elaborado siguiendo las directrices de INUNCyL). En rojo se señalan edificios principales, en azul los ríos y cauces secundarios, en negro las principales vías de comunicación y en un polígono azul se incluye el área de inundación.

en vías de comunicación, incluyendo escalas para la indicación de la profundidad máxima del agua (tomando como ejemplo lo expuesto en el plan de acción territorial sobre Prevención del Riesgo de Inundación en la Comunidad Valenciana - PATRICOVA).

Además, es necesario tener unas limitaciones en cuanto al planeamiento urbanístico de las zonas con riesgo de inundación para asegurar los usos en los distintos tipos de suelo. Es por eso que el suelo no urbanizable (en adelante SNU) debe clasificarse como SNU de especial protección hidráulica, incluyendo este el Dominio Público Hidráulico. En estas zonas se prohíbe cualquier tipo de edificación así como la realización de obras de infraestructuras que sean vulnerables o puedan modificar negativamente el proceso de inundación, incrementando los daños susceptibles de producirse como consecuencia de la misma. En este sentido cabe destacar, a raíz de las observaciones de los vecinos y el ayuntamiento de Las Omañas, una actuación que se produjo el año 2000 en los terrenos agrícolas entre Mataluenga - Santiago del Molinillo - y el río Luna. Este año se dividieron esos terrenos para sacarles provecho agrícola, de forma que se construyeron muchos más caminos y se modificó el suelo. Esto ha provocado unas inundaciones más graves desde este año, a juicio de todos los encuestados.

6.1. MEDIDAS NO ESTRUCTURALES

Esta es una de las actuaciones que no deberían haberse realizado, a la luz de esta limitación propuesta.

Como limitaciones en el SNU, se prohíben los siguientes usos y actividades: viviendas, establos, granjas y criaderos de animales, estaciones de suministro de carburante, actividades industriales, establecimientos hoteleros y campamentos turísticos, parques zoológicos, servicios funerarios y cementerios, depósitos de almacenamiento de residuos y vertederos, plandas de valorización, centros de emergencia, centros escolares y sanitarios y pabellones deportivos.

En relación al suelo urbanizable o urbano, se prohíbe la instalación de nuevas edificaciones, sean del tipo que sean, a menos que se construyan en una zona sin riesgo de inundaciones. Además, es necesario que las infraestructuras ya existentes en la llanura de inundación pasen controles periódicos para asegurar que no corren peligro ante una nueva avenida. Estas edificaciones deberán cumplir un par de condiciones generales de adecuación:

- Se dispondrá de acceso a la cubierta o azotea a través de escalera desde el interior del inmueble para zonas con calado de inundación mayor a 70 centímetros.
- Los muros o vallas de cerramiento de parcelas serán permeables al flujo de agua.

Estas medidas se proponen para la ordenación territorial de cualquier área en riesgo de inundaciones.

6.1.3. Predicción y control de inundaciones y sistemas de alerta temprana

El Estatuto de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) tiene como una de sus funciones primordiales la elaboración, el suministro y la difusión de las informaciones meteorológicas y predicciones de interés general para los ciudadanos en todo el ámbito nacional, y la emisión de avisos y predicciones de fenómenos meteorológicos que puedan afectar a la seguridad de las personas y a los bienes materiales. Esto se hace diariamente para publicarse en la web a través de las redes y medios de comunicación por medio del sistema de alerta.

El Plan Nacional de Predicción y Vigilancia de Fenómenos Meteorológicos Adversos (Meteoalerta), de la AEMET, pretende facilitar según indica el Plan Hidrológico, la más detallada y actualizada información posible sobre los fenómenos atmosféricos adversos que puedan afectar a España hasta un plazo máximo de 60 horas de antelación. En ella, se considera fenómeno meteorológico adverso a todo evento atmosférico capaz de producir, directa o indirectamente, daños a las personas o daños materiales de consideración (lluvias, nevadas, tormentas, deshielos, olas de frío...). Sin embargo, este nivel de precisión no alcanza mayor concreción que el territorio provincial, como se puede ver en las figuras 6.5 y 6.6. Aunque incluya distintas zonificaciones, la mayoría de veces no es suficiente esta escala de concreción para evitar inundaciones en zonas rurales no preparadas para ello y que no suelen estar pendientes de la misma.

El SAIH es un sistema de información encargado de captar, transmitir en tiempo real, procesar y presentar aquellos datos que describen el estado hidrológico e hidráulico de la cuenca, incluyendo, por tanto, el conocimiento del régimen hídrico a lo largo de su red fluvial. Este sistema proporciona información en las webs de las confederaciones hidrográficas relativa

Figura 6.5: Mapa del sistema meteoalerta donde se observa el riesgo que afecta a Castilla y León a fecha 26 de diciembre de 2017 (afectada por el temporal Bruno), publicado en la red social Twitter.

a los niveles y caudales circulantes por los principales ríos y afluentes, el nivel y volumen embalsado en las presas, el caudal desaguado por los aliviaderos, válvulas y compuertas de las mismas, la lluvia en numerosos puntos y los caudales detraídos por los principales usos del agua (CHD,2015; ver figura 6.7). Esta información se actualiza diariamente, pero realmente no llega a la población general por la poca facilidad de acceder a ella y el desconocimiento general de la existencia de la misma.

Esta información debe pasarse a un sistema de alerta temprana a los ayuntamientos para que puedan informar a los ciudadanos de la futura inundación y así desalojar sus viviendas si fuese necesario [18].

Por ejemplo, para evitar una inundación tipo como la sufrida en el año hidrológico 2000 - 2001 que se ha modelizado en el capítulo anterior (5), habría que proponer una evacuación a los 5 minutos para que dé tiempo a los vecinos a salir de sus casas e ir al oeste del pueblo. En el caso de los vecinos de las casas del sureste, éstos tienen algo más de tiempo. Sus casas no estarán inundadas hasta pasados 15 minutos desde el punto de aviso. En este caso, se propone una evacuación a los 9-10 minutos desde el aviso.

6.1.4. Plan de emergencias

El plan estatal de Protección Civil establecido por la Directriz Básica, distingue tres fases:

6.1. MEDIDAS NO ESTRUCTURALES

- Fase de pre-emergencia.
- Fase de emergencia.
- Fase de normalización.

En Castilla y León existe un Plan de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones, INUNCyL, cuyo objetivo es prevenir los daños que puedan causar las inundaciones en el ámbito geográfico de la comunidad. En él se establecen los requisitos mínimos de estructura, organización y criterios operativos y de respuesta que se han implantado en Castilla y León.

Además, el plan de cada comunidad debe establecer las directrices para la elaboración de planes de actuación de ámbito local. Estos planes deben tener las siguientes funciones (CHD,2015):

- Prever la estructura organizativa y los procedimientos para la intervención en emergencias por inundaciones.
- Catalogar elementos vulnerables y zonificar el territorio en función del riesgo.
- Especificar procedimientos de información y alerta a la población.
- Catalogar los medios y recursos específicos para la puesta en práctica de las actividades previstas.

Estos planes locales deben tenerlos los municipios con nivel de peligrosidad A (con periodo de retorno de 50 años) y los de peligrosidad B con más de 1000 habitantes.

El caso de Las Omañas está en el primer caso, con peligrosidad A, aunque no dispone de este plan de actuación local frente a inundaciones. Desde aquí se considera una irresponsabilidad del consistorio frente a los ciudadanos no haber promovido este plan.

6.1.5. Comunicación

Este paquete de medidas trata de mejorar la publicación y divulgación de los datos relativos a los daños ocasionados por inundaciones [18] [83], así como de los planes de protección, la presentación de las evaluaciones de los efectos del cambio climático, divulgación en campañas informativas, etc.

Para mejorar esta concienciación y presentar las distintas áreas metropolitanas afectadas, ciudades como Pamplona han activado protocolos de alerta o han puesto paneles en puntos conflictivos (figura 6.8) para que los conductores y viandantes estén avisados en caso de alerta por inundaciones en la zona. Acciones similares se deben promover en la zona de estudio (figura 6.9).

Además de este tipo de paneles, se promueve la organización de charlas a los vecinos, de modo que se dé a conocer el porqué de este riesgo, las medidas a tomar, los planes de protección a seguir, y que se explique cómo el ciudadano puede y debe conocer el estado de sus ríos (SAIH, Confederación...). Todo ello impartido por los distintos profesionales encargados de cada una de las tareas (geólogos, administrativos, bomberos, ingenieros...). Estas medidas dan a conocer el entorno y favorecen una rápida actuación en caso de avenida.

6.2. Medidas estructurales

Las medidas estructurales son aquellas que implican intervenciones físicas para reducir las inundaciones por aguas superficiales, por lo general, aunque no exclusivamente, en un entorno urbano [31] [76].

En los márgenes del río Luna encontramos, actualmente, una medida tomada por la Confederación Hidrográfica del Duero. Se trata de un dique de contención de 0.5 metros de altura, con un diseño rectangular. Esta medida, como se ve en las fotografías del capítulo 5, no ha sido de utilidad. En campo lo encontramos roto y deshecho en algunas zonas. Es por eso que el Ayuntamiento reclama una nueva infraestructura aunque no hay acuerdo entre las partes de cómo y dónde llevarla a cabo (al inicio de esta tesis ya estaban en esta tesitura y todavía hoy no se ha resuelto el tema).

El objetivo principal de este apartado, por tanto, es diseñar unas actuaciones que realmente tengan consecuencias positivas, simulando el efecto de diques de contención en el río Luna para reducir el alcance de los episodios de avenidas calculados en el capítulo anterior, de forma que se eviten en mayor medida los daños en las poblaciones adyacentes.

La obra estructural más común son los diques de retención, que laminan las avenidas solventando el problema de las inundaciones [31] [76]. Sin embargo, su efectividad no es siempre absoluta, por lo que se debe combinar con las medidas no estructurales antes mencionadas.

El diseño de los diques propuestos se ha realizado con una base de 1 metro de amplitud y una cota de coronación de 1.5 metros sobre el nivel del terreno en cada punto. Este es el diseño más común y que mejor se adapta al área de estudio [62]. Además, la simulación base para conocer el alcance de estas medidas se ha realizado con los datos del año hidrológico 2013-2014 (ver figura 5.8), por coincidir con los datos previstos para una inundación con un periodo de retorno de 100 años.

Se han diseñado tres diques a lo largo del tramo estudiado en el río Luna (ver figuras 6.10 y 6.11). Con el situado más al norte observamos que la población de Mataluenga queda fuera de peligro. El dique central apenas tiene variación, porque se observan pérdidas en un punto del margen izquierdo cercano a Mataluenga. Tras una campaña de campo se ha comprobado que las pérdidas responden a una canalización efectuada años atrás, que comunica Mataluenga con el río Luna, aportando aguas distintas. Las compuertas de esta canalización son demasiado pequeñas y no sirven como contención ante un episodio de avenidas (ver figuras 6.12, 6.13). El dique situado en el margen izquierdo, junto a Villarroquel, se observa una disminución de caudal circulante en la llanura de inundación, quedando incluso algunas zonas secas. Aunque se han simulado distintos diseños de diques, alturas y situaciones, no se ha encontrado solución más satisfactoria que las presentadas [62] (ver resultados comparando figuras 5.9 y 6.12, y por otra parte las figuras 5.3 y 6.14).

En el río Omaña también se han diseñado tres diques siguiendo la misma estructura (ver figuras 5.3, 6.14) [64]. En este caso se pueden observar como los diques retienen el agua en el margen izquierdo, donde apenas llega el agua al municipio de Las Omañas. En el dique central se aprecia una disminución de la altura de agua en la llanura de inundación, haciendo más accesible la comunicación. Aunque se aprecia un aporte extra de agua a la llanura de inundación en el área cercana al meandro situado aguas abajo de la población. Esto es debido a que en esa zona ya no se han diseñado diques, por lo que el agua circula con más caudal (por no haberse dispersado antes) y libremente.

Cabe destacar que el uso de simulaciones de las soluciones técnicas propuestas no impli-

6.2. MEDIDAS ESTRUCTURALES

can la construcción de las mismas, aunque se simula para valorar los respectivos impactos positivos y negativos de las obras propuestas para decidir si se construirán en un futuro próximo o no. La simulación de las medidas previa a su construcción reduce los impactos negativos económicos y ambientales al llevarse a cabo, puesto que se trabaja su efectividad.

CAPÍTULO 6. PROPUESTA DE MEDIDAS DE DEFENSA

Figura 6.6: Explicación del riesgo existente en la provincia de León a fecha 26 de diciembre de 2017 (afectada por el temporal Bruno).

6.2. MEDIDAS ESTRUCTURALES

Figura 6.7: Visor de información de la red SAIH-A enlazado a la web de la Confederación Hidrográfica del Duero a fecha 26 de diciembre de 2017 (afectada por el temporal Bruno)

Figura 6.8: Panel en las calles de Pamplona para evitar daños por inundaciones en un aparcamiento (extraído de Pamplonaactual.com, noticia del 6 de febrero de 2014).

¿CÓMO ACTUAR EN RIESGO DE INUNDACIÓN?

Figura 6.9: Ejemplo de panel explicativo para colocar en las poblaciones afectadas, para conocimiento de los vecinos y visitantes (elaboración propia).

6.2. MEDIDAS ESTRUCTURALES

Figura 6.10: Diseño de uno de los diques en la malla, datos del mismo, y se indica traza en amarillo.

Figura 6.11: Simulación con el diseño de tres diques, uno en la parte superior del área y otros dos aguas abajo. La simulación está realizada con los caudales máximos registrados el año hidrológico 2013-2014.

Figura 6.12: Resultados de la simulación del dique en el margen derecho del río, junto a Villarroquel. En la zona superior izquierda, se aprecia una disminución del caudal circulante gracias al dique diseñado. También se puede apreciar el dique diseñado en el margen izquierdo, a la altura de Mataluenga, en pro de controlar la avenida, aunque no se obtienen resultados característicos debido a las pérdidas.

Figura 6.13: Salida de la canalización al río, detalle de las compuertas.

6.2. MEDIDAS ESTRUCTURALES

Figura 6.14: Resultados de la simulación en el río Omaña con diques que contienen el agua. Las flechas blancas muestran la localización de los diques.

Capítulo 7

CONCLUSIONES

De la presente investigación se desprenden las siguientes conclusiones:

- La caracterización geográfica, geológica y geomorfológica de la zona de estudio explica que se trata de un área situada al noroeste de la provincia de León, en el paso de zona de montaña con litologías paleozoicas (lutitas, areniscas, calizas y dolomías, y cuarcitas, de más antiguo a más moderno) a páramo cenozoico (con materiales arcillosos y de conglomerados). Esta zona ha sufrido cambios en la ordenación del territorio no urbanizable a lo largo de los años, como se evidencia en el análisis de las fotografías aéreas.
- El clima es un factor determinante para las inundaciones. En este caso, se trata de un clima árido - templado con invierno frío según la clasificación de Walter, y un clima templado húmedo con falta de estación seca según Köpper. Es decir, es un área con abundantes lluvias distribuidas principalmente en los meses de otoño (octubre, principalmente) y primavera (marzo - abril).
- El río Luna está controlado por dos embalses, el de Barrios de Luna situado más al norte y el de Selgas de Ordás, utilizado para el riego. Aun así, no se impide las inundaciones de la llanura aguas abajo.
- Los caudales de años húmedos son superiores al doble de la de los años considerados secos y casi el doble que los años normales. Los últimos años húmedos han sido: 2013-2014, 2006-2007 y 2000-2001. Estas inundaciones han provocado numerosos daños materiales y han sido provocadas por temporales de lluvias, sumado a épocas de deshielo y desembalse de Barrios de Luna.
- El área está considerada como zona de riesgo alto de inundación en el Plan Hidrológico de Cuenca pero actualmente no es una zona prioritaria de actuación en el plan 2015-2020. Esto significa que la Confederación Hidrográfica del Duero no prepara ninguna actuación en la zona.
- Los materiales transportados por el río son groseros (con un diámetro medio de aproximadamente 5 cm), formando barras centrales y laterales, donde no se encuentra material fino. Estos materiales tienen una esfericidad media, que va en aumento a

medida que crece la distancia a la cabecera. Son cuarcitas y en lámina delgada presentan textura granoblástica sin microfósiles, presentando además minerales accesorios como biotita, moscovita, turmalina y microclina. Por análisis de muestras a lo largo del cauce, determinamos que provienen de la formación Barrios, aunque con los datos accesibles y al no haber ninguna gran avenida en la duración de la investigación, no es posible conocer si el transporte se ha producido en un episodio o en distintos.

- Para realizar un estudio sobre las inundaciones sufridas en un lugar, de forma que se puedan simular los efectos producidos, son necesarios una serie de parámetros base. Estos son: calados y/o datos pluviométricos, modelo digital del terreno o similar (batimetría del río...), conocer el tipo de río y su historia y cambios de configuración a lo largo del tiempo, conocer el tipo de vegetación y su distribución, así como las comunicaciones y edificios más importantes.
- El sistema de actuación propuesto para zonas de confluencia de ríos con tendencia a sufrir inundaciones periódicas consta de los siguientes pasos: caracterización exhaustiva de la cuenca, simulación y validación de los resultados (a poder ser con datos reales), y propuesta de medidas correctoras, simuladas para reducir los costes y aumentar la efectividad de las tareas a llevar a cabo.
- Iber es un buen programa para realizar este tipo de estudios, ya que ofrece muchas posibilidades para describir la zona a mano, de forma que la información introducida sea lo más específica posible. Esto se ha notado en la introducción manual de la rugosidad, que dota a la zona de unos datos concretos a la escala utilizada.
- Con las simulaciones realizadas se ha concluido que no hay diferencia al introducir una condición inicial seca o con calado, puesto que el caudal punta es tan alto que no se observan cambios grandes, de este modo, elegir una condición inicial seca disminuye el tiempo de cálculo. También en estas simulaciones se ha considerado mejor realizar los cálculos con un esquema Roe de primer orden por dar los mismos resultados y ser más rápido.
- Al realizar la validación de los resultados numéricos basándonos en fotografías tomadas por los vecinos a lo largo del día en el que se produjo la última gran avenida (2 de abril de 2014), se aprecia claramente que los datos son bastante aproximados (únicamente afectados por las distintas precisiones de los elementos de medida, dentro del rango de la incertidumbre). Esto evidencia la corrección de las condiciones establecidas en los cálculos numéricos.
- Para elaborar unas buenas medidas preventivas nos basamos en los tiempos calculados, gracias a los cuales podemos establecer los tiempos de avisos y evacuación si fuese necesario. En este sentido, se han desarrollado propuestas tanto de medidas no estructurales, las más extendidas por tener menor coste, como estructurales.
- Las medidas no estructurales se han diseñado en base a los mapas de riesgo y peligrosidad, ya elaborados por la CHD, donde se aprecian las áreas con riesgo potencial de inundación. A partir de ellos y por la geografía y habitantes de la población, el municipio está obligado a tener un Plan de Prevención frente al Riesgo de Inundaciones

(según el plan de Protección Civil INUNCyL). Este plan no existe en la actualidad, por lo que se propone en esta investigación uno base.

- Se propone también mejorar la predicción y control de inundaciones, incluida la gestión de los embalses frente a las mismas, e implementar los sistemas de alerta temprana, de forma que estén más localizados y puedan ser más conocidos por los habitantes de la zona en cuestión. Además, se insta a las administraciones pertinentes a colocar paneles informativos tanto señalando las zonas inundables como de formas de actuación para la prevención, la recuperación y el tiempo que dure la alerta.
- Como complemento a estas medidas no estructurales, se propone la creación de diques (medidas estructurales) para reducir los daños materiales. Estos diques se han simulado con Iber para comprobar el efecto que tendrían en distintos puntos y así elegir las características y localizaciones más adecuadas al entorno. Se han confirmado en el área 4 diques: uno de ellos en el río Omaña y otros tres en el río Luna, de forma que se evita la entrada de agua en los municipios y se disminuye la altura de la lámina de agua en los campos de la llanura de inundación.

Bibliografía

- [1] Los barrios de luna (león, españa): Un lugar de interés geológico y diáctico.
- [2] ANDRÉS, P., AND RODRÍGUEZ, R. *Evaluación y prevención de riesgos ambientales en Centroamérica*. Documenta Universitaria, 2008.
- [3] ARAGONÉS, D., DÍAZ-DELGADO, R., AND BUSTAMANTE, J. Tratamiento de una serie temporal larga de imágenes Landsat para la cartografía de la inundación histórica de las marismas de Doñana. In *XI Congreso Nacional de Teledetección* (2005), pp. 21–23.
- [4] ARAMBURU, C., AND GARCÍA-RAMOS, J. La sedimentación cambro-ordovícica en la zona cantábrica (no de españa). *Trabajos de Geología* 19 (1983), 45–75.
- [5] ARAMBURU, C., AND GARCÍA-RAMOS, J. Cambro-Ordovician alluvial and marine sedimentation in the Cantabrian Zone, North Spain. *5th European Regional Meeting of Sedimentology* 1, 1 (1984), 30–31.
- [6] ARAMBURU, C., MARCO, C. J., MÉNDEZ BEDIA, I., ARBIZU, M., RÁBANO, I., AND TRUYOLS, J. Primera identificación de materiales del Ordovícico Medio en la sección de Los Barrios de Luna (Zona Cantábrica, noroeste de España). *Geogaceta* 20, 1 (1996), 7–10.
- [7] ARAMBURU, C., MÉNDEZ-BEDIA, I., AND ARBIZU, M. The lower paleozoic in the cantabrian zone (Cantabrian Mountains, NW Spain). *Paleozoic conodonts from north Spain, Cuaderno del Museo Geominero* 1 (2002), 35–49.
- [8] ARANGO SELGAS, A. M. *Impacto de las inundaciones en España: 1990-2010*. PhD thesis, Universidad de Oviedo, 2012.
- [9] AREU-RANGEL, O. S., GONZÁLEZ-CAO, J., CRESPO, A., AND BONASIA, R. Numerical modelling of hydrological safety assignment in dams with iber. *Sustainable Water Resources Management* (2017), 1–12.
- [10] AROCA-JIMÉNEZ, E., BODOQUE, J. M., GARCÍA, J. A., AND DíEZ-HERRERO, A. Analysis of social vulnerability to flash floods in urban areas of Castilla y León (Spain). *International Conference of urban risks in Lisbon* (2016), 1–8.
- [11] AROCA-JIMENEZ, E., BODOQUE, J. M., GARCIA, J. A., AND DIEZ-HERRERO, A. Construction of an integrated social vulnerability index in urban areas prone to flash flooding. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 17, 9 (2017), 1541.

- [12] ARRANZ, M. El riesgo de inundaciones y la vulnerabilidad en áreas urbanas. Análisis de casos en España. *Estudios geográficos* 69, 265 (2008), 385–416.
- [13] AYALA-CARCEDO, F., AND GONZÁLEZ-JIMÉNEZ, A. Mitigación de los desastres naturales en el mundo y el desarrollo sostenible. In *Riesgos naturales y desarrollo sostenible: impacto, predicción y mitigación* (2007), Instituto Geológico y Minero de España, pp. 19–46.
- [14] BLADÉ, E., CEA, L., AND CORESTEIN, G. Modelización numérica de inundaciones fluviales. *Ingeniería del agua* 18, 1 (2014), 71–82.
- [15] BLADÉ, E., CEA, L., CORESTEIN, G., ESCOLANO, E., PUERTAS, J., VÁZQUEZ-CENDÓN, E., DOLZ, J., AND COLL, A. Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería* 30, 1 (2014), 1–10.
- [16] BODOQUE, J. M., AMÉRIGO, M., DÍEZ-HERRERO, A., GARCÍA, J. A., CORTÉS, B., BALLESTEROS-CÁNOVAS, J. A., AND OLCINA, J. Improvement of resilience of urban areas by integrating social perception in flash-flood risk management. *Journal of Hydrology* 541 (2016), 665–676.
- [17] BRUFAU, P., AND GARCÍA NAVARRO, P. Esquemas de alta resolución para resolver las ecuaciones de shallow water. *Revista internacional de métodos numéricos* 16, 4 (2000), 493–512.
- [18] CALVO GARCÍA-TORNEL, F. La investigación científica, los riesgos naturales y su transmisión pública. In *Riesgos naturales y desarrollo sostenible: impacto, predicción y mitigación* (2007), Instituto Geológico y Minero de España, pp. 129–133.
- [19] CALVO GARCÍA-TORNEL, F. Ordenación territorial vs. protección civil en la mitigación del riesgo natural. In *Riesgos naturales y desarrollo sostenible: impacto, predicción y mitigación* (2007), Instituto Geológico y Minero de España, pp. 145–156.
- [20] CEA, L. *An unstructured finite volume model for unsteady turbulent shallow water flow with wet-dry fronts: numerical solver and experimental validation*. PhD thesis, Tesis doctoral, Universidad de A Coruña, 2005.
- [21] CEA, L., PUERTAS, J., AND VÁZQUEZ-CENDÓN, M. E. Depth averaged modelling of turbulent shallow water flow with wet-dry fronts. *Archives of Computational Methods in Engineering* 14, 3 (2007), 303–341.
- [22] CEA, L., VÁZQUEZ-CENDÓN, M. E., AND PUERTAS, J. El método de volúmenes finitos aplicado a problemas de ingeniería fluvial y costera. *La Gaceta de la RSME* 12, 1 (2009), 71–93.
- [23] CHURUKSAEVA, V., AND STARCHENKO, A. Mathematical modeling of a river stream based on a shallow water approach. *Procedia Computer Science* 66 (2015), 200–209.

BIBLIOGRAFÍA

- [24] COLMENERO, J., MANJÓN, M., GARCÍA-RAMOS, J., AND VARGAS, I. Depósitos aluviales cíclicos en el Paleógeno del borde N. de la Cuenca del Duero (León-Palencia). I Reunión sobre la Geología de la Cuenca del Duero. *Temas Geológicos y Mineros* 6 (1982), 185–196.
- [25] COMPTON, R. R. Manual of field geology. *Soil Science* 93, 4 (1962), 295.
- [26] COMTE, P. La série cambrienne et silurienne du León (Espagne). *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences* 204 (1937), 604–606.
- [27] CORESTEIN, G., BLADÉ, E., CEA, L., LARA, Á., ESCOLANO, E., AND COLL, A. Iber, a river dynamics simulation tool. In *GiD 2010-5th Conference on Advances and Applications of GiD* (2010), Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (CIMNE), pp. 47–50.
- [28] CORESTEIN, G., BLADÉ, E., LECHUGA, C., BERGA, M., AND GONZÁLEZ, A. Estudio experimental y numérico del meandro de quinzanas (asturias). In *XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica* (2010), pp. 1–16.
- [29] CROZZOLI, L., AND BATALLA, R. Aplicación de la fotografía al análisis granulométrico de ríos con lecho de gravas. *Cuaternario y Geomorfología*, 2003, núm. 17, p. 3-4 (2003).
- [30] ECHEVERRIBAR, I., MORALES-HERNÁNDEZ, M., BRUFAU, P., AND GARCIA-NAVARRO, P. Levees numerical modelling in river flooding. *Internationa Symposium of Shallow Flows* 1, 1 (2017), 1–3.
- [31] ESCUDER, I., MATHEU, E., AND CASTILLO, J. Análisis y evaluación de riesgos de inundación: estimación del impacto de medidas estructurales y no estructurales. *Analysis and Assessment of Flood Risks: Estimated Impact of Structural and Non-Structural Measures*. link (2010).
- [32] FÁRBER, A., AND JARITZ, W. Die Geologie des westasturischen Küstengebietes zwischen San Esteban de Pravia und Ribadeo (NW-Spanien). *Geol. Jb* 81, 679.738 (1964).
- [33] FE, J., CUETO-FELGUEROSO, L., NAVARRINA, F., AND PUERTAS, J. Numerical viscosity reduction in the resolution of the shallow water equations with turbulent term. *International journal for numerical methods in fluids* 58, 7 (2008), 781–802.
- [34] FERNÁNDEZ, C. Estudio estadístico del inicio del movimiento en las protecciones contra la erosión en obras fluviales. diseño de las instalaciones y experimentos con aplicación a pilas de puente y protección de orillas. Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, 2013.
- [35] FERNÁNDEZ, F. Las primeras aplicaciones civiles de la fotografía aérea en España: el Catastro y las Confederaciones Hidrográficas. *Ería* (1998).
- [36] FERNÁNDEZ, F. Los principales fondos históricos de fotografía aérea sobre Madrid. *Ería* 64, 65 (2004), 319–336.

- [37] FERNÁNDEZ, F., AND QUIRÓS, F. El vuelo fotográfico de la serie a. *Ería* 1, 43 (1997), 190–198.
- [38] FERREIRO, A. M. F. *Desarrollo de técnicas de post-proceso de flujos hidrodinámicos, modelización de problemas de transporte de sedimentos y simulación numérica mediante técnicas de volúmenes finitos*. PhD thesis, Universidad de Sevilla, 2006.
- [39] FRAGA, I., CEA, L., PUERTAS, J., PIÑEIRO, J., MAESTRO, I., AND CALVO, E. Diseño de soluciones de protección frente a avenidas mediante modelización numérica bidimensional. *Jornadas de Ingeniería del Agua* 1, 1 (2011), 559–569.
- [40] GALLARDO, J., CASTRO, M., AND PARÉS, C. Un esquema de volúmenes finitos de alto orden para las ecuaciones de aguas someras con topografía y áreas secas. In *XX Congreso de Ecuaciones Diferenciales y Aplicaciones* (2007), pp. 1–8.
- [41] GARCÍA, C., AND MARTÍN, J. Caracterización granulométrica del lecho móvil de un río de gravas efímero: Aplicación a un tramo de la riera de les arenes. *Acta geológica hispánica* 36, 1 (2001), 137–147.
- [42] GARCÍA, J., AND PUIGDEFÁBREGAS, J. Efectos de la construcción de pequeñas presas en cauces anastomosados del pirineo central. *Cuadernos de investigación geográfica*, 11 (2013), 91–102.
- [43] GINÉS, C., HERNÁNDEZ, S., AND CÁRDENES, D. Aplicación de la fotografía aérea en el análisis de los procesos espaciales y la ordenación del territorio en Canarias. *Ería* 98, 98 (2016), 327–344.
- [44] GOLDICH, S. A study in rock-weathering. *The Journal of Geology* 46, 1 (1938), 17–58.
- [45] GONZÁLEZ, J. *Análisis de procesos de erosión local en márgenes de cauces fluviales con curvatura en planta*. PhD thesis, ETSI Caminos, Canales y Puertos, UPM, 2004.
- [46] GONZÁLEZ-AGUIRRE, J., VÁZQUEZ-CENDÓN, M., AND ALAVEZ-RAMÍREZ, J. Simulación numérica de inundaciones en Villahermosa México usando el código IBER. *Ingeniería del agua* 20, 4 (2016), 201–216.
- [47] GUERRERO, J., GUTIÉRREZ, F., AND LUCHA, P. Peligrosidad, daños y mitigación de inundaciones, subsidencia por disolución y movimientos de ladera en la localidad de cadrete (depresión del ebro, zaragoza). *Cuaternario y Geomorfología* 19, 1-2 (2005), 63–82.
- [48] HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America bulletin* 56, 3 (1945), 275–370.
- [49] HOWARD, A. D. Drainage analysis in geologic interpretation: a summation. *AAPG bulletin* 51, 11 (1967), 2246–2259.
- [50] JIMÉNEZ, M. Geomorfología fluvial en la cabecera del río Nalón (Cordillera Cantábrica, Noroeste de España). *Trabajos de Geología* 21, 21 (1999), 189–201.

BIBLIOGRAFÍA

- [51] JIMÉNEZ SÁNCHEZ, M. Geomorfología de la cuenca alta del río Nalón (Cordillera Cantábrica, Asturias). *Trabajos de Geología* 21 (1994), 189–200.
- [52] JIMÉNEZ SÁNCHEZ, M. El glaciario en la cuenca alta del río Nalón (NO de España): una propuesta de evolución de los sistemas glaciares cuaternarios en la Cordillera Cantábrica. *Revista de la Sociedad Geológica de España* 9, 3-4 (1996), 157–168.
- [53] KÖPPEN, W. Klassifikation der Klimate nach Temperatur, Niederschlag und Jahreslauf. *Petermann's Mitteilungen* 64 (1918), 193–203.
- [54] KRUMBEIN, W. C. The effects of abrasion on the size, shape and roundness of sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Petrology* 11 (1942), 64–72.
- [55] LEYVA, F., MATAS, J., AND RODRÍGUEZ FERNÁNDEZ, L. *Memoria explicativa del Mapa Geológico de España E. 1: 50.000, Hoja n 129 (13-08)(La Robla)*. ITGE Press, Madrid, 1984.
- [56] LOTZE, F. Zum Alter nordwestspanischer Quarzite-Sandstein-Folgen. *Neues Jahrb Geol Paläontol Monatsh* 10 (1957), 464–471.
- [57] MARTÍN, J., LÓPEZ, S., MARTÍN, P., SIMARRO, G., AND BENITO, G. Uso de modelos uni-y bidimensionales en llanuras de inundación. Aplicación al caso del río Tago en Talavera de la Reina. *Ingeniería del agua*, 1 (2003), 91–102.
- [58] MARTÍN, J. I., AND MARTÍN, J. C. Aproximación al Paleolítico Inferior en los valles de Benavente: El Valle del Órbigo. *Brigencio* 4 (1995), 17–49.
- [59] MARTÍNEZ-CANTÓ, R., CADENAS, M. J., AND HIDALGO, A. Análisis geomorfológico en la cuenca inferior del río Luna. *Teledetección: nuevas plataformas y sensores aplicados a la gestión del agua, la agricultura y el medio ambiente* (2017), 365–368.
- [60] MARTÍNEZ-CANTÓ, R., AND HIDALGO, A. Inundaciones fluviales en Santiago del Molinillo y alrededores (León). *Geotemas* 16 (2016), 87.
- [61] MARTÍNEZ-CANTÓ, R., AND HIDALGO, A. Modelización de inundaciones fluviales con iber. caso práctico de Santiago del Molinillo (León). *Revista de las Ciencias Geomáticas* 34 (2016), 7–12.
- [62] MARTÍNEZ-CANTÓ, R., AND HIDALGO, A. Diseño de diques en la cuenca inferior del río Luna. In *V Jornadas de Ingeniería del Agua* (2017), GEAMA, pp. 262–264.
- [63] MARTÍNEZ-CANTÓ, R., AND HIDALGO, A. Simulación de inundaciones fluviales con iber: validación de resultados. *Actas II Workshop iber* (2017), 9–10.
- [64] MARTÍNEZ-CANTÓ, R., AND HIDALGO, A. A methodology based on numerical Simulation to study river floods. Application to lower river Omaña basin. 1–7.
- [65] MARTÍNEZ-CANTÓ, R., MARTÍNEZ, A., AND HIDALGO, A. Modelo bidimensional para flujo en aguas poco profundas: tratamiento con iber. *Actas CMN 2017* (2017), 90–98.

- [66] MATARREDONA COLL, E. Aplicación de la fotografía aérea en la cartografía de suelos. *Investigaciones geográficas*, nº 3, 1985; pp. 7-30 (1985).
- [67] MENÉNDEZ, A. Delimitación de zonas inundables y planes de gestión del riesgo de inundación. *Ambienta 110* (2015), 36–43.
- [68] MORALES, C., AND ORTEGA, M. T. Riesgos climáticos en Castilla y León: Análisis de su peligrosidad. *Boletín de la AGEN* (2000), 155–179.
- [69] MORALES, C. G., AND ORTEGA, M. T. Las inundaciones en Castilla y León. *Ería 1*, 59 (2002), 305–332.
- [70] MURILLO, J., BRUFAU, P., GARCÍA-NAVARRO, P., RODRÍGUEZ, M., AND ANDRÉS, A. Aplicación del modelo bidimensional GUAD-2D para la determinación de zonas inundables en el TM de Fraga (Huesca). In *Universidad de Zaragoza e INCLAM, SA* [http://www.ciccp.es/biblio-digital/Icitema- III/congreso/pdf/030302. pdf](http://www.ciccp.es/biblio-digital/Icitema-III/congreso/pdf/030302.pdf) (2008).
- [71] OLCINA, J. Ordenación del territorio en la mitigación de riesgos naturales en España. In *Riesgos naturales y desarrollo sostenible: impacto, predicción y mitigación* (2007), Instituto Geológico y Minero de España, pp. 65–88.
- [72] OLCINA, J., AND DÍEZ-HERRERO, A. Cartografía de inundaciones en España. *Estudios geográficos 1*, 282 (2017), 283–315.
- [73] OLCINA CANTOS, J. Riesgo de inundaciones y ordenación del territorio en la escala local: el papel del planeamiento urbano municipal. 49–84.
- [74] OROZCO, M., AZAÑÓN, J. M., AZOR, A., AND ALONSO-CHAVES, F. M. *Geología física*. No. 551 in G43. Paraninfo, 2002.
- [75] ORTEGA, M., AND MORALES, C. Crecidas e inundaciones durante el invierno 2000-2001 en la ciudad de Valladolid y su entorno. *Investigaciones Geográficas (Esp) 1*, 27 (2002), 35–64.
- [76] PÉREZ MORALES, A. Actuaciones de carácter estructural para la mitigación y prevención de los efectos de las riadas e inundaciones en los municipios del sur de la región de Murcia. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 53 (2010), 267–285.
- [77] POWERS, M. C. Comparison chart for estimating roundness and sphericity. *AGI data sheet 18*, 1 (1982).
- [78] RAMÍREZ, C., GARCÍA, J., RAMÍREZ, O., AND BOCANEGRA, R. Caracterización de los materiales del lecho de un río para propósitos de modelación matemática. In *Agua 2003: Usos Múltiples del Agua, para la Vida y el Desarrollo Sostenible* (2003), IWA, pp. 1–8.
- [79] RIBERA, L. Los mapas de riesgo de inundaciones: representación de la vulnerabilidad y aportación de las innovaciones tecnológicas. *Documents d'Anàlisi Geogràfica*, 2004, núm. 43, p. 153-171 (2004).

BIBLIOGRAFÍA

- [80] RINCÓN, J., PÉREZ, M., DELFÍN, G., FREITEZ, C., AND MARTÍNEZ, F. Análisis comparativo entre los modelos hec-ras e iber en la evaluación hidráulica de puentes. *Gaceta Técnica* 17, 1 (2017), 9–28.
- [81] RODRÍGUEZ, J. Introducción al estudio climático de las Sierras Exteriores (Prepirineo de Huesca) y su incidencia en la morfogénesis actual. *Geographicalia* 4 (1979), 65–85.
- [82] RODRÍGUEZ FERNÁNDEZ, L., BARBA, P., BARDAJÍ, T., BRAVO FERNÁNDEZ, I., FERNÁNDEZ, L., GALÁN, L., GALLASTEGUI, G., GUTIÉRREZ CLAVERO, M., HEREDIA, N., LÓPEZ DÍAZ, F., ET AL. *Mapa Geológico de España, E. 1/50.000, 2a serie, no. 102 (Los Barrios de Luna)*. ITGE Press, Madrid, 1991.
- [83] SAURÍ, D., RIBAS, A., LARA, A., AND PAVÓN, D. La percepción del riesgo de inundación: experiencias de aprendizaje en la costa brava. *Papeles de Geografía*, 51-52 (2010), 269–278.
- [84] SCHUMM, S. A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Geological Society of America bulletin* 67, 5 (1956), 597–646.
- [85] SDZUY, K. Biostratigrafía de la griotte cambrica de los barrios de luna (leon) y de otras sucesiones comparables. *Trabajos de Geología* 2, 2 (1968), 45–59.
- [86] SUÁREZ, A., BARBA, P., HEREDIA, N., RODRÍGUEZ, L., AND FERNÁNDEZ. *Memoria explicativa del Mapa Geológico de España E. 1: 50.000, Hoja n 161 (León)*.
- [87] TORO, E. F. *Shock-capturing methods for free-surface shallow flows*. John Wiley, 2001.
- [88] TOYOS, J., AND ARAMBURU-ZABALA, C. El ordovícico en el área de Los Barrios de Luna, Cordillera Cantábrica (NW de España). *Trabajos de Geología* 1, 34 (2014), 61–96.
- [89] VERSTEEG, H. K., AND MALALASEKERA, W. *An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method*. Pearson Education, 2007.
- [90] WALTER, H., AND BOX, E. Global classification of natural terrestrial ecosystems. *Plant Ecology* 32, 2 (1976), 75–81.
- [91] ZINGG, T. *Beitrag zur schotteranalyse*. PhD thesis, ETH Zürich, 1935.